



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE DOUTORADO EM  
ENGENHARIA DE PROCESSOS**



**ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO E MODELOS ANALÍTICOS PARA A  
DESCRIÇÃO DA DESIDRATAÇÃO DE MELÃO CORTADO EM FORMA DE CUBO**

**Autor: Rubens Maciel Miranda Pinheiro**

**Orientador: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva**

**Campina Grande, Paraíba, 2017**

# **ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO E MODELOS ANALÍTICOS PARA A DESCRIÇÃO DA DESIDRATAÇÃO DE MELÃO CORTADO EM FORMA DE CUBO**

Tese de Doutorado submetida à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

**Área de Concentração:**

**Desenvolvimento de Processos**

**ORIENTADOR:**

**Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva**

**Campina Grande, Paraíba**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- P654a Pinheiro, Rubens Maciel Miranda.  
Algoritmos de otimização e modelos analíticos para a descrição da desidratação de melão cortado em forma de cubo / Rubens Maciel Miranda Pinheiro. – Campina Grande, 2017.  
196f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.  
"Orientação: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva".
1. Equação de Difusão. 2. Soluções Analíticas. 3. Coordenadas Cartesianas. 4. Algoritmos de Otimização. I. Silva, Wilton Pereira da. II. Título.
- CDU 635.611(043)

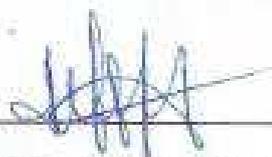
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE RUBENS MACIEL MIRANDA PINHEIRO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado aprovada em 03 de março de 2017



---

Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva  
UAF/CCT/UFCG – Orientador



---

Prof. Dr.ª Morgana Ligia de Farias Freire  
DF/CCT/UEPB – Examinadora externa



---

Prof.ª Dr.ª Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva  
UAF/CCT/UFCG – Examinadora externa



---

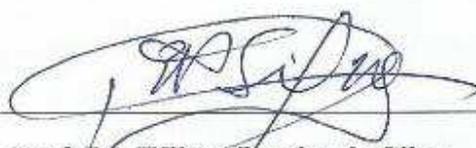
Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde  
UAFM/CES/UFCG – Examinador externo



---

Prof. Dr. Jossyl Amorim R. de Souza  
UAF/CCT/UFCG – Examinador externo

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Rubens Maciel Miranda Pinheiro e aprovada pela banca examinadora em 03 de março de 2017.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'W. Pereira da Silva', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

UAF/CCT/UFCG – Orientador

*“Portanto, dai a cada um o que deveis: a quem tributo, tributo; a quem imposto, imposto; a quem temor, temor; a quem honra, honra. A ninguém devais coisa alguma, a não ser o amor com que vos ameis uns aos outros; porque quem ama aos outros cumpriu a lei.”*

*Romanos 13. 7-8*

*A Deus que merece toda honra, glória e louvor.*

*A minha amada esposa, minha mãe e meus avós por sempre terem uma  
palavra de incentivo nos momentos mais difíceis.*

## AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pois d'Ele, por Ele e para Ele são todas as coisas. A Ele seja a glória perpetuamente! Amém.

A minha amada esposa, **Denise Silva Amaral Miranda**, por toda a atenção, orientação, estímulo, paciência e, principalmente, amor espontaneamente liberado.

A minha mãe **Maria Lucineuda**, meu primeiro amor e a quem muito admiro por seu caráter e força. Aos meus avós, **Ana Augusta** e **Raimundo Miranda**, que tanto me ensinaram sobre a vida, obrigado por todas as orações depositadas diante de Deus a meu favor. Aos meus tios **Eudo, Luciano, Ana Miranda, César, Laércio** e **Ezequiel**.

Aos meus sogros, **Aristeu Amaral** e **Marinalva Silva** pela constante oração, incentivo e motivação. Esta vitória também é de vocês.

Ao meu orientador, Professor Dr. **Wilton Pereira da Silva**, pelas cobranças e principalmente pela forma sempre atenciosa de orientar. Certamente estes fatos mudaram, para melhor, minha práxis pedagógica.

A professora Dra. **Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva** por todo o incentivo para que eu pudesse adentrar a este programa de pós-graduação.

A todos os professores da Pós-Graduação em Engenharia de Processos, em especial àqueles que tive o prazer de ter como professor nas disciplinas, adquirindo desta forma conhecimentos que foram de muita valia na construção do presente trabalho (**Wilton Pereira da Silva, Antônio Gilson Barbosa de Lima, Mario Eduardo, Vera Solange de Oliveira Farias, Marcos Gama** e **Alexandre José de Melo Queiroz**).

Aos membros da banca examinadora, por todo empenho, dedicação e contribuições para o aperfeiçoamento deste trabalho: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva, Prof. Dr. Jossyl Amorim R. de Sousa, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva, Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde e Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Morgana Lúgia de Farias Freire.

Aos colegas de Pós-Graduação: **Taciano Pessoa, Daniel Cavalcante, Fabrício Batista, Marciel Medeiros e Juarez Aires** pelas contribuições durante as disciplinas e experimentos.

À **Universidade Federal de Campina Grande – UFCG** por ter me proporcionado esta oportunidade de fazer parte do Programa de Doutorado em Engenharia de Processos e por tudo de bom que este título venha a me proporcionar.

Ao **Instituto Federal do Maranhão de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Maranhão – IFMA**, pela concessão dos laboratórios e compreensão nos momentos em que tive que me ausentar, principalmente, no período das disciplinas.

À **Coordenação Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior– CAPES** pela bolsa concedida.

A todos aqueles, que embora não citados, foram de alguma forma responsáveis pela execução deste trabalho, meu muito obrigado!

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XXI</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XXVIII</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XXXI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XXXII</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objetivo geral.....	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Principais contribuições deste trabalho.....	4
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Aspectos produtivos e mercadológicos.....	5
2.2 Composição nutricional.....	8
2.3 Desidratação osmótica.....	10
2.4 Os agentes osmóticos.....	12
2.5 As variáveis do processo.....	16
2.6 Teoria e modelagem do processo de secagem.....	18
2.6.1 Modelos empíricos e semi-empíricos.....	22
2.6.2 Modelos Difusivos.....	23
2.6.3 Modelos baseados na termodinâmica de processos irreversíveis.....	24
2.7 Fenômenos de transporte.....	25
2.7.1 Equação de transporte.....	27
2.7.2 Equação de difusão.....	28
2.7.3 Métodos analíticos na solução de problemas difusivos.....	28
2.7.4 Métodos numéricos na solução de problemas difusivos.....	31
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
3.1 Matéria-prima.....	33

3.2	Desidratação osmótica.....	34
3.2.1	Perda de água.....	35
3.2.2	Ganho de sólidos.....	36
3.3	Cinética de secagem.....	36
3.4	<i>Softwares</i> utilizados neste trabalho.....	37
3.5	Características físico-químicas.....	38
3.5.1	Teor de água.....	38
3.5.2	Atividade de água.....	38
3.5.3	pH.....	39
3.5.4	Acidez.....	39
3.5.5	Açúcares totais, açúcar redutor e açúcar não-redutor.....	39
3.5.6	Cinzas.....	39
3.5.7	Cor.....	40
3.5.8	Análise estatística.....	40
3.6	Análise sensorial.....	40
3.7	Avaliação instrumental de textura.....	42
3.8	Hipóteses para a obtenção da solução analítica para a equação de difusão.....	43
3.9	Solução analítica da equação de difusão em coordenadas cartesianas utilizando condição de contorno de primeiro tipo.....	44
3.10	Solução analítica da equação de difusão em coordenadas cartesianas utilizando condição de contorno de terceiro tipo.....	47
3.11	Simplificação da solução analítica tridimensional, utilizando as condições de contorno de primeiro tipo.....	52
3.12	Simplificação da solução analítica tridimensional, utilizando as condições de contorno de terceiro tipo.....	53
3.13	Otimizações.....	54
3.13.1	Caso analítico tridimensional com condição de contorno de primeiro tipo.....	55
3.13.2	Caso analítico tridimensional com condição de contorno de terceiro tipo.....	56

<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>57</b>
4.1 Cinética de desidratação osmótica e secagem em estufa utilizando o <i>software Prescribed</i> : Condição de contorno de primeiro tipo .....	59
4.1.1 Quantidade de água das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm .....	59
4.1.2 Quantidade de sólidos das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com aresta de 1,0 cm.....	61
4.1.3 Quantidade de água durante a secagem em estufa .....	63
4.1.3.1 Razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	64
4.1.3.2 Razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 45 °Brix e submetido a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	66
4.1.3.3 Razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	68
4.1.3.4 Razão do teor de água em cubos com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratados em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior na temperatura de 50 °C .....	70
4.2 Cinética de desidratação osmótica e secagem em estufa utilizando o <i>software Convective</i> : Condição de contorno de terceiro tipo.....	72
4.2.1 Quantidade de água das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm .....	72
4.2.2 Quantidade de sólidos das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com aresta de 1,0 cm.....	74
4.2.3 Razão do teor de água durante a secagem em estufa .....	77
4.2.3.1 Razão do teor de água de cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetido a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	77

4.2.3.2 Razão do teor de água de cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 45 °Brix e submetido a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	79
4.2.3.3 Razão do teor de água de cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	80
4.2.3.4 Razão do teor de água de cubos com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratados em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior na temperatura de 50 °C .....	83
4.3 Cinética de desidratação osmótica e secagem em estufa utilizando o algoritmo desenvolvido neste trabalho – Condição de contorno de primeiro tipo .....	85
4.3.1 Simulação da quantidade de água das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm .....	86
4.3.2 Simulação da quantidade de sólidos das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm.....	88
4.3.3 Simulação da quantidade de água durante a secagem em estufa .....	90
4.3.3.1 Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	90
4.3.3.2 Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 45 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	92
4.3.3.3 Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	93
4.3.3.4 Simulação da razão do teor de água de cubos com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratados em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior na temperatura de 50 °C .....	94
4.4 Cinética de desidratação osmótica e secagem em estufa utilizando o algoritmo desenvolvido neste trabalho – Condição de contorno de terceiro tipo .....	97

4.4.1	Simulação da quantidade de água das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm .....	98
4.4.2	Simulação da quantidade de sólidos nas amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm .....	105
4.4.3	Simulação do teor de água durante a secagem em estufa.....	112
4.4.3.1	Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	112
4.4.3.2	Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 45 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	118
4.4.3.3	Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	124
4.4.3.4	Simulação da razão do teor de água de cubos com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratados em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior na temperatura de 50 °C .....	128
4.3	Análise físico-química.....	131
4.3.1	Avaliação físico-química do melão “ <i>in natura</i> ” e desidratado em solução osmótica nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix .....	131
4.3.2	Avaliação físico-química do melão submetido à desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C .....	136
4.4	Avaliação instrumental de textura .....	141
4.5	Análise sensorial.....	142
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>		<b>145</b>
5.1	Conclusões.....	145
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	149

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>151</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>173</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>176</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>178</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>181</b>
<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>186</b>
<b>APÊNDICE F.....</b>	<b>191</b>
<b>APÊNDICE G .....</b>	<b>194</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Fenômenos de transporte de massa durante o processo osmótico.....	10
Figura 2.2 –	Curva de secagem.....	19
Figura 3.1 –	Melão amarelo ( <i>Cucumis melo</i> L).....	34
Figura 3.2 –	Refratômetro Abbe.....	34
Figura 3.3 –	(a) – Balança analítica AW; (b) – Paquímetro universal.....	35
Figura 3.4 –	Sonda utilizada na análise instrumental de textura para avaliação da firmeza.....	43
Figura 3.5 –	Cubo destacando um quarto de plano vertical xy, com z = 0.....	44
Figura 4.1 –	Quantidade de água (percentual) <i>versus</i> tempo (minutos) de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, tratados osmoticamente em solução de sacarose nas concentrações de (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix.....	60
Figura 4.2 –	Quantidade de sólidos (percentual) <i>versus</i> tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, tratados osmoticamente em solução de sacarose nas concentrações de (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix.....	61
Figura 4.3 –	Razão do teor de água (adimensional) <i>versus</i> tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetido a secagem à temperatura de (a) 50, (b) 60 e (c) 70 °C.....	64
Figura 4.4 –	Razão do teor de água (adimensional) <i>versus</i> tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução na concentração de 45 °Brix e submetido a secagem à temperatura de (a) 50 °C, (b) 60 °C e (c) 70 °C.....	66
Figura 4.5 –	Razão do teor de água (adimensional) <i>versus</i> tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução e na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem à temperatura de (a) 50 °C, (b) 60 °C e (c) 70 °C.....	68
Figura 4.6 –	Razão do teor de água (adimensional) <i>versus</i> tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de (a) 1,5 cm, (b) 2,0 cm e (c) 2,5 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem à temperatura de 50 °C.....	70

Figura 4.7 –	Quantidade de água (adimensional) <i>versus</i> tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, tratados osmoticamente em solução nas concentrações de (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix.	73
Figura 4.8 –	Quantidade de sólidos (percentual) <i>versus</i> tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, tratados osmoticamente em solução de sacarose nas concentrações de (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix.....	75
Figura 4.9 –	Razão do teor de água (adimensional) <i>versus</i> tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetido a secagem à temperatura de 50, 60 e 70 °C.....	78
Figura 4.10 –	Razão do teor de água (adimensional) <i>versus</i> tempo (minutos) de cubo de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução de sacarose com 45 °Brix e submetido a secagem à temperatura de 50, 60 e 70 °C.....	79
Figura 4.11 –	Razão do teor de água (adimensional) <i>versus</i> tempo (minutos) de cubo de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução de sacarose com 65 °Brix e submetido a secagem à temperatura de 50, 60 e 70 °C.....	81
Figura 4.12 –	Razão do teor de água (adimensional) <i>versus</i> tempo (minutos) de cubo de melão com arestas de (a) 1,5 cm, (b) 2,0 cm e (c) 2,5 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem à temperatura de 50 °C.....	83
Figura 4.13 –	Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix nos instantes (a) 150 minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	100
Figura 4.14 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix no instante 220 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	101
Figura 4.15 –	Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix nos instantes (a) 150	

	minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	102
Figura 4.16 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix no instante 220 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	103
Figura 4.17 –	Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix nos instantes (a) 150 minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	103
Figura 4.18 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix no instante 220 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	104
Figura 4.19 –	Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix no instante 220 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$	104
Figura 4.20 –	Distribuição do teor de sólidos em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix nos instantes (a) 150 minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o xy com $z = 0,0$ ....	107
Figura 4.21 –	Distribuição do teor de sólidos em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix no instante 220 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	108
Figura 4.22 –	Distribuição do teor de sólidos em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix nos instantes (a) 150 minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	109
Figura 4.23 –	Distribuição do teor de sólidos em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix no instante 220 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	109
Figura 4.24 –	Distribuição do teor de sólidos em amostras tratadas em solução	

	osmótica com concentração de 65 °Brix nos instantes (a) 150 minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	110
Figura 4.25 –	Distribuição do teor de sólidos em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix no instante 220 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	110
Figura 4.26 –	Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	114
Figura 4.27 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	115
Figura 4.28 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	116
Figura 4.29 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	116
Figura 4.30 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	117
Figura 4.31 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução	

	osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	117
Figura 4.32 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	120
Figura 4.33 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	120
Figura 4.34 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	121
Figura 4.35 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	122
Figura 4.36 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	123
Figura 4.37 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em	

	metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	123
Figura 4.38 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	125
Figura 4.39 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	126
Figura 4.40 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	126
Figura 4.41 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	127
Figura 4.42 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com $z = 0,0$ .....	127
Figura 4.43 –	Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a) $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b) $z = 0,3 \times 10^{-2}$ e (c) $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .....	128
Figura 4.44 –	Valores obtidos para a análise de firmeza do melão pré-tratado em	

soluções osmóticas nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e  
submetido a secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C..... 141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Exportações Brasileiras de Frutas.....	7
Tabela 2.2 –	Composição Nutricional em 100 g de polpa de melão amarelo.....	9
Tabela 2.3 –	Desidratação osmótica de Frutas.....	13
Tabela 2.4 –	Modelos empíricos utilizados em cinética de secagem.....	22
Tabela 3.1 –	Algumas raízes da equação característica para vários números de Biot	52
Tabela 4.1 –	Quantidade de água de equilíbrio (bs) e quantidade de sólidos de equilíbrio (percentual) presentes nas amostras com arestas de 1,0 cm tratadas em solução osmótica de 25, 45 e 65 °Brix.....	57
Tabela 4.2 –	Teor de água inicial e de equilíbrio (bs) apresentados pelas amostras com arestas de 1,0 cm tratadas preliminarmente em solução osmótica nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e submetidos a secagem em estufa, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	58
Tabela 4.3 –	Teor de água de equilíbrio (bs) apresentado pelas amostras com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, tratadas preliminarmente em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetidos a secagem em estufa, na temperatura de 50 °C.....	59
Tabela 4.4 –	Valores de difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.....	60
Tabela 4.5 –	Valores de difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante o ganho de sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, 45 °Brix e 65 °Brix.....	62
Tabela 4.6 –	Valores de difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	65
Tabela 4.7 –	Valores de difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e	

	coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 45 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	67
Tabela 4.8 –	Valores de difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução na concentração de 65 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	69
Tabela 4.9 –	Valores de difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.....	71
Tabela 4.10 –	Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.....	73
Tabela 4.11 –	Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante o ganho de sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, em solução de sacarose na concentração de 25, 45 e 65 °Brix..	75
Tabela 4.12 –	Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	78
Tabela 4.13 –	Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de	

	cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 45 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	80
Tabela 4.14 –	Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	81
Tabela 4.15 –	Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.....	84
Tabela 4.16 –	Valores do parâmetro $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.....	86
Tabela 4.17 –	Valores do parâmetro $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) durante o ganho de sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.....	88
Tabela 4.18 –	Valores do parâmetro $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) das amostras desidratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e secagem posterior a 50, 60 e 70 °C.....	91
Tabela 4.19 –	Valores do parâmetro $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) amostras desidratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e secagem posterior a 50, 60 e 70 °C.....	92
Tabela 4.20 –	Valores do parâmetro $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) das amostras desidratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e secagem posterior a 50, 60 e 70 °C.....	93
Tabela 4.21 –	Valores do parâmetro $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-	

	quadrado ( $\chi^2$ ) das amostras com arestas de dimensões de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, desidratada em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e secagem posterior a 50 °C.....	95
Tabela 4.22 –	Valores do parâmetro $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 25 °Brix.....	98
Tabela 4.23 –	Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 45 °Brix.....	99
Tabela 4.24 –	Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 65 °Brix.....	99
Tabela 4.25 –	Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante o ganho de sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose na concentração de 25 °Brix.....	105
Tabela 4.26 –	Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante o ganho de sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose na concentração de 45 °Brix.....	106
Tabela 4.27 –	Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante o ganho de	

	sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose na concentração de 65 °Brix.....	106
Tabela 4.28 –	Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, na temperatura de 50 °C.....	112
Tabela 4.29 –	Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, na temperatura de 60 °C.....	113
Tabela 4.30 –	Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, na temperatura de 70 °C.....	113
Tabela 4.31 –	Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 45 °Brix, na temperatura de 50 °C.....	118
Tabela 4.32 –	Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 45 °Brix, na temperatura de 60 °C.....	119

Tabela 4.33 – Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 45 °Brix, na temperatura de 70 °C.....	119
Tabela 4.34 – Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.....	124
Tabela 4.35 – Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 60 °C.....	124
Tabela 4.36 – Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 70 °C.....	125
Tabela 4.37 – Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,5 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.....	129
Tabela 4.38 – Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em	

	estufa de cubos de melão com arestas de 2,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.....	129
Tabela 4.39 –	Valores dos parâmetros $B_1$ e $C$ , primeira raiz ( $\mu$ ), coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 2,5 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.....	130
Tabela 4.40 –	Valores médios da caracterização físico-química do melão “ <i>in natura</i> ”.....	132
Tabela 4.41 –	Valores médios da caracterização físico-química do melão com arestas de 1,0 cm, submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.....	132
Tabela 4.42 –	Valores médios da caracterização físico-química do melão com arestas de 1,0 cm, submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	137
Tabela 4.43 –	Médias dos fatores Brix e temperatura de secagem para os parâmetros: sabor, aroma, aparência, cor e intenção de compra das amostras de melão, com arestas de 1,0 cm, desidratados em soluções osmóticas nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.....	143

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

$a^*$ – Transição da cor verde para cor vermelha	[-]
$ANR$ – Açúcar não redutor	[kg]
$A_n$ , $A_m$ e $A_k$ – Coeficiente da solução analítica	[-]
$AR$ – Açúcar redutor	[kg]
$AT$ – Açúcar total	[kg]
$A_w$ – Atividade de água	[-]
$b^*$ – Transição da cor azul para cor amarela	[-]
$Bi$ – Número de Biot de transferência de massa	[-]
$B_n$ , $B_m$ e $B_k$ – Coeficientes da solução analítica	[-]
$C$ – Concentração molar	[mol/l]
$c_0$ – Calor específico do meio seco à pressão constante	[kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$C_p$ – Calor específico a pressão constante	[kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$D_{ef}$ – Difusividade efetiva de massa	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$DMS$ – Diferença mínima significativa	[-]
$G_s$ – Incorporação de sólidos no produto desidratado	[Kg]
$h$ – Coeficiente de transferência convectiva de massa	[m s <sup>-1</sup> ]
$h_i$ – Entalpia específica	[J]
$I_i$ – Fonte ou sumidouro de massa devido à transição de fase	[-]
$J_i$ – Vetor fluxo de massa	[kgm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$K$ – Condutividade térmica	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$L$ – Distância do centro geométrico do cubo	[m]
$L_x$ , $L_y$ e $L_z$ – Dimensão linear nos eixo $x$ , $y$ e $z$	[m]
$L^*$ – Luminosidade, transição do branco para o preto	[-]
$m$ – Massa	[kg]
$m_i$ – Massa inicial	[kg]
$m_s$ – Massa de matéria seca	[kg]
$ms_i$ – Massa da matéria seca no tempo inicial	[Kg]

$ms_t$ – Massa da matéria seca no tempo $t$	[kg]
$m_t$ – Massa no tempo $t$	[kg]
$m_{H_2O}$ – Massa de água	[kg]
$n$ – Índice de parâmetro	[-]
$N_p$ – Número de pontos experimentais	[-]
$pH$ – Potencial Hidrogeniônico	[-]
$q$ – Fluxo de calor	[Wm <sup>-2</sup> ]
$R^2$ – Coeficiente de determinação	[-]
$S$ – Termo fonte da equação de difusão	[-]
$T$ – Temperatura	[°C]
$T_i$ – Temperatura inicial	[°C]
$t$ – Tempo de secagem	[s]
$t_i$ – Tempo referente ao $i$ -ésimo ponto experimental	[s]
$t_i^{sim}$ – Tempo referente ao $i$ -ésimo ponto simulado	[s]
$t_i^{exp}$ – Tempo referente ao $i$ -ésimo ponto experimental	[s]
$V$ – Volume	[m <sup>3</sup> ]
$\vec{V}$ – Vetor velocidade do meio	[ms <sup>-2</sup> ]
$X$ – Teor de água numa dada posição (base seca)	[kgkg <sup>-1</sup> ]
$\bar{X}$ – Teor de água médio	[kgkg <sup>-1</sup> ]
$\bar{X}_{eq}$ – Teor de água de equilíbrio (base seca)	[kgkg <sup>-1</sup> ]
$\bar{X}_i$ – Teor de água inicial (base seca)	[kgkg <sup>-1</sup> ]
$\bar{X}_{bs}$ – Teor de água médio em base seca	[-]
$\bar{X}_{bu}$ – Teor de água médio em base úmida	[kgkg <sup>-1</sup> ]
$\bar{X}^*$ – Razão de água	[-]
$\bar{X}^{sim}$ – Teor de água simulado	[kgkg <sup>-1</sup> ]
$x, y, z$ – Eixos cartesianos	[-]

### Letras gregas

$\nabla$ .	– Divergente	[-]
$\nabla$	– Gradiente	[-]
$\rho$	– Massa específica	[kgm <sup>-3</sup> ]
$\rho_0$	– Massa específica do meio seco	[kgm <sup>-3</sup> ]
$\lambda$	– Coeficiente de transporte	[-]
$\Phi$	– Variável dependente de transporte	[-]
$\Gamma^\Phi$	– Coeficiente de transporte	[-]
$1/\sigma_i^2$	– Peso estatístico do i-ésimo ponto experimental	[-]
$\sigma$	– Desvio padrão	[-]
$\Phi^{sim}$	– Valor simulado de $\Phi$	[-]
$\Phi^{exp}$	– Valor experimental de $\Phi$	[-]
$\Phi_i^{exp}$	– Valor experimental de $\Phi$ correspondente ao i-ésimo ponto experimental	[-]
$\Phi_i^{sim}$	– Valor simulado de $\Phi$ correspondente ao i-ésimo ponto experimental	[-]
$\chi^2$	– Qui-quadrado	[-]
$\mu_n, \mu_m$ e $\mu_k$	– Raízes da equação característica	[-]

### Subscritos

$bu$	– Base úmida	[-]
$bs$	– Base seca	[-]
$i$	– Inicial	[-]
$eq$	– Equilíbrio	[-]

## RESUMO

Objetivou-se com este trabalho avaliar o processo difusivo na desidratação osmótica, seguida de secagem em estufa, de melão cortado em formato de cubo com ênfase na modelagem matemática, análises físico-química e sensorial do produto obtido. As cinéticas características do processo de desidratação osmótica e da secagem em estufa são descritas por meio de dois modelos matemáticos que usam soluções analíticas da equação de difusão, em coordenadas cartesianas, com condição de contorno de primeiro e terceiro tipo. Às soluções analíticas foram acoplados algoritmos de otimização propostos neste trabalho, escritos na linguagem FORTRAN, que se baseiam na remoção ótima de pontos experimentais, visando-se à determinação dos parâmetros termofísicos para a descrição das cinéticas de absorção de sacarose e de remoção de água do melão. Foram realizados testes comparativos entre os otimizadores desenvolvidos com os resultados obtidos por outros *softwares*, os quais também utilizam as condições de contorno de primeiro (*Prescribed*) e terceiro tipo (*Convective*). Esta comparação possibilitou analisar a capacidade dos otimizadores propostos de encontrar os valores ótimos nos processos de transferência de massa. Adicionalmente, os cubos de melões desidratados foram submetidos à avaliação físico-química, pelas determinações de atividade de água, acidez, pH, açúcares, cinzas, cor e firmeza, bem como, a avaliação sensorial pelos testes de aceitação e intenção de compra. Os dados foram obtidos em experimentos de desidratação osmótica de melão (cortados em pedaços de 10 mm de aresta) usando soluções osmodesidratante com teor de sólidos solúveis totais de 25, 45 e 65 °Brix. A secagem posterior foi realizada em estufa, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Os resultados indicaram que os otimizadores propostos têm capacidade para obter os parâmetros necessários ao estudo proposto neste trabalho. Constatou-se, através dos valores obtidos para o coeficiente de transferência convectiva, número de Biot e indicadores estatísticos que a condição de contorno mais adequada para descrever o processo que rege a transferência de massa é a condição de terceiro tipo. Verificou-se, através da análise sensorial, que a amostra com maior aceitação pelos provadores foi aquela submetida a desidratação osmótica na concentração de 65 °Brix e secagem posterior na temperatura de 50 °C, sendo que as maiores concentrações de sacarose e temperaturas de secagem favoreceram maior remoção da água, todavia as amostras submetidas às maiores temperaturas complementares apresentaram maior escurecimento enzimático. Todas as amostras apresentaram atividades de água dentro dos valores considerados microbiologicamente seguros após a secagem em estufa.

**Palavras-chave:** Equação de difusão, soluções analíticas, coordenadas Cartesianas, algoritmos de otimização.

## ABSTRACT

The present study makes an assessment of the diffusive process used in osmotic dehydration of melon sliced into cubes following kiln-drying based on mathematical modeling, considering the physicochemical and sensory properties of the product. The kinetic features of both osmotic dehydration and kiln-drying are described by means of two mathematical models using the analytical solution of the diffusion equation in conjunction with Cartesian coordinates of the first and third kind boundary conditions. In the present work, optimization algorithms have been correlated to analytical solutions. These algorithms were written in FORTRAN based on the optimum removal of experimental points so as to determine the thermophysical parameters with the purpose of describing the melon solid absorption kinetics and moisture removal. Comparative tests have been conducted between the optimizers implemented for the present study. These were based on the results obtained by other software which also uses contour conditions of the first type (Prescribed) and the third type (Convective). As a result, it was possible to analyze the efficiency of the proposed optimizers to determine the optimal values along mass transfer processes. In addition, the dehydrated melon cubes were submitted to physicochemical evaluation, considering water activity, acidity, pH, sugars, ash, color and firmness. They were also submitted to sensory evaluation as determined by the acceptance tests and purchase intention. The data were obtained via experiments conducted on the osmotic dehydration of melons (cut into pieces of 10 mm) using osmodesidratant solutions with total soluble solid contents of 25, 45 and 65 °Brix. The drying was done in an oven at temperatures of 50, 60 and 70 °C. Results demonstrated that the proposed optimizers can provide the necessary parameters for the study proposed in the present work. It has been verified, considering the values obtained for the convective transfer coefficient, Biot number and for the statistical indicators that the most adequate contour condition to describe the process governing mass transfer is that of the third kind condition. The sensorial analysis has also revealed that the sample with the greater acceptance by the testers was the one that underwent osmotic dehydration at a 65 °Brix concentration and subsequent drying at a temperature of 50 °C, considering as well that higher concentrations of sucrose and drying temperatures favored better water removal. However, the samples submitted to higher complementary temperatures displayed greater enzymatic browning. All samples have exhibited, after oven drying, water activities within values considered microbiologically safer.

**Keywords:** Diffusion equation, analytical solutions, Cartesian coordinates, optimization algorithms.

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

A produção mundial de frutas é de 800 milhões de toneladas/ano, sendo os maiores produtores a China, a Índia e o Brasil, com produção de 227,5; 72,5 e 41 milhões de toneladas/ano, respectivamente (ABF, 2016).

Por se tratar de um produto perecível, uma parcela significativa da produção de frutas é perdida no Brasil, principalmente devido ao clima quente do país, à falta de técnicas de processamento mais eficazes para prolongar o tempo de preservação e conservação, ao manuseio inadequado na colheita e na pós-colheita e ao despreparo dos profissionais do ramo da agroindústria (RODRIGUES, 2013). Segundo dados apresentados pelo ABF (2016), estima-se que as perdas em decorrência de todos os fatores citados chegam a, aproximadamente, 21% da produção. Sendo assim, a necessidade de reduzir essas perdas justifica a utilização de processos capazes de conservar tais produtos por um período maior.

Em se tratando do fruto do meloeiro, este desponta como uma das frutas que mais tem gerado divisas no país, sendo responsável por 26% da receita gerada por exportação brasileira de frutas no ano de 2015 (ABF, 2016). Enquanto que em 2014 a exportação de melão ficou em torno de 196,8 mil toneladas, perfazendo um total de US\$ 151,8 milhões, em 2015 a produção saltou para 223,7 mil toneladas e um total de, aproximadamente, US\$ 154,3 milhões, representando um incremento de 13,6% na produção e 1,63% no aporte financeiro (ABF, 2016).

Dantas et al. (2011), avaliando a vida útil pós-colheita de frutos de híbridos de melão em um período de 28 dias, verificou perdas médias de 25% de massa, o que acarreta sérios efeitos sobre as propriedades físicas, nutricionais, fisiológicas e de aparência do produto. Ocorreu uma diminuição de 61% da firmeza da polpa facilitando, assim, o aparecimento de injúrias mecânicas, decréscimo de 54,3 e 67,5% da aparência interna e externa respectivamente, o que tornou muitos exemplares impróprios para o mercado consumidor.

O aproveitamento pode ser viabilizado através da utilização de técnicas de preservação que mantenham ao máximo as propriedades organolépticas e os componentes nutricionais. Uma das alternativas para reduzir as perdas pós-colheitas é a industrialização, principalmente no pico da safra, quando os alimentos alcançam menores preços pelo excesso de oferta (ANDRADE et al., 2003). Assim sendo, uma alternativa tecnológica para o processamento de frutas que possibilita a obtenção de produtos levemente transformados é a técnica de desidratação osmótica (GARCIA-NOGUERA et al., 2012; MONDHE et al., 2013; MORENO et al., 2013; SILVA et. al., 2013a; MIRANDA, 2014). Essa técnica pode ser utilizada em alguns casos como uma etapa de pré-tratamento, sendo seguida por processos complementares como secagem com ar quente ou congelamento, liofilização e micro-ondas, dentre outros (BÓRQUEZ et al., 2010; NIKBAKHT et al., 2014; PERUSSELLO et al., 2014; MIRANDA, 2014). Tal técnica também pode ser usada como tratamento principal, no caso de desidratação de maçã, manga, abacaxi, banana prata e goiaba (ROSAS-MENDOZA et al., 2011; MAVROUDISE et. al., 2012; PORCIUNCULA, et al., 2013; GANJLOO et al., 2014).

Uma vez que as mudanças físicas, químicas e biológicas provocadas pelas altas temperaturas empregadas nos secadores ocorrerão com menor frequência, a desidratação osmótica favorece a obtenção de produtos com qualidade sensorial e nutricional superior à qualidade de produtos desidratados unicamente com secagem convectiva. Outro fator importante em favor do uso do método é o baixo custo, por não envolver altos consumos de energia, o que é necessário na secagem convectiva, devido a mudança de fase da água (WANG et al., 2010; MORENO et al., 2013; KETATA et al., 2013; ZOU et al., 2013; SILVA et al., 2014a; PERUSSELLO et al., 2014).

Neste contexto, o presente trabalho visa colocar à disposição dos interessados subsídios teóricos para viabilizar a aplicação de soluções analíticas da equação de difusão para descrever o processo de desidratação osmótica de frutos cortados na forma de cubos, comparando os resultados obtidos pressupondo as condições de contorno de primeiro e terceiro tipo para o processo. Tais soluções serão aplicadas na descrição da penetração de

sacarose no produto bem como na remoção de água envolvendo a determinação de parâmetros termofísicos relativos à remoção e à penetração, a partir de dados experimentais.

Uma das principais contribuições deste trabalho é o desenvolvimento de otimizadores mais rápidos que os disponíveis atualmente e que forneçamos parâmetros do processo com bons valores para os indicadores estatísticos, qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), tais otimizadores são acoplados as soluções analíticas da equação de difusão para frutas cortadas em formato de cubos.

### 1.1 Objetivo geral

Realizar experimentos para estudar a cinética de desidratação osmótica e secagem de melão (*Cucumis melo* L.) do tipo amarelo, na forma de cubo, e desenvolver ferramentas analíticas para descrever os processos de difusão de massas inerentes. Ainda foram realizadas análises físico-química e sensoriais do produto obtido, que pode ser consumido como lanches.

### 1.2 Objetivos específicos

- Realizar experimentos sobre a cinética de desidratação osmótica de cubos de melão com aresta de 1,0 cm em solução de sacarose a 25, 45 e 65 °Brix, também sobre a cinética de secagem posterior dos cubos de melões em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C;
- Usar otimizadores, *Prescribed* e *Convective*, visando à determinação dos valores dos parâmetros termofísicos inerentes aos fenômenos de difusão de massa que ocorrem durante a desidratação osmótica e secagem posterior;
- Avaliar as características físico-químicas do melão “*in natura*”, após a desidratação osmótica e após a secagem, tais como: teor de água, atividade de água, pH, acidez, açúcar total, açúcar redutor, açúcar não-redutor, cinzas, cor e analisar a textura do melão desidratado através do teste de avaliação firmeza;
- Realizar a análise sensorial pelos testes de intenção de compra e aceitação avaliando os atributos aparência, cor, aroma e sabor;

- Analisar a cinética de secagem de cubos de melão com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm utilizando a melhor condição experimental determinada através da análise sensorial;
- Propor algoritmos de otimização mais rápidos do que os existentes, a ser acoplado às soluções analíticas, visando à determinação dos parâmetros termofísicos, obtidos a partir de dados experimentais das cinéticas de absorção de sacarose e de remoção de água do melão;
- Predizer a distribuição de sacarose e de água no interior do produto estudado, em instantes previamente estipulados, bem como as suas respectivas cinéticas, utilizando-se de modelos matemáticos a serem desenvolvidos;
- Comparar os resultados das simulações analíticas com os resultados experimentais, e determinar os coeficientes de transferência de massa: difusivo no interior e convectiva na superfície do produto, para as condições experimentais estudadas, tanto para a absorção de sacarose quanto para a remoção de água;
- Estudar os efeitos dos tratamentos adotados nos modelos sobre os coeficientes de transporte;
- Utilizar os modelos matemáticos desenvolvidos para descrever, também, a secagem convencional complementar realizada no produto estudado.

### 1.3 Principais contribuições deste trabalho

- Apresentar estudos sobre a caracterização físico-química do melão cortado em formato de cubo, antes e após a desidratação osmótica;
- Disponibilizar algoritmos de otimização a serem acoplados às soluções analíticas tridimensionais da equação de difusão, com condições de contorno do primeiro e terceiro tipos, para um cubo. Desta forma, pode-se determinar a difusividade aparente e o coeficiente de transferência convectiva. O algoritmo apresentado utilizará uma técnica ainda não aplicada para geometria cúbica denominada OREP (*optimal removal of experimental points*), e que apresenta resultados em tempo expressivamente menores que qualquer outra técnica conhecida.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aspectos produtivos e mercadológicos

O meloeiro é a espécie que possui a maior variabilidade fenotípica no gênero *Cucumis* (BATES e ROBSON, 1995). A maior parte da variação é observada em seus frutos. O meloeiro tem frutos com formas que variam de esféricos a extremamente alongado, com peso de poucas gramas a vários quilogramas, sabor da polpa de amargo a doce e diferentes colorações de polpa e casca (STEPANSKY et al., 1999).

Com relação à origem do meloeiro, a maioria dos autores considera que a forma selvagem ancestral do meloeiro é originária da África (WHITAKER e DAVIS, 1962; ASHURMETOV, 1995). Conforme comentam Mallick e Massui (1986), a literatura aponta centros primários e secundários do melão. Os diferentes centros citados foram a Índia, a Arábia Saudita e a China.

Dentre as diversas variedades de melão, os mais comercializados no Brasil são: Amarelo, Honeydew, Pele de sapo, Cantaloupe, Gália e Charentais. Esses tipos de híbridos podem ser cruzados entre si e, na verdade, existe uma continuidade entre eles (APEX-BRASIL, 2014).

O meloeiro é uma herbácea, trepadeira ou rasteira, com ramos laterais, podendo atingir até 3 m de comprimento. Apresenta sistema radicular fasciculado, com crescimento abundante nos primeiros 30 cm de profundidade do solo (ARAÚJO, 1980).

Nas Américas, o melão foi introduzido por intermédio de Cristóvão Colombo e, a partir dessa época, passou a ser consumido pelos índios, sendo rapidamente espalhado por todo o continente (COSTA e PINTO, 1977). No Brasil, a introdução foi feita pelos imigrantes europeus e o estado do Rio Grande do Sul foi, possivelmente, o seu primeiro centro de cultivo no país (COSTA e SILVA, 2003).

Em se tratando de exportação a União Européia (UE), principalmente os países baixos, continuam sendo a principal via de comércio de frutas frescas e processadas produzidas no Brasil. Em 2015, quase 80% do total embarcado (735 mil toneladas) foi exportado para UE, conforme a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (ABF, 2016). Sendo que uma maior participação da fruta brasileira no mercado internacional depende da ampliação da capacidade de produção de frutas com qualidade e sustentabilidade por parte dos produtores, bem como, desenvolvimento de técnicas que diminuam os desperdícios (ABF, 2016).

O campeão de vendas no ano de 2015, em termos quantitativos, como se pode observar na Tabela 2.1, que traz valores relativos a exportação brasileira de frutas, o melão apresentou incremento de 13,66% na quantidade, em relação ao ano anterior, chegando a, aproximadamente, 223,7 mil toneladas, ou 26% do total das exportações. Sendo responsável, junto com a manga, por mais de 50% das exportações de frutas brasileiras em 2015.

Os pólos de Mossoró e Açu, do Baixo Jaguaribe e do Médio São Francisco, são os principais produtores de melão do País (PIEIDADE, 2015). A produção de melão destina-se parte ao mercado local, constituído pelos municípios que estão situados próximos aos pólos de produção, sendo os frutos comercializados a granel e apresentando qualidade inferior, parte para o mercado regional que corresponde à região onde o pólo de produção está assentado. Neste mercado, os frutos também são comercializados a granel e com qualidade inferior, embora existam na região nichos de mercado que exigem um produto de maior qualidade. Outra parcela do melão produzido é direcionada ao mercado nacional, representado, principalmente, por grandes centros consumidores da região Centro-Sul do país (São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília) (EMBRAPA, 2012).

Tais centros de consumo estão se organizando cada vez mais nos moldes dos grandes mercados internacionais de produtos hortifrutícolas, que exigem frutos encaixados e de alta qualidade. Parte substancial do melão produzido tem como destino o mercado externo, que é o principal consumidor deste fruto produzido no Brasil. O melão é considerado a fruta brasileira ‘mais típica’ de exportação, pelo fato de destinar maior percentual de sua produção

ao mercado externo, chegando, em algumas safras, a ultrapassar os 40% do volume comercializado, ao passo que a maioria das outras frutas não ultrapassa os 5% (PIEIDADE, 2015).

Tabela 2.1 – Exportações Brasileiras de Frutas

FRUTA	2014		2015	
	Receita (US\$)	Quantidade (kg)	Receita (US\$)	Quantidade (kg)
<b>Manga</b>	163.727.732	133.033.240	184.342.375	156.337.273
<b>Melão</b>	151.817.079	196.850.024	154.298.760	223.746.193
<b>Castanhas</b>	132.749.046	25.899.791	153.329.793	35.174.957
<b>Limão</b>	96.099.286	92.301.008	78.600.751	96.631.634
<b>Uva</b>	66.835.277	28.368.960	72.349.100	34.398.467
<b>Mamão</b>	47.058.855	33.668.192	43.675.555	39.798.647
<b>Maça</b>	31.932.489	44.298.296	40.656.854	60.113.141
<b>Melancia</b>	16.490.896	30.682.363	27.059.394	54.953.858
<b>Banana</b>	31.750.237	83.944.504	24.916.992	80.905.478
<b>Laranja</b>	9.014.409	20.111.176	8.904.160	23.520.326
<b>Figo</b>	8.740.156	1.347.557	6.941.450	1.365.097
<b>Abacate</b>	9.537.147	5.806.712	6.561.137	4.628.345
<b>Pêssego</b>	4.704.486	3.333.896	2.162.072	1.770.908
<b>Abacaxi</b>	1.228.615	1.447.140	1.331.874	1.822.917
<b>Coco</b>	717.388	1.027.757	726.297	1.176.689
<b>Caqui</b>	769.710	257.044	658.373	291.335
<b>Tangerina</b>	19.644	43.350	519.169	525.300
<b>Goiaba</b>	443.961	170.776	498.963	203.936
<b>Morango</b>	218.083	28.913	319.258	37.244
<b>Outras Frutas</b>	20.959.870	6.156.573	20.709.874	7.320.096

Fonte: ABF (2016)

A nível mundial, a tendência, tanto do consumo como do comércio do melão, é de excepcional crescimento. Na década de 1970, o crescimento mundial do consumo de melão foi de 3,0%; na década de 1980, de 4,1% na década de 1990 de 4,8% e na primeira década de 2000 crescimento de 4,3%. Esse crescimento acelerado indica que os mercados não estão ainda consolidados e recebem novos consumidores (EMBRAPA, 2012).

A Europa, principal mercado importador do Brasil, mostra aumento em suas importações de melão desde a década de 1980, quando cresceu anualmente a uma taxa de 8,2%. Esse crescimento acelerou para 10,7% ao ano na década de 1990 e 14% na década de 2000 a 2010. É importante afirmar que a principal causa do aumento do consumo do melão pela Europa decorre do fato de este produto, estar passando da fase de produto de consumo de temporada para um produto de consumo contínuo, visto que o crescimento está ocorrendo, principalmente, no outono e no inverno quando, tradicionalmente, é baixo o consumo deste fruto (EMBRAPA, 2012).

O maior produtor mundial é a China, responsável por cerca de 51,0% da produção mundial, sendo também o país que apresenta a maior superfície cultivada. Outros países como a Turquia, Irã, Estados Unidos, Espanha e Índia se destacam entre os maiores produtores mundiais de melão. Entre os países que apresentam as maiores produtividades por área plantada sobressaem-se Marrocos e Espanha com produtividade média de 29,6 t/ha e 30,3 t/ha, respectivamente, seguidos do México, China e Estados Unidos da América. Na América do Sul o Brasil ocupa o primeiro lugar em produção e produtividade de melão, seguido da Venezuela, Argentina e Chile (EMBRAPA, 2012).

### **2.2 Composição nutricional**

Os benefícios do consumo de melão, em termos nutricionais, são o suprimento total das exigências de vitamina C, além de ser fonte significativa de outros nutrientes como açúcar, fibras, cálcio, iodo e fitoquímicos (EMBRAPA, 2012). O melão é especialmente rico em elementos minerais, em particular potássio, sódio e fósforo. Já o valor energético é relativamente baixo, 20 a 62 kcal/100g de polpa, e a porção comestível representa 55 % do fruto. O fruto é consumido *in natura*, como ingrediente de saladas com frutas ou outras hortaliças, e na forma de suco.

Na Tabela 2.2 têm-se os dados relativos aos valores de vitaminas, água, proteínas, gorduras, carboidratos e minerais em 100 g de melão amarelo.

Tabela 2.2 – Composição Nutricional em 100 g de polpa de melão amarelo.

<b>Composição</b>	<b>Unidades</b>	<b>Conteúdo</b>
Água	g	83
Calorias	Kcal	62
Proteínas	g	0,60
Gorduras	g	0,10
Carboidratos	g	15,7
Fibras	g	0,30
Vitamina C	g	16
Tiamina	mg	0,03
Riboflavina	mg	0,02
Niacina	mg	0,50
Cálcio	mg	10
Fósforo	mg	12
Sódio	mg	9
Magnésio	mg	13,1
Potássio	mg	188
Ferro	mg	0,30

Fonte: Robinson e Decker-Walters (1997)

### 2.3 Desidratação osmótica

Também conhecida como desidratação por imersão-impregnação, a desidratação osmótica caracteriza-se pela imersão de produtos inteiros ou em fatias, sob diferentes geometrias e espessuras, em solução contendo um agente desidratante. Diferentes mecanismos de transporte estão envolvidos no processo de desidratação osmótica, como osmose, difusão, mecanismos hidrodinâmicos, penetração e outros fenômenos específicos (LENART e PIOTROWSKI, 2001). De acordo com Lenart (1996), três tipos de transferência de massa são observados durante a imersão do alimento na solução hipertônica: (1) fluxo de água do produto para a solução; (2) transferência de soluto da solução para o produto; (3) saída de soluto do próprio alimento para a solução, conforme tem-se na Figura 2.1.

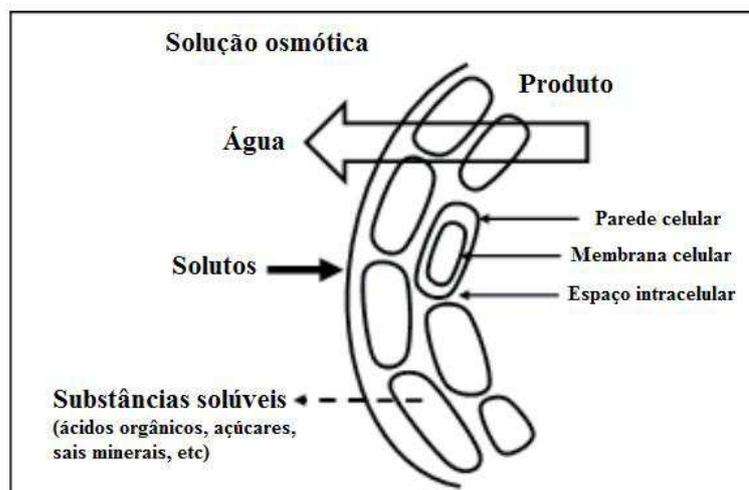


Figura 2.1 – Fenômenos de transporte de massa durante o processo osmótico (Fonte: adaptado de LENART, 1996).

Para Torreggiani (1993) a perda de água é acompanhada por incorporação de sólidos como consequência das trocas difusionais que ocorrem durante o processo, devido aos gradientes de concentração. Ocorre ainda a lixiviação de compostos naturais do alimento, tais como vitaminas, minerais, ácidos orgânicos, açúcares redutores, compostos aromáticos e pigmentos, já que a membrana celular responsável pelo transporte osmótico não é perfeitamente seletiva (GOULA e LAZARIDES, 2012), o que afeta as características sensoriais e nutricionais do produto.

Os pioneiros no trabalho com Desidratação Osmótica em alimentos foram Ponting e seus colaboradores no ano de 1966 (PONTING et al., 1966). Em seguida ocorreu um fluxo

contínuo de publicação (RASTOGI et al., 2002). Estudos foram realizados com os mais variados tipos de frutas e sementes (FARKAS e LAZAR, 1969).

A desidratação osmótica é uma das mais importantes técnicas de tratamento complementar e de preservação de alimentos no processamento de alimentos desidratados, uma vez que apresenta algumas vantagens, tais como a redução dos danos do calor sobre o sabor, cor, inibição do escurecimento enzimático, além de agregar melhoria de qualidade ao produto final. A desidratação osmótica ainda apresenta vantagens financeiras como, diminuição dos custos com gastos energéticos, custo de distribuição e acondicionamento do produto após o tratamento (KHAN, 2012). Neste sentido, a desidratação osmótica desponta como uma alternativa barata, acessível e eficiente para transformação de matérias-primas agroindustriais em produtos de maior valor agregado, e requer menos energia em comparação com os métodos tradicionais de secagem convectiva. Contudo, geralmente, não fornece um produto com teor de água suficientemente baixa para ser considerado estável em prateleira sob temperatura ambiente. Portanto, é frequentemente utilizada como uma etapa anterior a outros processos de desidratação, como liofilização, secagem convectiva, secagem a vácuo, micro-ondas e ainda como tratamento principal (BÓRQUEZ et al., 2010; LEE e LIM, 2011; ROSAS-MENDOZA et al., 2011; MAVROUDISE et al., 2012; GARCIA-NOGUERA et al., 2012; SILVA et al., 2013a; NIMMANPIPUG e THERDTHAI, 2013; ZHENG et al., 2013; TOUIL et al., 2013; PORCIUNCULA et al., 2013; MIRANDA, 2014; PERUSSELLO et al., 2014; SILVA et al., 2014a; GANJLOO et al., 2014).

Dentre as vantagens do processo de desidratação osmótica Yadav e Singh (2012) destacam:

- a) É um processo de remoção de água a baixa temperatura, tendo como consequência, a perda mínima de cor e sabor.
- b) Retenção de sabor acentuado quando açúcar ou xarope de açúcar é utilizado como agente osmótico.
- c) A oxidação enzimática e o escurecimento são impedidos uma vez que os pedaços da fruta são cercados por açúcar, tornando-se, assim, possível manter boa cor, com pouco ou nenhum uso de óxidos de enxofre.
- d) Com a remoção do ácido e a absorção de açúcar por partes dos pedaços de frutas obtém-se um produto mais doce quando comparado ao produto seco convencionalmente.
- e) Remove parcialmente a água e, portanto, reduz a quantidade de água a ser retirada no processo de secagem adicional.

- f) O consumo de energia é muito menor, uma vez que nenhuma mudança de fase está envolvida.
- g) Ele aumenta a densidade, devido a absorção de sólidos, contribuindo para obtenção de um produto com maior qualidade quando liofilizado.
- h) Se o sal é usado como agente osmótico, maior teor de água é permitido no final da secagem, uma vez que a absorção de sal influencia o comportamento de sorção de água do produto.
- i) A qualidade textural do produto é melhor após a reconstituição.
- j) O tempo de armazenamento do produto é muito maior.
- k) O processo pode ser realizado sem a necessidade de sofisticados equipamentos.

O processo de desidratação osmótica envolve, basicamente, três variáveis durante a imersão da fruta na solução desidratante: redução de massa, perda de água e ganho de sólidos pelo produto. A redução da massa corresponde ao percentual de diminuição de massa da amostra em relação à sua massa inicial; a perda de água refere-se à quantidade de água que sai da amostra para cada 100 g de sua massa total inicial; o ganho de sólidos é designado pela massa de sólidos solúveis e insolúveis transportada para o interior do produto em relação à massa inicial da amostra.

#### **2.4 Os agentes osmóticos**

A seleção da solução para tratamento osmótico de frutas e sementes é de grande importância, pois depende desta escolha a força motriz para fluxos simultâneos de água e soluto, bem como as propriedades físicas e sensoriais do produto final (PAN et al., 2003).

Segundo Nahimana et al. (2011), Yadav e Singh (2012), durante a desidratação, a cinética de remoção de água, o ganho de sólidos e o teor de água na condição de equilíbrio são fortemente afetados pelo tipo de agente osmótico, sua concentração, sua massa molecular e seu comportamento iônico.

Na Tabela 2.3 tem-se uma lista de trabalhos com diferentes frutas e agentes desidratantes utilizados no processo de desidratação osmótica.

Tabela 2.3 – Desidratação osmótica de frutas.

<b>FRUTA</b>	<b>Agente osmótico e concentração (% Brix)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Proporção (Massa fruto/ soluto)</b>	<b>Agitação</b>	<b>Tamanho da amostra (mm)</b>	<b>Referências</b>
Uva	Sacarose; 40 e 50	30 e 50	-	-	-	Ponting (1973)
Pêssego	Sacarose; 65 e 80%	49	4	-	-	Ponting (1973)
Damasco	Xarope de milho; 81	49	4	Sim	-	Ponting (1973)
Caju	Sacarose / Xarope de milho; 40 e 60	30 e 35	-	-	-	Azoubel e Murr (2004)
Mamão	Sacarose; 40	-	1:60	-	-	García et al. (2010)
Goiaba	Sacarose; 40, 50 e 60	40 e 50	1:45	Sim	25 (diâmetro) 5 (espessura)	Corrêa et al. (2010)
Maça Fuji	Sacarose; 50 Cloreto de sódio; 10	27	-	-	-	Monnerat et al. (2010)
Romã	Sacarose; 55	40, 50 e 60	-	-	-	Bchir et al. (2010)
Abóbora	Sacarose e Cloreto de sódio	27	-	-	-	Mayor et al. (2011)
Castanha	Cloreto de Sódio; 22	45, 55 e 65	-	-	-	Moreira et al. (2011)
Kiwi	Sacarose; 61	25, 35 e 45	1:4	Sim	10 (espessura)	Panarese et al. (2012)
Abacaxi	Sacarose; 55	40	-	-	20 (diâmetro) 10 (espessura)	Botha et al. (2012)

Acerola	Sacarose; 65	27	1:4, 1:10 e 1:15	-	-	Silva et al. (2012a)
Tomate cereja	Sacarose e Cloreto de sódio	30	1:4	Sim	30 (diâmetro)	Li et al. (2012)
Maça	Glicose; 22 e 38 Maltose; 37 e 51	20	1:20	Sim	30 (diâmetro) 6 (espessura)	Nieto et al. (2013)
Morango	Sacarose; 40	30	1:4	-	10 (espessura)	Nuñez-Mancilla et al. (2013)
Mirtilo	Sacarose; 60	40	1:40	-	-	Ketata et al. (2013)
Polpa de melão	Xarope de milho; 34, 66 Sacarose; 29, 57	25 e 45	1:10	Sim	-	Barbosa et al. (2013)
Banana	Sacarose; 30 e 70	30 e 70	1:5	Sim	30 (diâmetro) 5 (espessura)	Verma et al. (2013)
Coco	Sacarose; 35	40	1:20	Sim	61,3 x 101,2 x 306,5	Silva et al. (2014a)
Manga	Sacarose; 30, 45 e 60 Maltose; 30, 45 e 60 Glicose; 30, 45 e 60	30	1:5	-	20 x 20 x 20	Zhao et al. (2014)
Pitaya	Sacarose; 55	27	1:15	Sim	3 (espessura) x 30 (diâmetro)	Ayala-Ponte et al. (2014)
Pêra	Sacarose; 45 e 60	25	1:5	Não	5 (espessura)	Ribeiro et al. (2016)

Os açúcares são as substâncias mais utilizadas para o tratamento osmótico de frutas e o cloreto de sódio tem sido relatado como agente osmótico mais apropriado para vegetais (CONTRERAS e SMYRL, 1981; AZOUBEL e MURR, 2004).

Zhao et al. (2014) estudaram o efeito da desidratação osmótica sobre atributos de cor, vitamina C, pH, perda de água e ganho de solutos, em cubos de manga desidratados em soluções osmóticas de sacarose, glicose e maltose, com concentrações de 30, 45 e 60 °Brix. De acordo com os dados, as amostras que apresentaram melhores valores para cor, vitamina C e pH foram aquelas tratadas em solução osmótica de maltose com concentração de 45 °Brix. As soluções de glicose a 60 e 45 °Brix contribuíram com maior perda de água e ganho de sólidos, fato que está relacionado ao baixo peso molecular da glicose, uma vez que soluções de baixo peso molecular tem uma maior pressão osmótica correspondente, o que pode aumentar a remoção de água do interior do fruto (TAIWO et al., 2003).

Silva et al. (2014b) investigaram os efeitos da utilização de sacarose combinado com lactato de cálcio sobre a cinética de desidratação osmótica e difusividade de cada componente em abacaxi cortado em fatias de 1,0 cm de espessura. A desidratação foi realizada utilizando soluções de sacarose com 40 e 50 °Brix sem adição de lactato de cálcio e com adição de 2,0 ou 4,0 % de lactato de cálcio. O tempo de desidratação foi de 1,0; 2,0; 4,0 e 6,0 horas. Apenas depois de 2,0 horas de desidratação osmótica, as frutas apresentaram teores mais elevados de cálcio, com a vantagem da quantidade de sacarose ser menor quando comparado com as amostras tratadas em solução sem cálcio. Segundo os autores a difusividade da sacarose diminui com a adição do cálcio à solução osmótica, com relação às características organolépticas não notou-se nenhuma alteração entre abacaxis tratados com e sem a adição de cálcio.

Mercali et al. (2011) avaliaram a desidratação osmótica de bananas cortadas em pedaços cilíndricos de 1,8 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento utilizando, como agentes osmóticos, sacarose e cloreto de sódio em proporções diversas; concluíram que a difusividade efetiva da sacarose foi menor para amostras em que o cloreto de sódio estava presente em maior concentração. Por outro lado, os coeficientes de difusão efetiva do cloreto de sódio foram menores nas amostras com concentrações de sacarose maiores, indicando que existe um caráter interativo dos solutos de sal e açúcar na desidratação osmótica de bananas.

Núñez–Mancilla et al. (2013) estudaram os efeitos da desidratação osmótica em condições de pressão hidrostática elevada sobre os compostos fenólicos, cor e vitamina C de

morangos durante o armazenamento. As amostras foram pressurizadas a 100, 200, 300, 400 e 500 MPa durante 10 minutos em solução osmótica de 40 °Brix. Verificou-se que o conteúdo fenólico apresentou valores máximos no tratamento sob pressão de 400 MPa. Já para o conteúdo de vitamina C as amostras sob pressão de 200, 400 e 500 MPa mantiveram o teor inicial (retenção de 98%). No entanto, os níveis de vitamina C em amostras tratadas a 100 e 300 MPa foram significativamente mais baixos quando comparados com frutas frescas. Mudanças de coordenadas cromáticas foram observadas devido ao aumento da pressão, o escurecimento não enzimático foi mais pronunciado para a pressão de 200 MPa. Segundo os autores é recomendável trabalhar à pressão de 400 MPa por um período de 10 minutos para obter morangos processados com elevados níveis nutricionais e antioxidantes.

Abraão et al. (2013) estudaram a influência da temperatura e concentração do xarope no processo de desidratação osmótica de pedaços de abóboras cortados em formato cilíndrico com dimensões de 30 cm de comprimento e 10,6 cm de diâmetro. As amostras foram submetidas a tratamento osmótico nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C e soluções de sacarose com 40, 50 e 60 °Brix. Foi observado aumento significativo da difusividade efetiva da água e diminuição da difusividade efetiva de sacarose, quando comparados aos resultados das amostras submetidas à solução de sacarose de 40 e 50 °Brix, fato este não verificado para soluções de 50 e 60 °Brix. Verificou-se ainda que o percentual de água diminui de modo inverso ao aumento da temperatura enquanto que o ganho de sólidos e sacarose aumentam com o aumento da temperatura. Sunjka e Raghavan (2004) relataram a utilização de xarope de frutose de milho para desidratação osmótica de uvas, uma vez que produziu perda máxima de água e ganho de sólidos quando comparado com a sacarose.

### **2.5 As variáveis do processo**

São vários os fatores que interferem nos fenômenos de transferência de massa entre o produto e o meio osmótico. Tais fatores estão associados, principalmente, com a natureza da matéria-prima, condições operacionais, espécie vegetal utilizada, grau de maturação, forma e tamanho do alimento a ser desidratado. Outros fatores que merecem destaque são os operacionais, como tempo de imersão, temperatura da solução, agitação, tipo/concentração da solução, proporção fruto/soluto e utilização ou não de pré-tratamento (NUÑEZ-MANCILLA

et al., 2013; MORENO et al., 2013; KETATA et al., 2013; SOURAKI et al., 2014; SILVA et al., 2014a; NOWACKA et al., 2014).

Alam e Islam (2013) em experimento de desidratação osmótica de fatias de cebola utilizando sacarose e sal, em diferentes proporções, observaram que o tempo e concentração foram os fatores que mais afetaram o ganho de sólidos, perda de água e teor de sólidos na fatia de cebola desidratada. Segundo Nahimana et al. (2011) e Yadav e Singh (2012), quanto maior o tempo do contato do alimento com a solução desidratante, maior a perda de água. Porém, existe um limite para o conteúdo final de água no alimento, sendo este o seu valor de equilíbrio com a solução osmótica.

A temperatura da desidratação osmótica tem uma importante influência na cinética, bem como na qualidade do produto final. O aumento da temperatura faz com que ocorra maior remoção de água, entretanto, Panadés et al. (2006), desidratando goiabas constataram que a temperatura de 50 °C promoveu maiores perdas de água pelo efeito osmótico. Porém, essas perdas podem gerar a obstrução dos poros da fruta, o que dificulta a entrada de solutos por difusão. Isso explica por que os maiores ganhos de soluto ocorreram a 40 °C.

Devic et al. (2010) também obtiveram aumento da perda de água para diferentes cultivares de maçãs com o incremento da temperatura da solução osmótica de 45 para 60 °C na concentração de 60 °Brix. Experimentos realizados com mirtilo a temperaturas de 30, 40 e 50 °C e diferentes concentrações de sacarose apresentaram maiores perdas de água para temperaturas mais elevadas (MERCALI et al., 2010a). De acordo com Khoyi e Hesari (2007) esse comportamento é explicado por duas razões, decorrentes do aumento da temperatura: diminuição da viscosidade da solução osmótica e aumento da difusividade mássica efetiva no fruto. Outro fator importante na cinética de transferência da massa durante a desidratação osmótica de alimentos é a pressão operacional. Estudos mostram que esta técnica pode manifestar algumas características que poderiam conduzir a vantagens importantes em sua aplicação industrial, principalmente no que diz respeito a atividade de água, pH e acidez (NUÑEZ-MANCILLA et al., 2013).

A desidratação osmótica pode também ser realizada com agitação, fator que desempenha importante papel no processo, por torná-lo mais rápido. Eler et al. (2009), estudaram a desidratação osmótica de fatias de maçã verde, em soluções de sacarose a 40 °Brix, nas temperaturas de 30 e 40 °C, sem agitação e com agitação de 60 e 120 rpm, verificaram que a cinética da desidratação osmótica foi fortemente influenciada pela agitação

do meio. Agitações variando de 60 a 150 rpm ao longo do processo tem sido utilizado para desidratação osmótica de melão (ARGANDOÑA et al., 2002; LIMA et al., 2004; FERRARI et al., 2005; FERNANDES et al., 2008) a fim de evitar a ocorrência de uma região de baixa concentração da solução osmótica ao redor da fruta, o que resultaria numa diminuição da taxa de transferência de massa.

Outro fator que merece atenção é a concentração da solução desidratante no processo osmótico, influenciando significativamente o processo de difusão do soluto nas frutas e nas mudanças ocorridas no valor nutritivo e propriedades sensoriais do produto. Torres et al. (2007) avaliaram o efeito de diferentes concentrações de solução osmótica (30; 45; 55 e 65 °Brix) durante o processo de desidratação osmótica de manga em fatias a 30 °C, com e sem tratamento prévio com vácuo pulsante, visando a obtenção de produtos com 20 e 30 °Brix de concentração de sólidos solúveis totais. Os resultados demonstraram que o aumento da perda de água foi proporcional ao aumento da concentração da solução osmótica, enquanto que o ganho de sólidos foi inversamente proporcional para ambos os tratamentos (com e sem aplicação de vácuo). Quanto à taxa de transferência de massa, o aumento da concentração da solução osmótica inferiu na redução do tempo necessário para resultar em produtos com 20 e 30 °Brix. A proporção fruto/xarope é citado por alguns pesquisadores como outro fator relevante no processo de desidratação osmótica. Em trabalho realizado por Silva et al. (2012a) com desidratação osmótica de acerola durante um período de 12 horas em solução de 65 °Brix, sob temperatura de 27 °C, sem agitação e usando as proporções de massa fruto/xarope de 1:4, 1:10 e 1:15, verificou-se que a relação solução de 1:10, é a melhor configuração estudada, uma vez que esta proporção garante a constância da concentração da solução em todo o processo osmótico e como consequência o maior valor de difusividade efetiva.

### **2.6 Teoria e modelagem do processo de secagem**

São vários os métodos empregados no processo de secagem de alimentos e de uma maneira geral podem ser classificados como natural e artificial. Na secagem natural o processamento do produto acontece no próprio campo de cultivo, ou em um terreiro. O ar que seca o produto é proveniente dos ventos e a energia utilizada emana do sol (RATHORE e PANWAR, 2011; EL-SEBAII e SHALABY, 2013; MENNOUCHE et al., 2014; SALLAM et

al., 2015). Este método de secagem tem baixo custo para a sua implementação e não necessita de mão de obra especializada, no entanto é dependente das condições climáticas.

Existe um farto número de métodos de secagem artificiais descritos na literatura (HOLOWATY et al., 2012; EL-SEBAII e SHALABY, 2013; MENNOUCHE et al., 2014; PATIL et al., 2014; NADIAN et al., 2014; SEVIK, 2014). Uma das técnicas mais utilizadas na secagem de produtos agrícolas é a secagem por ar quente. São dois os fenômenos que ocorrem simultaneamente quando um sólido úmido é submetido à secagem convectiva:

- Transferência de energia (calor): O calor é transferido para a superfície do produto e da superfície para o interior do meio. A resistência à transferência de calor na superfície é representada pelo coeficiente convectivo de calor, e a resistência à condução do calor para o interior do meio, pela condutividade térmica do produto.
- Transferência de massa (água): Dois aspectos importantes devem ser considerados: o transporte da água no interior do sólido a ser seco até a superfície e a remoção do vapor a partir da mesma, o qual é removido por meio de um fluido secante externo, que é geralmente o ar de secagem. A resistência para a evaporação da água depende do coeficiente de transferência convectiva de massa e da difusão no interior do produto (MELLADO, 2007; ATEEQUE et al., 2014).

A cinética de secagem de produtos biológicos não é uniforme, devendo ser avaliada conforme o período de secagem considerado, os quais podem ser vistos na Figura 2.2.

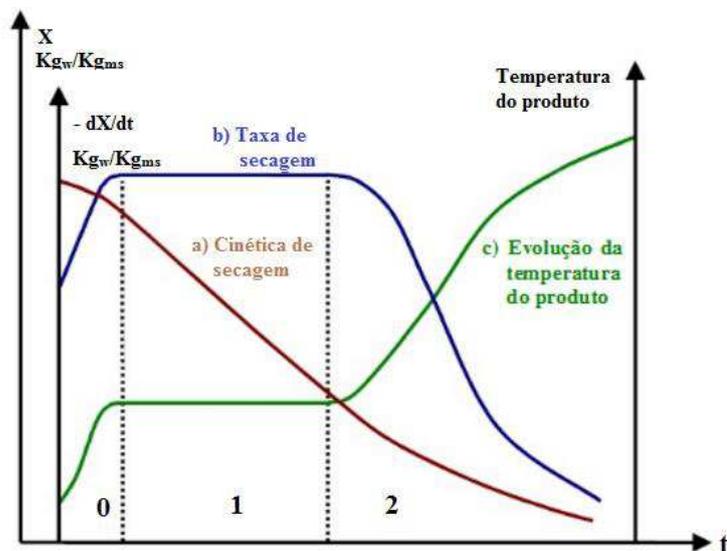


Figura 2.2 – Curva de secagem (PARK et al., 2007)

A evolução dessas transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos:

período inicial, período em taxa constante e período em taxa decrescente de secagem (OLIVEIRA, 2006).

Para Park et al. (2001) a curva (a) representa a taxa de secagem do produto, variação do conteúdo de água do produto por tempo,  $dX/dt$  em relação à evolução do tempo (t), ou seja, a curva é obtida diferenciando-se a curva (a).

A curva (b) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, conteúdo de água do produto em base seca (X), em relação à evolução do tempo de secagem (t), isto é, a curva é obtida pesando-se o produto durante a secagem em determinada condição de secagem.

A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto (T) em relação à evolução do tempo t), isto é, é a curva obtida medindo-se a temperatura do produto durante a secagem.

No início do processo, o produto geralmente está a uma temperatura menor que a do ar, e a pressão parcial de vapor d'água na superfície é baixa, e, por este motivo, a transferência de massa e a velocidade da secagem também são baixas. O calor, sendo transferido em grande quantidade, acarreta uma elevação da temperatura do produto, causando um aumento de pressão e da velocidade da secagem. O tempo de duração deste período é pequeno em relação ao período total da secagem.

No período de secagem à taxa constante, a quantidade de água presente dentro do produto é abundante e por este motivo a taxa de evaporação é alta. A pressão de vapor d'água na superfície é constante e igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A temperatura do produto é também constante e igual à temperatura de bulbo úmido, isso decorre do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente (KAJIYAMA e PARK, 2008). Segundo Silva C (2010), o término do período de taxa constante corresponde ao instante em que a migração interna de água para a superfície não consegue mais compensar a taxa de evaporação da água livre da mesma.

Para frutas e hortaliças, o tempo de taxa decrescente é particularmente importante. Nesta fase as partes externas do material já estão secas, enquanto o interior ainda contém quantidades significativas de água, e nesse caso a transferência interna da água é responsável pela taxa de secagem (NICOLETI, 2005). É nesse período que a troca de calor é mais compensada e, como consequência, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Em decorrência da queda de pressão parcial de vapor de

água na superfície do produto ocorre a redução da taxa de secagem. Ao final deste período o produto encontra-se em equilíbrio com o ar de secagem e a velocidade de secagem é nula (KAJIYAMA e PARK, 2008).

Para fundamentação das teorias existente sobre secagem as condições sobre como a água é transportada no interior do sólido é de fundamental importância. O fenômeno de migração da água no interior do produto biológico ainda não é bem conhecido. Há autores que afirmam que a migração pode ser uma combinação de movimentos da água por difusão de líquido e de vapor, cada um predominando em determinadas etapas da secagem. Dentre as diversas teorias que constam na literatura, as mais relevantes são aquelas que buscam explicitar os fenômenos físicos internos que governam o período de taxa decrescente de secagem. Os seguintes mecanismos de transferência de água em sólidos têm sido propostos na literatura (SILVA C, 2010):

- Transferência por difusão líquida devido gradientes de concentração de água;
- Transferência por difusão de vapor devido a gradientes de concentração de água e de pressão parcial do vapor;
- Transferência de vapor por termodifusão em virtude do gradiente de temperatura;
- Transferência de líquidos por forças capilares.

Por várias décadas o desenvolvimento de modelagens matemáticas que descrevem o processo de secagem tem sido objeto de vários estudos. No intuito de correlacionar dados experimentais da secagem de cada material particular a um modelo, apresentam-se diversos modelos que representam a cinética de secagem de cada produto em particular. Dentre os vários modelos matemáticos que se propõem a descrever a taxa de perda de água durante o processo de secagem de produtos agrícolas pode-se dividi-los em três grupos (WHITAKER et al., 1969; HENDERSON, 1974; FORTES e OKOS, 1981; OZDEMIR, 1999; PARK, et al., 2007; SILVA et al., 2014c). São eles:

- Modelos empíricos;
- Modelos difusivos;
- Modelos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis.

### 2.6.1 Modelos empíricos e semi-empíricos

Os modelos empíricos consistem em uma correlação direta entre o teor de água e o tempo do processo de secagem (SANDER et al., 2003), enquanto que os modelos semi-empíricos têm como base a hipótese da validade da lei de Newton do resfriamento, na qual é assumido que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de água do material e seu respectivo teor de água de equilíbrio, para as condições de secagem específicas (PARK et al., 2007; PARK, 2008; BOERI e SILVA, 2011).

Vários pesquisadores optam por métodos empíricos de determinação de cinética de secagem quando a descrição dos fenômenos originam equações matemáticas complexas ou se verifica a falta de dados sobre condutividade térmica e difusividade mássica (PARK, 2008; BOERI e SILVA, 2011; BARATI e ESFAHANI, 2014). Modelos empíricos são importantes não só para descrever a remoção de água da camada fina, mas também para descrever a penetração de calor durante essa remoção (SILVA et al., 2014c).

Na Tabela 2.4 tem-se alguns modelos empíricos utilizados na cinética de secagem.

Tabela 2.4 – Modelos empíricos utilizados em cinética de secagem

Nome do Modelo	Equação	Referências
Lewis	$\bar{X}^* = \exp(-kt)$	Kaleta e Górnicki (2010)
Page	$\bar{X}^* = \exp(-kt^n)$	Liu et al. (2009)
Page Modificado	$\bar{X}^* = \exp[-(kt)^n]$	Akpınar e Bicer (2008)
Henderson e Pabis	$\bar{X}^* = a \exp(-kt)$	Doymaz (2012)
Logarítmico	$\bar{X}^* = a \exp(-kt) + c$	Shahhoseini et al. (2013)
Dois Termos	$\bar{X}^* = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Corrêa et al. (2010)
Peleg	$\bar{X}^* = 1 - t / (k_1 + k_2t)$	Mercali et al. (2010b)
Silva et alii	$\bar{X}^* = \exp(-at - b\sqrt{t})$	Silva et al. (2012b)

Na Tabela 2.4 foi definido o termo  $\bar{X}^* = (\bar{X} - X_{eq}) / (X_i - X_{eq})$ , e tal termo é chamado de razão de água médio. Os parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  e  $n$  são as constantes a serem determinadas e  $t$  é a variável temporal.

### 2.6.2 Modelos Difusivos

Nos modelos difusivos considera-se o transporte de massa e calor dentro do produto e consiste em sistemas de equações diferenciais resultantes da aplicação de princípios de conservação de massa, energia, espécie química e modelos de transporte no interior do material a secar.

Os modelos difusivos que descrevem a taxa decrescente de secagem de um sólido consideram, geralmente, como mecanismo principal, a difusão, baseada na segunda Lei de Fick, que expressa o fluxo de massa por unidade de área como sendo proporcional ao gradiente de concentração de água, e realizando um balanço de água no interior do produto, sendo descrita na Equação (2.1).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 \Phi \quad (2.1)$$

em que  $\Phi$  é a variável dependente de interesse,  $t$  é o tempo,  $D_{ef}$  representa a difusividade efetiva de massa. A fim de descrever o processo de secagem de produtos biológicos no período de taxa decrescente, muitos pesquisadores têm utilizado modelos teóricos baseados na segunda lei de Fick.

Crank (1992) apresentou diversas soluções analíticas para a equação de difusão, considerando diferentes condições iniciais e de contorno. Essas soluções aplicam-se aos sólidos de formas geométricas simples (corpos semi-esféricos, placas, cilindros e esferas) e quando a difusividade é constante ou varia linear ou exponencialmente com a concentração de água.

No entanto, a aplicação destes modelos pressupõe um conhecimento prévio das condições e algumas propriedades termofísicas dos produtos a serem submetidos à secagem, bem como, a sua dependência funcional da temperatura e do teor de água neles contidos, o que nem sempre é possível (ROMERO-PEÑA e KIECKBUSCH, 2003).

Os modelos difusivos baseiam-se na teoria da difusão líquida, previamente enunciada, que tem como princípio a existência de um gradiente de concentração de água e tem sido utilizada para determinar a difusividade efetiva, os gradientes de água e curvas de secagem. A utilização preferencial da segunda Lei de Fick é indiscutível quando se estuda o período de taxa de secagem decrescente, em materiais biológicos, devido à concordância obtida com os dados experimentais. Como tal, diferentes soluções, analíticas ou numéricas, da equação de difusividade podem ser obtidas com base nos pressupostos, nas condições iniciais e de fronteira, para várias geometrias do produto (DAUDIN, 1983; BROOKER et al., 1999; GHAZANFARI et al., 2006). Por exemplo, quanto às condições de contorno, deve ser estabelecido se a condição de contorno adequada é a de equilíbrio (HII et al., 2009; SRINIVASAKANNAN e BALASUBRAMANIAN, 2009; TORREZ et al., 2014; GOLMOHAMMADI et al., 2015; JOHANN et al., 2016), ou a convectiva (LEMUS-MONDACA et al., 2013; SILVA et al., 2014d; SILVA et al., 2014f; JOHANN et al., 2016). Outra hipótese que deve ser estabelecida é referente a difusividade efetiva de massa que, em vários trabalhos de pesquisa, é considerado constante (NASCIMENTO et al., 2005; RODRÍGUEZ et al., 2013; MABELLINI et al., 2013).

As equações de modelos difusivos caracterizam, de um modo geral, os fenômenos físicos e são fáceis de resolver se não considerar a complexidade destes, como por exemplo, a dependência da difusividade da água. Caso contrário, a sua resolução exige meios de cálculo complexos, pois devem ser consideradas constantes físicas cujos cálculos são complexos e demorados.

### **2.6.3 Modelos baseados na termodinâmica de processos irreversíveis**

Luikov e Mikhaylov (1965) apresentaram os primeiros trabalhos concernentes à aplicação dos princípios termodinâmicos de processos irreversíveis, assumindo que os fluxos de água devido à difusão de vapor e líquido são devidos, respectivamente, ao gradiente de temperatura e de concentração total de água no interior do sólido. As equações que descrevem este modelo sugerem que o transporte molecular de vapor d'água, ar e líquido, acontecem simultaneamente. Quando mais de uma força propulsora ocorre no sistema, efeitos simultâneos podem surgir. Utilizando-se os princípios da termodinâmica para descrever o

processo, conclui-se que esta combinação de efeitos aparecem nas equações como termos cruzados em relação aos fluxos de calor e massa, conforme Equações 2.2 e 2.3:

$$\rho_{0c} \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla q + \sum_1^2 h_i I_i \quad (2.2)$$

e

$$\rho_{0c} \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla q \cdot J_i + I_i, \quad (2.3)$$

em que  $\rho_0$  é a massa específica do meio seco,  $c$  é o calor específico à pressão constante do meio, definido por:  $c_0 + \sum_1^2 c_1 u_1$ ,  $c_0$  é o calor específico à pressão constante do meio seco,  $c_i$  é o calor específico à pressão constante, para água no estado de vapor ( $i=1$ ) e no estado líquido ( $i=2$ ),  $I_i$  é a fonte ou sumidouro de massa devido à transição de fase,  $h_i$  é a entalpia específica da substância,  $J_i$  é o vetor fluxo de massa,  $q$  é o vetor fluxo de calor,  $T$  é a temperatura,  $t$  é o tempo,  $u_i$  é o teor de água na forma de vapor.

## 2.7 Fenômenos de transporte

Na natureza são, basicamente, três os fenômenos de transporte que podemos observar: quantidade de movimento, energia e massa.

O transporte molecular de quantidade de movimento ocorre, por exemplo, no escoamento de um fluido. Este fenômeno é descrito pela lei de Newton do movimento aplicado aos fluidos.

Existem basicamente três formas para que ocorra a transferência de calor: a radiação, a convecção e a condução. Na radiação o calor é transferido de um corpo para outro através de ondas eletromagnéticas com comprimentos que vão de  $7 \times 10^{-7}$  a  $10^{-3}$  m (NUSSENZVEIG, 2002). Esta faixa do espectro eletromagnético é também conhecida como região do infravermelho e tais ondas possuem a capacidade de se propagar mesmo através do vácuo (TIPLER et al., 2009). A convecção é o tipo de propagação de calor que ocorre prioritariamente nos fluidos e se caracteriza pelo fato de que o calor é transferido pelo

movimento do próprio fluido, que constitui uma corrente de convecção. Um fluido aquecido localmente em geral diminui sua densidade e, por conseguinte tende a subir pelo efeito gravitacional, sendo substituído por fluido mais frio o que gera naturalmente corrente de convecções, mas elas também podem ser produzidas artificialmente, com auxílio de bombas e ventiladores (NUSSENZVEIG, 2002).

A propagação de calor por condução ocorre sem que haja a necessidade de movimento macroscópico por parte das moléculas que compõem o meio. Assim como nos demais casos a transferência de calor na condução ocorre em virtude do gradiente de temperatura na matéria que compõe o sistema. Os átomos ou moléculas que estão na região com temperatura mais elevada encontram-se num estado de maior vibração do que aqueles que estão numa região de temperatura mais baixa. O fenômeno macroscópico observável é um fluxo de calor da região de maior temperatura para de menor temperatura, fazendo com que haja uma elevação da temperatura nessa região até que o equilíbrio térmico seja atingido (NUSSENZVEIG, 2002).

Dos três fenômenos de transporte, a transferência de massa é o principal fenômeno de transporte que ocorre na desidratação osmótica e, por conseguinte, é o que mais nos deteremos.

A transferência de massa pode ser definida como a massa em trânsito, resultado da diferença de concentração de 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 mássica é muito bem exemplificada na indústria de alimentos em operações de desidratação osmótica e secagem com ar quente. Durante a desidratação, por diferença de pressão, água é removida do alimento enquanto que sólidos oriundos da solução são incorporados ao alimento a ser desidratado. Em fenômenos de difusão relacionados com a transformação de alimentos, o gradiente de concentração normalmente é dependente do tempo, e a difusão pode ser mais bem representada pela Segunda Lei de Fick para estado transiente (VARZAKAS et al., 2005).

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. Para uma transferência de massa multidirecional, num sistema cartesiano, a segunda Lei de Fick para o estado transiente é escrita na forma (CRANK, 1992):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (2.4)$$

em que  $t$  é o tempo,  $C$  é a concentração molar de  $A$ ,  $D_{AB}$  é a difusividade mássica de  $A$  em  $B$  e  $x$ ,  $y$  e  $z$  são as coordenadas espaciais do sistema cartesiano.

Soluções 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 (CRANK, 1992).

### 2.7.1 Equação de transporte

A equação de transporte é uma equação diferencial parcial de segunda ordem. Na sua forma mais geral pode ser escrita da seguinte forma (MALISKA, 2004):

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} + \nabla(\lambda\vec{V}\Phi) = \nabla(\Gamma^\Phi\nabla\Phi) + S, \quad (2.5)$$

em que,  $\Phi$  é a variável dependente de interesse,  $\lambda$  e  $\Gamma^\Phi$  são coeficientes de transporte,  $\vec{V}$  é o vetor velocidade do meio e  $S$  é o termo fonte.

O primeiro termo da Equação (2.5) representa a taxa de variação do produto da grandeza de interesse por um coeficiente de transporte  $\lambda$ , dentro de um volume infinitesimal, no instante  $t$ .

O segundo termo do primeiro membro representa o fluxo da grandeza de interesse devido à velocidade do meio. Este é o termo de advecção e, caso o meio onde ocorre o fenômeno de transporte estiver em repouso em relação ao sistema do observador, então  $\vec{V} = 0$ , e o termo de advecção será igual a zero.

O primeiro termo do segundo membro representa a difusão da grandeza em estudo no caso massa e energia.

O último termo da equação, que fornece a taxa de geração no volume infinitesimal, é

conhecido como termo fonte. Dependendo do sistema, pode ter origem química ou física.

### 2.7.2 Equação de difusão

A equação de difusão é um caso particular da equação de transporte, Equação (2.5), quando o termo advectivo é igual a zero, devido ao meio se encontrar em repouso,  $V = 0$ . Obtém-se, então, a equação da difusão, muito usada para descrever o transporte de água em meios porosos (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; MALISKA, 2004):

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla(\Gamma^{\Phi}\nabla\Phi) + S. \quad (2.6)$$

A Equação (2.6) pode ser usada para descrever vários processos difusivos como, por exemplo, resfriamento ou aquecimento, certos tipos de congelamento, absorção de água por produtos e secagem. Pesquisas que utilizam modelos difusivos para o estudo da desidratação osmótica usam principalmente os sistemas de coordenadas cartesianas, cilíndricas ou esféricas. O presente estudo refere-se à desidratação osmótica e à secagem convectiva de melão cortado em forma de cubo. Nesse sentido, para este caso específico, considera-se o termo fonte nulo ( $S = 0$ ) e faz-se, na Equação (2.6),  $\lambda = 1$ ,  $\Gamma^{\Phi} = D_{ef}$  (difusividade efetiva correspondente a massa de água ou a difusividade efetiva de massa de sacarose) e  $\Phi$  a variável de interesse, que para o nosso caso foi a água e a sacarose e o sistema de coordenadas adotado foi o cartesiano.

### 2.7.3 Métodos analíticos na solução de problemas difusivos

A equação de difusão é utilizada na descrição da transferência de calor e de massa em inúmeros trabalhos e uma das formas possíveis de se resolver esta equação é através de métodos analíticos. O uso contínuo de modelos analíticos justifica-se em virtude de várias vantagens práticas, incluindo a implementação mais fácil e menor esforço computacional, bem como a possibilidade de se conhecer a variável de interesse em qualquer ponto do domínio, em qualquer instante de tempo.

Para processos de adsorção e dessorção de calor e massa em produtos agrícolas a equação de difusão pode ser resolvida considerando as condições limite do primeiro e terceiro tipos pressupondo hipóteses simplificadoras (HACIHAFIZOGLU et al., 2008; SILVA et al., 2009; SILVA et al., 2010; SILVA et al., 2012c; SILVA et al., 2012d; SILVA et al., 2014e). Neste caso, as soluções para várias geometrias são dadas por uma série que depende apenas do teor de água inicial (que se assume estar uniforme), do teor de água de equilíbrio e da difusividade efetiva.

Silva et al. (2009) apresentaram um algoritmo de otimização para a determinação da difusividade nos mecanismos de transporte da grandeza em estudo descrito através da equação de difusão com condição de contorno do primeiro tipo ou de Dirichlet. Neste algoritmo, não é necessário informar um intervalo para a pesquisa da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), basicamente o otimizador verifica o domínio da difusividade e encontra o mínimo de uma função objetivo que é função da difusividade efetiva. A fim de verificar a qualidade dos resultados obtidos o otimizador foi acoplado com a solução analítica para a geometria esférica e aplicado para a secagem de feijão-frade usando dados experimentais disponíveis na literatura e a distribuição espacial da unidade dentro do grão. Os indicadores estatísticos relativos à secagem revelaram que os resultados obtidos através do otimizador desenvolvido descreveram de forma satisfatória a cinética de secagem do produto em todas as temperaturas investigadas. O algoritmo citado foi utilizado neste trabalho com a finalidade de comparar os resultados obtidos para a difusividade efetiva e parâmetros estatísticos estando disponibilizado como *software* “*Prescribed - Adsorção e Dessorção*” (SILVA e SILVA, 2009a), podendo ser usado para a solução de problemas de otimização de processos difusivos com condição de contorno do primeiro tipo para várias geometrias.

Silva et al. (2014e) desenvolveram um algoritmo que se baseia na remoção ótima de pontos experimentais a fim de minimizar os erros na determinação da difusividade, no artigo citado o algoritmo foi validado e utilizado para aquecimento de agar gel. Segundo os autores, se a condição de contorno da equação de condução de calor é do primeiro tipo o processo é controlado, pela difusividade de massa. Normalmente, esta propriedade é determinada pelo ajuste da solução analítica com apenas o primeiro termo da série para um conjunto de dados experimentais. Neste caso, o valor obtido para a difusividade efetiva contém erros devido a consideração de apenas um termo e a inclusão dos primeiros pontos experimentais no ajuste ou em virtude da retirada dos primeiros pontos experimentais realizada apenas por inspeção visual. Ao utilizar o algoritmo desenvolvido os resultados dos indicadores estatísticos obtidos,

com exatidão de 0,6 %, levaram os autores a reconhecer que esta abordagem apresenta um excelente desempenho na determinação da difusividade térmica quando a condição de contorno de primeiro tipo é utilizada para descrever o processo.

Um algoritmo para a determinação simultânea da difusividade efetiva e coeficiente de transferência convectiva de massa foi desenvolvido por Silva et al. (2010). O método inverso foi usado para ajustar a solução analítica da equação de difusão considerando a condição de contorno convectiva com dados experimentais da cinética de secagem de camada fina de produtos com forma cilíndrica. Sendo que as 16 primeiras raízes são calculadas para os 452 valores indicados de números de Biot que variam de  $Bi = 0$  (o que corresponde a uma resistência infinita de fluxo de água na superfície) até  $Bi = 200$  (que corresponde praticamente a uma condição de contorno de equilíbrio) e o critério de convergência estipulado para a determinação foi de  $1 \times 10^{-15}$  para um número de Biot estipulado. A função objetivo foi a mesma utilizado para o algoritmo que considera a condição de contorno de primeiro tipo e que originou o *software Prescribed*, entretanto para condição de contorno de terceiro tipo esta função objetivo depende não só no difusividade efetiva, mas também no número de Biot de transferência de massa ou, de modo equivalente, do coeficiente de transferência convectiva de massa. O algoritmo foi aplicado para a cinética de secagem de arroz com casca, usando dados experimentais disponíveis na literatura e os indicadores estatísticos mostraram que a condição de contorno convectiva é mais precisa do que a descrição com condição de contorno do primeiro tipo, comumente encontrada na literatura. O algoritmo citado foi utilizado neste trabalho com a finalidade de comparar os resultado obtidos para a difusividade efetiva, coeficiente de transferência convectiva e parâmetros estatísticos estando disponibilizado como *software “Convective - Adsorção e Dessorção”* (SILVA e SILVA, 2009b), podendo ser usado para a solução de problemas de otimização de processos difusivos com condição de contorno do terceiro tipo para várias geometrias.

Silva et al. (2012d) propuseram um algoritmo para minimizar erros no cálculo do coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ) e da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) durante os processos de arrefecimento, em virtude da utilização de um único termo na equação de difusão, utilizando a condição de contorno de terceiro tipo para um cilindro. Segundo os autores, a fim de conhecer os valores referentes a difusividade térmica e o coeficiente de transferência convectiva, de forma geral, é utilizada a solução analítica da equação de difusão considerando apenas o primeiro termo. Apesar de esta técnica ser comumente utilizada para descrever a cinética de arrefecimento, este processo contém uma falha para números de

Fourier inferior a 0,2 (fator de defasagem). O algoritmo foi validado para várias situações físicas, e aplicada no arrefecimento de pepino. A cinética de refrigeração inteira foi simulada com sucesso (qui-quadrado =  $2,8756 \times 10^{-3}$  e o coeficiente de determinação = 0,9991), incluindo a região responsável pelo fator de defasagem. O artigo mostrou que a remoção de pontos experimentais antes do ajuste para o conjunto de dados experimentais pode minimizar os erros no cálculo de  $h$  e  $D_{ef}$ . Além disso, apresentou-se como um algoritmo eficiente e rápido para determinar o número ótimo de pontos experimentais a serem removido.

### 2.7.4 Métodos numéricos na solução de problemas difusivos

A equação de difusão também pode ser resolvida através de métodos numéricos, sendo bastante ampla sua aplicabilidade e abrangente utilização. Desde situações físicas mais simples, em que as formas geométricas têm alto grau de simetria, como placas planas, esferas, cilindros infinitos e finitos, como para formas geométricas quaisquer, com volume e difusividade térmica aparente variáveis, meios heterogêneos e anisotrópicos (CARMO e LIMA, 2005; SILVA et al., 2008; FARIAS, 2011; SILVA et al., 2015; AIRES et al., 2016).

Aires (2015) realizou estudo com desidratação osmótica de goiaba e de maçã, e secagem convectiva complementar de maçã, através de modelos difusivos, nos quais se admite parâmetros de processos variáveis e considera o encolhimento inerente aos processos, apresentando soluções numéricas das equações de difusão uni e bidimensional, em coordenadas cartesianas, com condição de contorno do terceiro tipo, obtidas usando-se o método de volumes finitos com uma formulação totalmente implícita. O otimizador utilizado foi basicamente o mesmo apresentado por Silva et al. (2013b) e Silva et al. (2013c), sendo que a idéia básica consiste em determinar os valores (ou expressões) ótimos para os parâmetros do processo variando-se um parâmetro de ajuste a cada vez, mantendo-se os demais inalterados, com duas sequências de incrementos, uma mais ‘fina’ do que a outra, até que se consiga minimizar a função objetivo. Foi constatado no trabalho que os modelos difusivos propostos para o estudo da secagem convectiva, sobretudo os bidimensionais, mostraram-se adequados para a simulação e estimativa dos parâmetros do processo relativos a esse experimento. Os parâmetros do processo correspondentes à secagem convectiva foram consistentes, apresentando consonância com a literatura. Atestou-se que o modelo unidimensional superestima tais parâmetros em relação ao modelo bidimensional.

Aires (2016) realizou desidratação osmótica seguida de secagem convectiva de maçãs Gala, cortada em forma de paralelepípedo, com dimensões de 1,0 x 1,0 x 2,0 cm. Na desidratação osmótica a solução foi composta de sacarose e água destilada com concentrações de 40 e 60 °Brix nas temperaturas de 40 e 60 °C. A equação de difusão tridimensional em coordenadas cartesianas foi utilizada na descrição do processo. A solução numérica da referida equação foi obtida através do método dos volumes finitos, com a condição de contorno de primeiro tipo e a formulação totalmente implícita. Foram utilizados dois modelos. O modelo 1 considerou os parâmetros constantes e desconsiderou o encolhimento do produto. O modelo 2, por sua vez, admitiu os parâmetros variáveis e o encolhimento da fruta. Para os parâmetros variáveis, as expressões que representam as dimensões foram obtidas via ajuste de curvas e as funções que representam as difusividades de massa de água e sacarose foram representadas por  $D_a = b.exp(aX^2)$  e  $D_s = b / \cosh(aX^{0.5})$ , onde  $X$  representa as quantidades de água ou sacarose, respectivamente e os parâmetros  $a$  e  $b$ , foram determinados através de otimização. A transferência de massa sofreu influência tanto da temperatura como da concentração do meio osmótico, porém, o efeito da temperatura foi preponderante em relação ao efeito da concentração. A secagem convectiva foi realizada com temperaturas de 40 e 60 °C, o procedimento foi análogo ao adotado na desidratação osmótica. A condição de contorno de terceiro tipo foi considerada mais conveniente. Para o modelo 2, a difusividade foi representada pela função  $D_a = b.exp(aX)$ , na qual  $a$  e  $b$  foram encontrados via processo de otimização. A temperatura foi decisiva na secagem convectiva. Em ambos os processos, o modelo 2 foi considerado mais adequado para representar o fenômeno.

## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Alimentos e Química do Instituto Federal do Maranhão e no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande – PB.

### 3.1 Matéria-prima

Na seleção dos frutos, além do estágio de maturação, foi verificada a integridade desses. Os frutos foram lavados em água potável corrente, para a retirada de excesso de sujidades; em seguida, lavados com detergente neutro com o objetivo de reduzir a flora microbiana. Fez-se o descascamento manual, utilizando-se facas de aço inox, adequadas para o processamento. Os melões foram inicialmente cortados em formato de cubo com todas as arestas congruentes e medindo 1,0 cm a fim de determinar qual amostra apresentaria melhores resultados relativos a análise sensorial. De posse dos resultados apresentados através da análise sensorial, novos experimentos foram realizados com pedaços de frutos nas dimensões 1,5; 2,0 e 2,5 cm.

Utilizou-se, para a realização desta pesquisa, o melão amarelo (*Cucumis melo* L.) com estágio de maturação maduro, os quais foram adquiridos no mercado local de Açailândia – MA, conforme Figura 3.1.



Figura 3.1 – Melão amarelo (*Cucumis melo* L).

### 3.2 Desidratação osmótica

Os xaropes osmóticos foram preparados com açúcar cristalizado granulado e água, até atingir os teores de sólido solúvel desejado (25, 45 e 65 °Brix).

A determinação dos sólidos solúveis totais foi realizada através de leitura direta com um refratômetro do tipo Abbe, Figura 3.2, colocando-se uma gota da solução no prisma e fazendo a leitura direta em °Brix.



Figura 3.2 – Refratômetro Abbe.

A quantidade de solução foi estipulada para manter a proporção fruto/solução de 1:4. Os frutos foram imersos nas soluções de sacarose (25, 45 e 65 °Brix), mantidos em

temperatura ambiente, de aproximadamente 30 °C e agitação manual durante todo o processo de desidratação osmótica. Conforme reportado por Khin et al. (2006) as temperaturas moderadas podem melhorar a retenção de cor e sabor do produto, fornecendo degradação térmica mínima de nutrientes.

Acompanhou-se a perda de água, ganho de sólidos e as dimensões das arestas em intervalos de tempo 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 210, 330, 420, 690, 870, 1050, 1230, 1440 minutos, até atingir o equilíbrio da massa.

Os valores obtidos nas determinações analíticas foram utilizados para calcular os percentuais de perda de água e ganho de sólidos pelos cubos de melão. As massas das amostras foram verificadas utilizando-se balança analítica A<sub>W</sub> conforme Figura 3.3 (a) e as dimensões foram verificadas utilizando-se um paquímetro universal da marca Digimess conforme Figura 3.3 (b).



Figura 3.3: (a) – Balança analítica A<sub>W</sub>; (b) – Paquímetro universal.

### 3.2.1 Perda de água

Para o acompanhamento da perda de água do fruto durante o tratamento osmótico uma quantidade de amostra foi posta em uma cesta (contendo 4 cubos), a qual foi retirada da

solução nos intervalos acima citados para a realização das pesagens em balança analítica, em seguida, os cubos de melão eram colocadas novamente na cesta e o processo osmótico tinha sequência, antes de cada pesagem enxugou-se os cubos em papel toalha para remoção do excesso de solução na superfície das amostras.

A perda percentual de água, com base na massa inicial dos cubos, é definida por:

$$P_A = \frac{(m_i \bar{X}_i) - (m_t \bar{X}_{eq})}{m_i} \times 100, \quad (3.1)$$

em que  $P_A$  é a perda de água,  $m_i$  é a massa inicial da amostra,  $\bar{X}_i$  é o teor de água no tempo  $t = 0$ ,  $m_t$  é a massa da amostra no tempo  $t$  e  $\bar{X}_{eq}$  é o teor de água de equilíbrio.

### 3.2.2 Ganho de sólidos

O ganho de sólidos foi acompanhado determinando-se a matéria seca nos mesmos intervalos de tempo com que se realizava a perda de água e massa. Três cubos de melão de cada solução foram retirados para a determinação da matéria seca por meio do método padrão, utilizando-se estufa a  $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ , por 24 horas, de acordo com as normas estabelecidas pelo IAL - Instituto Adolfo Lutz (2008). O ganho percentual de sólidos (com base na massa inicial dos cubos de melão) foi definido por:

$$G_s = \frac{(ms_t - ms_i)}{m_i} \times 100, \quad (3.2)$$

em que,  $G_s$  é o ganho de sólidos do produto desidratado,  $ms_t$  é a massa da matéria seca no tempo  $t$ ,  $ms_i$  é a massa da matéria seca no tempo inicial.

### 3.3 Cinética de secagem

Após a desidratação osmótica os cubos de melão com arestas de 1,0 cm foram colocadas em estufa com circulação de ar para realização de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Durante a cinética de secagem, fez-se leitura da perda de água e das dimensões das arestas dos cubos até que o teor de água de equilíbrio fosse atingido, sendo esse momento o tempo final da secagem.

Determinou-se o teor de água médio inicial e final das amostras, por meio do método padrão, utilizando-se as Equações (3.3) e (3.4).

$$\bar{X}_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{ms} \quad (3.3)$$

e

$$\bar{X}_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{ms + m_{H_2O}}, \quad (3.4)$$

em que  $\bar{X}_{bs}$  é o teor de água médio em base seca,  $\bar{X}_{bu}$  é o teor de água médio em base úmida,  $m_{H_2O}$  é a massa de água e  $ms$  a massa de matéria seca.

### 3.4 Softwares utilizados neste trabalho

Para análise dos dados de desidratação osmótica e secagem utilizou-se os *softwares* “*shareware*” disponíveis na internet e elencados a seguir:

- 1) O *software* “*Prescribed Adsorption - Desorption*”, v. 2.2 (SILVA e SILVA, 2009a), simula a cinética de migração de massa em produtos usando a solução analítica da equação de difusão empregando a condição de contorno de primeiro tipo.
- 2) O *software* “*Convective Adsorption - Desorption*”, v. 2.5 (SILVA e SILVA, 2009b), simula a cinética de migração de massa em produtos usando a solução analítica da equação de difusão empregando condição de contorno de terceiro tipo.
- 3) O *software* “*LAB Fit Curve Fitting*”, v. 7.2.46 (SILVA e SILVA, 2009c) para tratamento e análises de dados experimentais. Usando o LAB Fit, é possível: tratar dados similares; tratar dados não-similares; determinar propagação de erros; traçar gráficos 2D e 3D; executar cálculos (sistema de equações, raízes de funções, equações diferenciais ordinárias, etc.); extrair dados (x, y) de um gráfico 2D (digitalização); ajuste de curvas (regressão não linear – método dos mínimos quadráticos, algoritmo de Levenberg-Marquardt,

quase 500 funções da biblioteca, com uma e duas variáveis independentes, achar funções, opções que deixam você escrever sua própria função com cerca de 150 caracteres, 6 variáveis independentes e 10 parâmetros).

4) O software “*Contour Plots*” (SILVA W, 2010), que possibilita analisar visualmente a evolução temporal da distribuição espacial do transporte da grandeza  $\Phi$  em uma malha bidimensional no domínio físico.

Os softwares *Prescribed* e *Convective* foram utilizados a fim de determinar o coeficiente de transferência convectiva, a difusividade efetiva, indicadores estatísticos e gráficos referentes as cinéticas de desidratação osmótica e secagem em estufa das amostras. Nestes softwares, os otimizadores apresentados são acoplados às soluções analíticas referentes ao cubo.

### 3.5 Características físico-químicas

Realizou-se, nos cubos de melão “*in natura*”, após o processo de desidratação osmótica e secagem, a caracterização físico-química quanto aos parâmetros: teor de água, atividade de água, pH, acidez total titulável, açúcar total, açúcar redutor, açúcar não-redutor, cinzas e cor.

#### 3.5.1 Teor de água

Determinou-se o teor de água das amostras pelo método gravimétrico, conforme descrito pelo IAL (2008), no qual aproximadamente 5 g da amostra foram levados à estufa a 105 °C, até peso constante. Os resultados foram expressos em percentagem.

#### 3.5.2 Atividade de água

A determinação da atividade de água foi realizada com o auxílio do equipamento Aqualab CX-2T, Decagon a 25 °C.

### **3.5.3 pH**

A determinação do potencial hidrogeniônico (pH) foi realizada através de leitura direta, em um phmetro previamente calibrado com soluções tampão de pH 7,0 e 4,0, segundo a metodologia do IAL (2008). Os resultados são expressos em unidades de pH.

### **3.5.4 Acidez**

Conforme a metodologia descrita no IAL (2008), a análise da acidez total titulável foi determinada pela titulação da amostra com solução 0,1 N de hidróxido de sódio utilizando-se, como indicador para verificação do ponto de viragem a solução alcoólica a 1% de fenolftaleína, cujos resultados foram expressos em percentagem.

### **3.5.5 Açúcares totais, açúcar redutor e açúcar não-redutor**

Os açúcares totais, redutores e não redutores foram determinados em triplicata, de acordo com as metodologias descritas no manual do IAL (2008), o qual consiste da redução do cobre presente na solução de Fehling através de açúcares invertidos. O conteúdo de açúcar presente na amostra foi obtido pelo volume de solução de açúcar necessário para reduzir completamente a solução de Fehling de volume conhecido. Os resultados dos açúcares totais e redutores foram expressos em % de glicose e os açúcares não redutores, em % sacarose.

### **3.5.6 Cinzas**

As cinzas ou minerais foram determinadas por incineração, seguindo a metodologia do IAL (2008). Determinou-se a perda de massa do material seco submetido a aquecimento em mufla a temperatura de 550°C, até massa constante. Os resultados foram expressos em percentagem.

### 3.5.7 Cor

A cor foi determinada por leitura direta na amostra utilizando-se espectrofotômetro Mini Scan Hunter Lab XE Plus, com sistema de cor Cielab. O instrumento, equipado com iluminante D65/10° foi calibrado com placa preta e placa branca padrão ( $X = 80,5$ ;  $Y = 85,3$ ;  $Z = 90,0$ ), conforme instruções do fabricante. Os parâmetros determinados foram:  $L^*$  que representa a luminosidade, transição do branco (0) para o preto (100);  $a^*$  que representa a transição da cor verde ( $-a^*$ ) para a cor vermelha ( $+a^*$ ); e  $b^*$  a transição da cor azul ( $-b^*$ ) para a cor amarela ( $+b^*$ ).

### 3.5.8 Análise estatística

Os dados das análises físico-químicas foram interpretados por meio da análise de variância (ANOVA), de acordo com o delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições para cada etapa do processo de desidratação osmótica e secagem. As médias dos tratamentos foram comparadas aplicando-se o teste de Tukey, utilizando-se o programa computacional ASSISTAT versão 7.7 BETA (SILVA e AZEVEDO, 2010).

## 3.6 Análise sensorial

A análise sensorial foi realizada no IFMA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Maranhão) em Açailândia. Avaliaram-se os atributos sabor, aroma, aparência, cor e intenção de compra dos cubos de melão desidratados com arestas de 1,0 cm.

Realizou-se a avaliação sensorial dos cubos de melão desidratados osmoticamente a 25, 45 e 65 °Brix, seguida de secagem em estufa com circulação de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. O painel sensorial foi composto de 40 julgadores treinados do sexo masculino e feminino, com faixa etária média de 22 anos, recrutados entre alunos do IFMA que receberam esclarecimento de como deviam proceder em suas avaliações, de acordo com o formulário de avaliação a seguir.

FORMULÁRIO DE AVALIAÇÃO

Amostra: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_\_

Nome: \_\_\_\_\_ sexo: M ( ) F ( ) Idade: \_\_\_\_\_

Por favor, avalie a amostra servida utilizando a escala abaixo e indique o quanto você gostou do produto

**SABOR**

( ) 5 – Gostei muito

( ) 4 – Gostei

( ) 3 – Não gostei/Nem desgostei

( ) 2 – Desgostei

( ) 1 – Desgostei muito

**AROMA**

( ) 5 – Gostei muito

( ) 4 – Gostei

( ) 3 – Não gostei/Nem desgostei

( ) 2 – Desgostei

( ) 1 – Desgostei muito

**APARÊNCIA**

( ) 5 – Gostei muito

( ) 4 – Gostei

( ) 3 – Não gostei/Nem desgostei

( ) 2 – Desgostei

( ) 1 – Desgostei muito

**COR**

( ) 5 – Gostei muito

( ) 4 – Gostei

( ) 3 – Não gostei/Nem desgostei

( ) 2 – Desgostei

( ) 1 – Desgostei muito

INTENÇÃO DE COMPRA

Avalie a amostra e indique o parecer de 1 a 5 que melhor define sua intenção de compra com relação ao produto

( ) 5 – certamente compraria

( ) 2 – provavelmente não compraria

( ) 4 – provavelmente compraria

( ) 1 – Certamente não compraria

( ) 3 – talvez comprasse/talvez não comprasse

Comentários: \_\_\_\_\_

As amostras foram codificadas com algarismos de três dígitos escolhidos aleatoriamente, e apresentadas aos provadores juntamente com água, biscoito água e sal e o formulário de avaliação. Os provadores foram informados a fazer uma pausa entre uma análise e outra, servindo-se desses dois produtos no sentido de minimizar os efeitos do sabor residual deixado na boca pela amostra anteriormente, segundo MINIM (2006).

Os julgadores analisaram as amostras pelo teste de Aceitação e intenção de compra. Para o teste de aceitação, utilizou-se uma escala estruturada de 1 a 5 em que: 1 – Desgostei muito; 2 – Desgostei; 3 – Não gostei/Nem desgostei; 4 – Gostei e 5 – Gostei muito e para o teste de intenção de compra foi utilizado-se a escala: 1 – Certamente não compraria; 2 – provavelmente não compraria; 3 – talvez comprasse/talvez não comprasse; 4 – provavelmente compraria e 5 – certamente compraria.

Para a análise dos resultados dos testes sensoriais, utilizou-se o programa ASSISTAT com o qual realizou pelo teste de Tukey a comparação de médias através da ANOVA, (SILVA F et al., 2011).

Com a amostra que apresentou maior aceitação e intenção de compra, cubos desidratados em solução osmótica de 65 °Brix e temperatura de secagem de 50 °C, foram realizados novos experimentos utilizando a mesma concentração de sacarose e temperatura de secagem, variando as dimensões das arestas dos cubos para 1,5; 2,0 e 2,5 cm. Nessas condições foi analisada a perda de água, ganho de sólidos e variação das dimensões nas cinéticas de desidratação osmótica e secagem.

### **3.7 Avaliação instrumental de textura**

Utilizou-se a sonda probe P/36R para medir a força suficiente para comprimir 80 % da amostra. Ele é formado por uma sonda cilíndrica de 36 mm de diâmetro. As amostras foram fixadas sobre a base do equipamento; em seguida, aplicou-se uma força perpendicular através da sonda cilíndrica, na superfície das amostras.

A análise de textura para os cubos de melão desidratados foi realizada empregando-se um texturômetro TAXT plus (Stable Micro Systems). Os valores obtidos são referentes à máxima força aplicada sobre a amostra, dada em Newton (N). A sonda utilizada para avaliação instrumental de textura é mostrados na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Sonda utilizada na análise instrumental de textura para avaliação da firmeza.

### 3.8 Hipóteses para a obtenção da solução analítica para a equação de difusão

Para resolver a equação da difusão definiu-se as condições iniciais e de contorno e estabeleceu-se algumas hipóteses:

- O mecanismo de transporte de água no interior do sólido é somente difusão;
- A distribuição das propriedades no início do processo são uniformes;
- As dimensões do sólido não variam durante a difusão;
- O coeficiente de transferência convectiva de massa é constante durante a difusão;
- Condição de contorno convectiva na superfície do sólido;
- A difusividade efetiva não varia durante a difusão;
- O sólido é considerado homogêneo e isotrópico;
- Existe simetria em torno do centro do sólido;
- Não há fonte geradora no interior do produto.

Várias soluções analíticas, considerando as hipóteses acima, podem ser obtidas para diversas geometrias através de separação de variáveis. As soluções para um cubo, com condições de contorno do primeiro e do terceiro tipo, serão apresentadas a seguir.

### 3.9 Solução analítica da equação de difusão em coordenadas cartesianas utilizando condição de contorno de primeiro tipo

Para a geometria do cubo, a equação de difusão em coordenadas cartesianas, com base na Equação (2.6), pressupondo as hipóteses estabelecidas, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z} \right) + S, \quad (3.5)$$

em que,  $\Phi$  é a variável dependente de interesse no processo difusivo,  $\lambda$  e  $\Gamma^\Phi$  são os parâmetros do processo e  $S$  é o termo fonte.

O domínio da variável dependente  $t$  são os reais positivos,  $t \geq 0$  e o domínio das variáveis  $x$ ,  $y$  e  $z$  representam as distâncias do centro geométrico do cubo a uma face qualquer, sendo delimitado por  $L/2$  ( $0 \leq L \leq L/2$ ) conforme Figura (3.5).

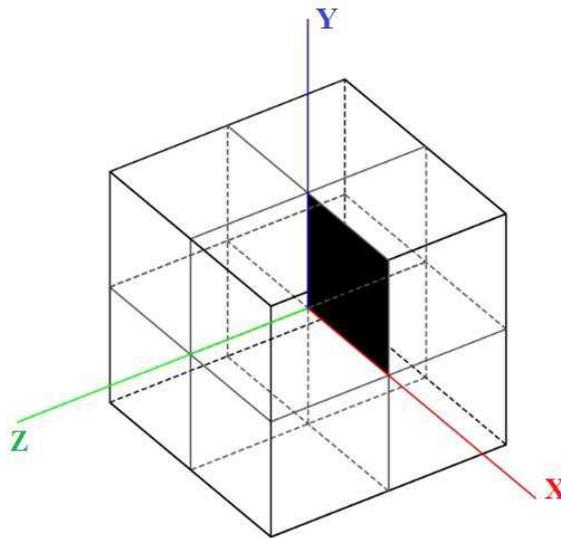


Figura 3.5 – Cubo destacando um quarto de plano vertical xy, com  $z = 0$ .

Considerando-se que a amostra encontra-se com o centro geométrico na origem do sistema de eixos cartesianos, com coordenadas  $(0, 0, 0)$ , e que a difusão e a distribuição das propriedades estudadas sejam simétricas, a condição de contorno refletem isso ao exigir que não haja gradiente de água através do centro da amostra, conforme sistema de Equações (3.6):

$$\begin{aligned}\frac{\partial\Phi(0, y, z, t)}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial\Phi(x, 0, z, t)}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial\Phi(x, y, 0, t)}{\partial z} &= 0.\end{aligned}\tag{3.6}$$

A condição de contorno na superfície é modelada considerando que não haverá resistência de transferência de água, conforme descrito através do sistema de Equações (3.7):

$$\begin{aligned}\Phi(x, y, z, t)\Big|_{x=\pm L_x/2} &= \Phi_{eq}, \\ \Phi(x, y, z, t)\Big|_{y=\pm L_y/2} &= \Phi_{eq}, \\ \Phi(x, y, z, t)\Big|_{z=\pm L_z/2} &= \Phi_{eq}.\end{aligned}\tag{3.7}$$

Nas Equações (3.7);  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$  são os comprimentos das arestas de um paralelepípedo e, para este caso do cubo,  $L_x = L_y = L_z$ .

Estas condições implicam que o teor de água na superfície está sempre em equilíbrio  $\Phi_{eq}$  nas condições de operação correspondentes.

Foram especificadas, então, as condições de contorno do primeiro tipo para um problema de difusão. A solução tridimensional da Equação (3.5) para descrever um processo de desidratação osmótica e secagem posterior, para esta condição de contorno, em coordenadas cartesianas, é dada por (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992):

$$\begin{aligned}\Phi(x, y, z, t) &= \Phi_{eq} - (\Phi_{eq} - \Phi_0) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n A_m A_k \cos\left(\mu \frac{x}{L_x/2}\right) \times \cos\left(\mu \frac{y}{L_y/2}\right) \times \\ &\times \cos\left(\mu \frac{z}{L_z/2}\right) \exp\left[-\left(\frac{\mu_n^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_m^2}{(L_y/2)^2} + \frac{\mu_k^2}{(L_z/2)^2}\right) \Gamma^{\Phi} t\right],\end{aligned}\tag{3.8}$$

em que  $\Phi(x, y, z, t)$  representa o valor da grandeza  $\Phi$ , na posição definida pelas coordenadas

$x$ ,  $y$  e  $z$  no instante  $t$ ,  $\Phi_{eq}$  é o teor de equilíbrio de  $\Phi$ ,  $\Phi_0$  é valor da grandeza no instante inicial,  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$  representam a dimensão linear nos eixo  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. Os parâmetros  $m$ ,  $n$  e  $k$  por sua vez, representam inteiros positivos, e as expressões para  $A_n$ ,  $A_m$  e  $A_k$ , (coeficientes da solução analítica dependente da posição para condição de contorno de primeiro tipo) são dados por:

$$\begin{aligned} A_n &= (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n}, \\ A_m &= (-1)^{m+1} \frac{2}{\mu_m}, \\ A_k &= (-1)^{k+1} \frac{2}{\mu_k}, \end{aligned} \tag{3.9}$$

em que:  $\mu_n$ ,  $\mu_m$  e  $\mu_k$  (raízes da equação característica para condição de contorno de primeiro tipo) são obtidas através do conjunto de equação a seguir:

$$\begin{aligned} \mu_n &= (2n-1) \frac{\pi}{2}, \\ \mu_m &= (2m-1) \frac{\pi}{2}, \\ \mu_k &= (2k-1) \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \tag{3.10}$$

No entanto, em algumas circunstâncias, é imprescindível conhecer o valor da grandeza objeto de estudo no sólido inteiro, durante o processo. Nestes casos, a expressão do valor médio no tempo  $t$  é dado por:

$$\bar{\Phi}^*(t) = \frac{1}{V} \int \Phi(x, y, z, t) dV, \tag{3.11}$$

em que  $V$  é o volume do cubo, sendo que a integração é realizada em todo o domínio, resultando em:

$$\bar{\Phi}^*(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_n B_m B_k \exp \left[ - \left( \frac{\mu_n^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_m^2}{(L_y/2)^2} + \frac{\mu_k^2}{(L_z/2)^2} \right) \Gamma \Phi t \right], \quad (3.12)$$

em que  $\bar{\Phi}^*(t) = (\bar{\Phi} - \Phi_{eq}) / (\Phi_0 - \Phi_{eq})$  e  $B_n, B_m$  e  $B_k$  são os coeficientes da solução analítica para o teor de água médio (condição de contorno de primeiro tipo) sendo obtido através do conjunto de Equações (3.13):

$$\begin{aligned} B_n &= \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2}, \\ B_m &= \frac{8}{(2m-1)^2 \pi^2}, \\ B_k &= \frac{8}{(2k-1)^2 \pi^2}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

### 3.10 Solução analítica da equação de difusão em coordenadas cartesianas utilizando condição de contorno de terceiro tipo

São muitos os casos práticos em que o transporte da grandeza genérica na superfície do sólido ocorre através de convecção, com o coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), para um fluido ambiente com um determinado valor da grandeza, dado por  $\Phi_{\infty}$ . Esta condição de contorno é denominada condição de contorno convectiva, também conhecida por condição de contorno de terceiro tipo ou condição de contorno de Cauchy e descreve de forma mais realista como ocorre o transporte de calor ou de massa na superfície de um corpo do que a condição de primeiro tipo.

O sistema físico com geometria cartesiana, para o qual obteve-se a solução analítica para a equação de difusão, encontra-se, inicialmente em equilíbrio  $\Phi(x, y, z, t) = \Phi_0$  a origem dos eixos cartesianos foi o local onde a curva da quantidade de grandeza estudada  $\Phi(x, y, z, t)$  não apresentará inclinação e foi imposto a condição de contorno convectiva. Esta condição é expressa através da imposição de igualdade entre o fluxo interno (difusivo) na superfície do cubo e o fluxo externo (convectiva) nas vizinhanças desta superfície:

Em resumo, procura-se a solução da Equação (3.5) com as seguintes condições:

a) Inicial:

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_0 = \text{constante.} \quad (3.14)$$

b) Contorno externo:

$$\begin{aligned} -\Gamma\Phi \frac{\partial\Phi(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=\pm L_x/2} &= h \left[ \Phi(x, y, z, t) \Big|_{x=\pm L_x/2} - \Phi_{eq} \right], \\ -\Gamma\Phi \frac{\partial\Phi(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=\pm L_y/2} &= h \left[ \Phi(x, y, z, t) \Big|_{y=\pm L_y/2} - \Phi_{eq} \right], \\ -\Gamma\Phi \frac{\partial\Phi(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=\pm L_z/2} &= h \left[ \Phi(x, y, z, t) \Big|_{z=\pm L_z/2} - \Phi_{eq} \right]. \end{aligned} \quad (3.15)$$

c) Simetria

$$\begin{aligned} \frac{\partial\Phi(0, y, z, t)}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial\Phi(x, 0, z, t)}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial\Phi(x, y, 0, t)}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (3.16)$$

em que  $\Phi$  é o coeficiente de transferência convectiva de massa,  $\Phi(x, y, z, t)$  representa o valor da grandeza  $\Phi$ , na posição definida pelas coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  no instante  $t$ ,  $\Phi_{eq}$  é o teor de equilíbrio de  $\Phi$ ;  $\Phi_0$  é valor da grandeza no instante inicial e  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$  são os comprimentos das arestas do cubo ao longo dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. Naturalmente, para o caso do cubo,  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$ .

Considerando as condições de contorno definidas nas Equações 3.14 a 3.16, a solução analítica da Equação (3.5) é obtida por separação de variáveis (CRANK, 1992) e resulta em:

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, z, t) &= \Phi_{eq} - (\Phi_{eq} - \Phi_0) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n A_m A_k \cos\left(\mu_n \frac{x}{L_x/2}\right) \times \cos\left(\mu_m \frac{y}{L_y/2}\right) \times \\ &\times \cos\left(\mu_k \frac{z}{L_z/2}\right) \exp\left[-\left(\frac{\mu_n^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_m^2}{(L_y/2)^2} + \frac{\mu_k^2}{(L_z/2)^2}\right) \Gamma^{\Phi} t\right], \end{aligned} \quad (3.17)$$

em que  $\Phi(x, y, z, t)$  representa o valor da grandeza  $\Phi$ ; na posição definida pelas coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  no instante  $t$ ,  $\Phi_{eq}$  é o teor de equilíbrio de  $\Phi$ ;  $\Phi_0$  é valor da grandeza no instante inicial e  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$  representam as dimensões lineares nos eixo  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. Os parâmetros  $n$ ,  $m$  e  $k$  por sua vez, representam inteiros positivos, e as expressões para  $A_n$ ,  $A_m$  e  $A_k$  (coeficientes da solução analítica dependente da posição para condição de contorno de terceiro tipo) são dados por:

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{4\text{sen}\mu_n}{2\mu_n + \text{sen}(2\mu_n)}, \\ A_m &= \frac{4\text{sen}\mu_m}{2\mu_m + \text{sen}(2\mu_m)}, \\ A_k &= \frac{4\text{sen}\mu_k}{2\mu_k + \text{sen}(2\mu_k)}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

em que:  $\mu_n$ ,  $\mu_m$  e  $\mu_k$  são as raízes das equações características, dadas por:

$$\begin{aligned} \cotg \mu_n &= \frac{\mu_n}{Bi_1}, \\ \cotg \mu_m &= \frac{\mu_m}{Bi_2}, \\ \cotg \mu_k &= \frac{\mu_k}{Bi_3}, \end{aligned} \quad (3.19)$$

sendo o número de Biot ( $Bi$ ) definido como a razão entre a resistência interna e a resistência externa ao fluxo na superfície. Assim, para um corpo com comprimento característico  $L$ , o número de Biot é calculado pela expressão:

$$Bi = \frac{h(L/2)}{D_{ef}}. \quad (3.20)$$

Nas Equações (3.15) e (3.20),  $h$  é o coeficiente de transferência convectiva de massa e, na solução apresentada, foi imposto o mesmo valor de  $h$  para todas as superfícies do cubo. Assim sendo, a Equação (3.20) pode ser escrita, como:

$$Bi_1 = \frac{h(L_x/2)}{D_{ef}}, \quad (3.21)$$

$$Bi_2 = \frac{L_y}{L_x}, \quad (3.22)$$

$$Bi_3 = \frac{L_z}{L_x}. \quad (3.23)$$

Vale salientar que Equação (3.17) permite verificar o valor da grandeza  $\Phi$  para qualquer posição  $(x, y, z)$  em qualquer momento  $t$ , isto é, pode-se conhecer o perfil de  $\Phi(x, y, z, t)$  no interior do corpo. O valor médio da grandeza  $\Phi$  em um instante  $t$ , expresso por  $\bar{\Phi}^*$ , pode ser obtido através da equação:

$$\bar{\Phi}^*(t) = \frac{1}{V} \int \Phi(x, y, z, t) dV, \quad (3.24)$$

em que  $V$  é o volume do cubo. Sendo que a integração é realizada em todo o domínio, resultando em:

$$\bar{\Phi}^*(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_n B_m B_k \exp \left[ - \left( \frac{\mu_n^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_m^2}{(L_y/2)^2} + \frac{\mu_k^2}{(L_z/2)^2} \right) \Gamma^{\Phi} t \right], \quad (3.25)$$

em que  $\bar{\Phi}^*(t) = (\bar{\Phi} - \Phi_{eq}) / (\Phi_0 - \Phi_{eq})$  e  $B_n$ ,  $B_m$  e  $B_k$  são os coeficientes da solução analítica para o teor de água médio (condição de contorno de terceiro tipo) sendo obtido através do conjunto de Equações (3.26):

$$B_n = \frac{2Bi_1^2}{\mu_n^2 (Bi_1^2 + Bi_1 + \mu_n^2)},$$

$$B_m = \frac{2Bi_2^2}{\mu_m^2 (Bi_2^2 + Bi_2 + \mu_m^2)}, \quad (3.26)$$

$$B_k = \frac{2Bi_3^2}{\mu_k^2 (Bi_3^2 + Bi_3 + \mu_k^2)}.$$

Sendo o conjunto de Equações (3.19), equações transcendentais que podem ser escritas como:

$$\mu_n \operatorname{sen} \mu_n - Bi \cos \mu_n = 0, \quad (3.27)$$

ou ainda, para determinação do número de Biot pode-se escrever a Equação (3.27) da seguinte forma, para  $n = 1$ :

$$Bi = \mu_1 \operatorname{tg} \mu_1. \quad (3.28)$$

Vale salientar que todas as raízes da equação transcendental, Equação (3.27), foram calculadas usando o LAB Fit *Curve Fitting Software* (SILVA e SILVA, 2009c), que dispõe de uma ferramenta para a determinação de raízes de equações transcendentais.

Combinando-se as Equações (3.27) com a Equação (3.26) e considerando, em ambas,  $n = 1$ , a seguinte equação transcendental é obtida:

$$B_1 \left[ 2\mu_1^2 + \mu_1 \operatorname{sen}(2\mu_1) \right] - 4\operatorname{sen}^2 \mu_1 = 0 \quad (3.29)$$

Na solução analítica da equação de difusão para o cubo, as raízes da Equação (3.29), serão determinadas pelo método da bisseção, que é viável quando o método analítico, para determinação de raízes, se torna difícil ou não pode ser aplicado. O método da bisseção é um método de busca de raízes dividindo repetidamente um intervalo e então seleciona a raiz por um critério de tolerância. De forma prática o método pode ser resumido da seguinte forma: Seja  $y = f(x)$  uma função contínua em um intervalo  $[a, b]$  que contém uma, e só uma raiz da equação  $f(x) = 0$ . Este método consiste em dividir o intervalo  $[a, b]$ , de forma iterativa, ao meio. Para verificar se a raiz está contida na primeira  $[a, m_x]$  ou na segunda  $[m_x, b]$  metade do intervalo inicial. O intervalo onde se encontra a raiz da função é aquele cujo produto da função nos extremos for menor do que zero. Em seguida, o processo é repetido para aquela metade que contém a raiz de  $f(x) = 0$  ou seja, aquela em que a função,  $y = f(x)$ , tem valores numéricos com sinais opostos nos seus extremos. Ao final de  $N$  interações os intervalos estarão tão pequenos, que o módulo da função nos extremos e no ponto médio serão praticamente iguais entre si e muito próximo a zero, então qualquer ponto nele contido pode ser tomado como uma estimativa para a raiz.

A Equação (3.27) pode ser resolvida numericamente para qualquer número de Biot estipulado. Como exemplo, as primeiras sete raízes da Equação (3.27), para alguns números de Biot entre 0, correspondendo a uma resistência infinita ao fluxo de água na superfície, e 200 que em termos práticos corresponde a condição de contorno de equilíbrio na superfície, estão na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Algumas raízes da equação característica para vários números de Biot.

$Bi$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$	$\mu_5$	$\mu_6$	$\mu_7$
0,001	0,03162	3,14191	6,28334	9,42488	12,5665	15,7080	18,8496
0,010	0,09983	3,14477	6,28478	9,42584	12,5672	15,7086	18,8501
0,100	0,31105	3,17310	6,29906	9,43538	12,5743	15,7143	18,8549
1,350	0,95507	3,50887	6,48832	9,56499	12,6725	15,7932	18,9208
2,200	1,10524	3,68037	6,60472	9,64895	12,7374	15,8459	18,9650
2,800	1,17383	3,77924	6,68010	9,70564	12,7820	15,8825	18,9959
26,00	1,51268	4,53953	7,57064	10,6082	13,6536	16,7076	19,7702
100,0	1,55525	4,66577	7,77763	10,8871	13,9981	17,1093	20,2208
150,0	1,56039	4,68119	7,80202	10,9229	14,0438	17,1648	20,2859
190,0	1,56257	4,68772	7,81288	10,9381	14,0633	17,1885	20,3138
200,0	1,56298	4,68895	7,81493	10,9409	14,0669	10,9409	14,0669

### 3.11 Simplificação da solução analítica tridimensional, utilizando as condições de contorno de primeiro tipo

Para processos de transferência de massa em um cubo, é possível determinar a difusividade através da simplificação da Equação (3.12). De acordo com Markowski et al. (2004), Mercali et al. (2011) e Lins (2013), a Equação (3.12) pode ser escrita com apenas o primeiro termo da série:

$$\bar{\Phi}^*(t) = B_1^3 \exp \left[ - \left( \frac{\mu_1^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_1^2}{(L_y/2)^2} + \frac{\mu_1^2}{(L_z/2)^2} \right) \Gamma^{\Phi} t \right], \quad (3.30)$$

sendo que, para solução analítica tridimensional utilizando condição de contorno de primeiro

tipo, o coeficiente  $B_1$  e a raiz  $\mu_1$  são determinadas através do conjunto de Equações (3.13) e (3.10), respectivamente, ambos para  $n = 1$ . A Equação (3.30) ainda pode ser escrita como:

$$\bar{\Phi}^*(t) = B_1^3 \exp[-At], \quad (3.31)$$

onde,

$$A = \left( \frac{\mu_1^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_1^2}{(L_y/2)^2} + \frac{\mu_1^2}{(L_z/2)^2} \right) \Gamma^\Phi. \quad (3.32)$$

Deve-se observar que a Equação (3.31) só é válida para tempos suficientemente longos de processo, em que, os erros de truncamento são desprezíveis.

### 3.12 Simplificação da solução analítica tridimensional, utilizando as condições de contorno de terceiro tipo

A fim de se determinar a difusividade e o coeficiente de transferência convectiva pode-se utilizar apenas o primeiro termo da série para Equação (3.25). Que pode ser escrita da seguinte forma:

$$\bar{\Phi}^*(t) = B_1^3 \exp[-Ct], \quad (3.33)$$

onde:

$$B_1 = \frac{2Bi_1^2}{\mu_1^2(Bi_1^2 + Bi_1 + \mu_1^2)}, \quad (3.34)$$

e

$$C = \left( \frac{\mu_1^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_1^2}{(L_y/2)^2} + \frac{\mu_1^2}{(L_z/2)^2} \right) \Gamma^\Phi. \quad (3.35)$$

Novamente, deve-se observar que a Equação (3.33) só é válida para tempos suficientemente longos de processo, em que os erros de truncamento são desprezíveis.

### 3.13 Otimizações

Para proceder com a otimização foi usada uma adaptação, para a geometria cúbica que ainda não foi estudado na literatura, da técnica que utiliza uma abordagem de minimização denominada de OREP (*Optimal Removal of Experimental Points*) (SILVA et al., 2014e). Esta técnica tem o intuito de minimizar os erros na determinação dos parâmetros termofísicos em processos de difusão, descritos por pontos experimentais, e uma solução analítica representada apenas pelo primeiro termo da série, para as condições de contorno do primeiro e terceiro tipos, foi utilizado no processo de otimização.

O algoritmo é baseado na determinação da remoção ótima de pontos experimentais antes do ajuste da solução analítica ao conjuntos de dados, mantendo a maior quantidade de informação estatística (SILVA et al., 2014e).

Para fins de otimização, foi utilizado o qui-quadrado para minimizar a dispersão entre os dados experimentais da grandeza de interesse  $\Phi_i^{\text{exp}}$ , com os valores da mesma grandeza obtidos por simulação  $\Phi_i^{\text{sim}}$ .

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{N_p} \left[ \overline{\Phi}_i^{\text{exp}} - \overline{\Phi}_i^{\text{sim}} \right]^2 \frac{1}{\sigma_1^2}, \quad (3.36)$$

onde:  $\overline{\Phi}_i^{\text{exp}}$  é o valor médio da grandeza objeto de estudo medido experimentalmente, referente ao  $i$ -ésimo ponto;  $\overline{\Phi}_i^{\text{sim}}$  é o valor médio da grandeza estudada no mesmo ponto obtido a partir da solução analítica da equação de difusão;  $N_p$  é o número de pontos experimentais e  $1/\sigma_i$  é o peso estatístico referindo-se ao ponto " $i$ ". De forma geral, na ausência de informações, os pesos estatísticos são considerados 1 (o mesmo peso estatístico para todos os pontos experimentais).

Considerando a grandeza objeto de estudo como sendo a teor de água a Equação (3.36) pode ser escrita como:

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{N_p} \left[ \overline{X}_i^{\text{exp}} - \overline{X}_i^{\text{sim}} \right]^2 \frac{1}{\sigma_1^2}, \quad (3.37)$$

onde:  $\overline{X}_i^{\text{exp}}$  é o valor do teor de água médio medido experimentalmente, referente ao

$i$ -ésimo ponto;  $\bar{X}_i^{*sim}$  é o valor teor de água médio obtido a partir da solução analítica da equação de difusão.

A Equação (3.37) é uma particularização da Equação (3.36) para o caso em que a grandeza objeto de estudo é o teor de água. O algoritmo adaptado para a solução analítica da equação de difusão deve obedecer aos passos propostos a seguir.

### 3.13.1 Caso analítico tridimensional com condição de contorno de primeiro tipo

O algoritmo adaptado para a solução analítica envolvendo condição de contorno do primeiro tipo para a equação de difusão, deve obedecer aos seguintes passos:

Passo 1 – A partir do conjunto de Equações (3.10) determinar, respectivamente, a raiz  $\mu_n$ ,  $\mu_m$  e  $\mu_k$ . A partir do conjunto de Equações (3.13) determinar o coeficiente  $B_n$ ,  $B_m$  e  $B_k$  (por exemplo, para os primeiros 100 termos da série);

Passo 2 – Usando regressão não-linear, a partir do conjunto de dados experimentais, determinar o valor de  $A$  através da Equação (3.31) e  $\Gamma^\Phi$  através da Equação (3.32);

Passo 3 – Calcule  $\bar{\Phi}^*(t)$  através da Equação (3.12), em relação aos mesmos tempos em que foram usados para os dados experimentais. Perceba que  $\bar{\Phi}^*(t) = \Phi_i^{sim}$ . No somatório, utilize o número de termos para os quais as raízes da equação transcendental são conhecidas. Calcule  $\chi^2$ , utilizando a Equação (3.37);

Passo 4 – Remover um ponto experimental (da região inicial) e, por meio de regressão não-linear, calcule o novo valor de  $A$  através da Equação (3.31) e a difusividade,  $\Gamma^\Phi$ , através da Equação (3.32), para os pontos restantes. Uma vez que um novo valor de  $\Gamma^\Phi$  foi calculado, repetir o procedimento do passo 3, que envolve todo o conjunto de dados;

Passo 5 – Comparar o valor mais recente de  $\chi^2$  com o valor anterior. Voltar ao passo 4, enquanto o último valor de  $\chi^2$  for menor do que o anterior.

Passo 6 – Se o valor de  $\chi^2$  for maior que o anterior pare a programação.

### 3.13.2 Caso analítico tridimensional com condição de contorno de terceiro tipo

O algoritmo OREP (SILVA et al., 2010), adaptado para a solução analítica envolvendo condição de contorno do terceiro tipo para a equação de difusão, deve obedecer aos seguintes passos:

Passo 1 – Ajuste a Equação (3.33) ao conjunto inteiro de dados e determine  $B_1$  e  $C$  ;

Passo 2 – Calcule:  $\mu_1$  através da Equação (3.29),  $\Gamma^\Phi$  através da Equação (3.35),  $B_i$  através da Equação (3.28) e  $h$  através da Equação (3.20), supondo  $n=1$ . A partir da Equação (3.27), determinar outras raízes da Equação característica (por exemplo de  $\mu_2$  a  $\mu_{20}$ , conforme realizado neste trabalho);

Passo 3 – Calcule  $\bar{\Phi}^*(t)$  através da Equação (3.25), em relação aos mesmos tempos em que foram usados para os dados experimentais. Perceba que  $\bar{\Phi}^*(t) = \Phi_i^{sim}$ . No somatório, utilize o número de termos para os quais as raízes da equação transcendental são conhecidas (neste caso, 16). Calcule  $\chi^2$ , utilizando a Equação (3.37);

Passo 4 – Remover um ponto experimental (da região inicial), e através da Equação (3.33) determinar os novos valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$  e repetir os procedimentos das etapas 2 e 3, envolvendo todo o conjunto de dados;

Passo 5 – Comparar o valor mais recente de  $\chi^2$  com o anterior. Voltar ao passo 4, enquanto o último valor de  $\chi^2$  for menor do que o anterior.

Passo 6 – Se o valor de  $\chi^2$  for maior que o anterior pare a programação.

Os códigos fonte foram compilados no Compaq Visual Fortran (CVC) 6.6.0 Professional Edition usando a opção *QuickWin Application* e a plataforma do Windows Vista. Os valores ideais para os parâmetros termofísicos são aqueles em relação ao qui-quadrado mínimo. Neste algoritmo, é importante mencionar que a remoção de pontos experimentais é apenas para determinar  $B_1$  e  $C$ , por meio de regressão não-linear.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados estudos experimentais e teóricos, relativos ao processo de difusão da água e sacarose em sólidos com geometria cúbica. Os estudos experimentais foram direcionados para desidratação osmótica e secagem em estufa de cubos de melão em estágio de maturação maduro.

As amostras cortadas em formato de cubo, com arestas de 1,0 cm, foram submetidas a desidratação em solução osmótica nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix. O teor de água inicial apresentado pelas amostras, em base seca, foi igual a 17,12. Todas as amostras osmodesidratadas à temperatura ambiente foram submetidas ao tratamento até que o equilíbrio fosse estabelecido, assim como nos processos de secagem em estufa, sendo que na Tabela 4.1 são apresentados os valores referentes a quantidade de água de equilíbrio, em base seca (bs) e quantidade de sólidos de equilíbrio (percentual) presentes nas amostras, considerando a quantidade de sólidos no início como 100%.

Tabela 4.1 – Quantidade de água de equilíbrio (bs) e quantidade de sólidos de equilíbrio (%) presentes nas amostras com arestas de 1,0 cm tratadas em solução osmótica de 25, 45 e 65 °Brix.

Concentração da solução (°Brix)	Quantidade de água de equilíbrio (bs)	Quantidade de sólidos de equilíbrio (%)
<b>25</b>	4,12	251,60
<b>45</b>	2,97	450,10
<b>65</b>	1,88	600,50

Os valores descritos na Tabela 4.1 para o quantidade de água de equilíbrio e quantidade de sólidos de equilíbrio estão dentro do esperado. Valores semelhantes são relatados por Lima et al. (2004) ao desidratar fatias de melão nas dimensões de 1,0 x 3,0 x 5,0 cm, em solução desidratante de sacarose nas concentrações de 40, 50, 60 e 70 °Brix. Khin et al. (2007) e Falade e Adalakun (2007) afirmaram que o aumento da concentração da solução osmótica implica em um aumento na taxa de transferência de massa decorrente do aumento do gradiente de pressão osmótica.

Após a desidratação, as amostras seguiram para secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, onde permaneceram até que o teor de água de equilíbrio fosse atingido. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores do teor de água inicial e final, em base seca.

Tabela 4.2 – Teor de água inicial e de equilíbrio (bs) apresentados pelas amostras com arestas de 1,0 cm tratadas preliminarmente em solução osmótica nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e submetidos a secagem em estufa, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Concentração da solução (°Brix)	Teor de água inicial (bs)	Temperatura (°C)	Teor de água de equilíbrio (bs)
25	4,12	50	0,15
		60	0,13
		70	0,09
45	2,97	50	0,14
		60	0,12
		70	0,08
65	1,88	50	0,14
		60	0,13
		70	0,10

Após a secagem realizada em estufa as amostras foram submetidas a análise sensorial e determinada a melhor condição (temperatura de tratamento e concentração da solução osmótica). Foram realizados novos experimentos, agora variando o comprimento das arestas dos cubos (1,5; 2,0 e 2,5 cm). A definição da melhor temperatura e concentração da solução deu-se através da verificação dos índices de aceitação referente aos atributos: sabor, aroma, aparência, cor e intenção de compra. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores referentes

ao teor de água de equilíbrio (bs), das amostras pré-tratadas em solução osmótica na concentração de 65 °Brix com secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C.

Tabela 4.3 – Teor de água de equilíbrio (bs) apresentado pelas amostras com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, tratadas preliminarmente em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetidos a secagem em estufa, na temperatura de 50 °C.

Temperatura de secagem (°C)	Aresta (cm)	Teor de água de equilíbrio (bs)
50	1,5	0,12
50	2,0	0,15
50	2,5	0,17

#### 4.1 Cinética de desidratação osmótica e secagem em estufa utilizando o *software Prescribed*: Condição de contorno de primeiro tipo

Neste item a cinética de desidratação osmótica e secagem em estufa foi realizada pressupondo a condição de contorno de equilíbrio ou condição de contorno de primeiro tipo em que se considera que instantaneamente a superfície externa do melão entra em equilíbrio com o meio externo, não acontecendo, portanto, resistência ao fluxo de água e sólidos em tal superfície. Neste caso, todo o processo é governado apenas pela difusividade efetiva de massa ( $D_{ef}$ ). Os parâmetros analisados na desidratação osmótica foram: quantidade de água e ganho de sólidos para amostras com dimensão de aresta de 1,0 cm. Com relação a secagem em estufa foi analisado a perda de água das amostras com as dimensões de aresta de 1,0 cm e submetidas a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e amostra com dimensões de 1,5; 2,0 e 2,5 cm submetidas a secagem em estufa na temperatura de 50 °C.

##### 4.1.1 Quantidade de água das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm

A quantidade percentual de água foi determinada em cada instante, conforme estabelecido no Capítulo 3. Na Figura 4.1 têm-se os gráficos do teor de água (percentual) *versus* tempo nas amostras tratadas em solução com (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix.

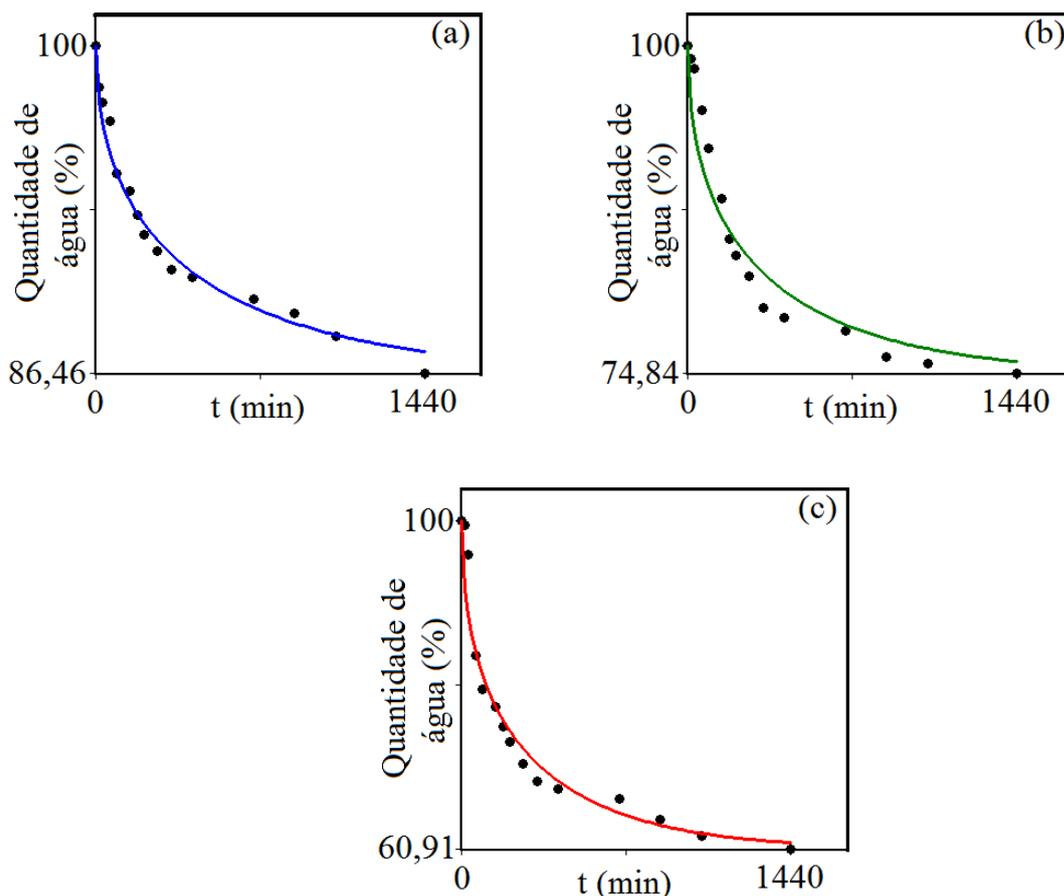


Figura 4.1: Quantidade de água (percentual) *versus* tempo (minutos) de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, tratados osmoticamente em solução de sacarose nas concentrações de (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix (c).

Na Tabela 4.4 encontra-se um resumo com os valores das difusividades efetivas da água nas amostras desidratadas nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix, e também os indicadores estatísticos referentes ao modelo. A Tabela A.2, em apêndice a este trabalho, mostra os valores referentes aos percentuais de água e os respectivos instantes.

Tabela 4.4 – Valores de difusividade ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

Concentração (°Brix)	$D_{ef} (m^2 \text{ min}^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
25	$4,880 \times 10^{-9}$	$2,7099 \times 10^{-2}$	0,983173
45	$7,108 \times 10^{-9}$	$6,0852 \times 10^{-2}$	0,972770
65	$7,724 \times 10^{-9}$	$8,8612 \times 10^{-2}$	0,954817

Para amostras com arestas de 1,0 cm e submetidas a desidratação osmótica nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix percebe-se através da análise da Tabela 4.4 que apesar do tempo relativamente longo do processo, as maiores taxas de perda de água ocorrem nas primeiras horas do experimento e que os valores da difusividade efetiva da água mostraram dependência com o teor de sólidos solúveis presentes na solução desidratante. Em geral, verificou-se perdas mais elevadas quando a concentração da solução osmótica é maior, fato este reportado em diversas pesquisas, como: Lenart (1992); Falade et al., (2007), Tortoe (2010) e Phisut et al., (2013).

#### 4.1.2 Quantidade de sólidos das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com aresta de 1,0 cm

Na Figura 4.2 têm-se os gráficos do teor de sólidos (percentual) *versus* tempo (minutos) das amostras tratadas em solução com (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix.

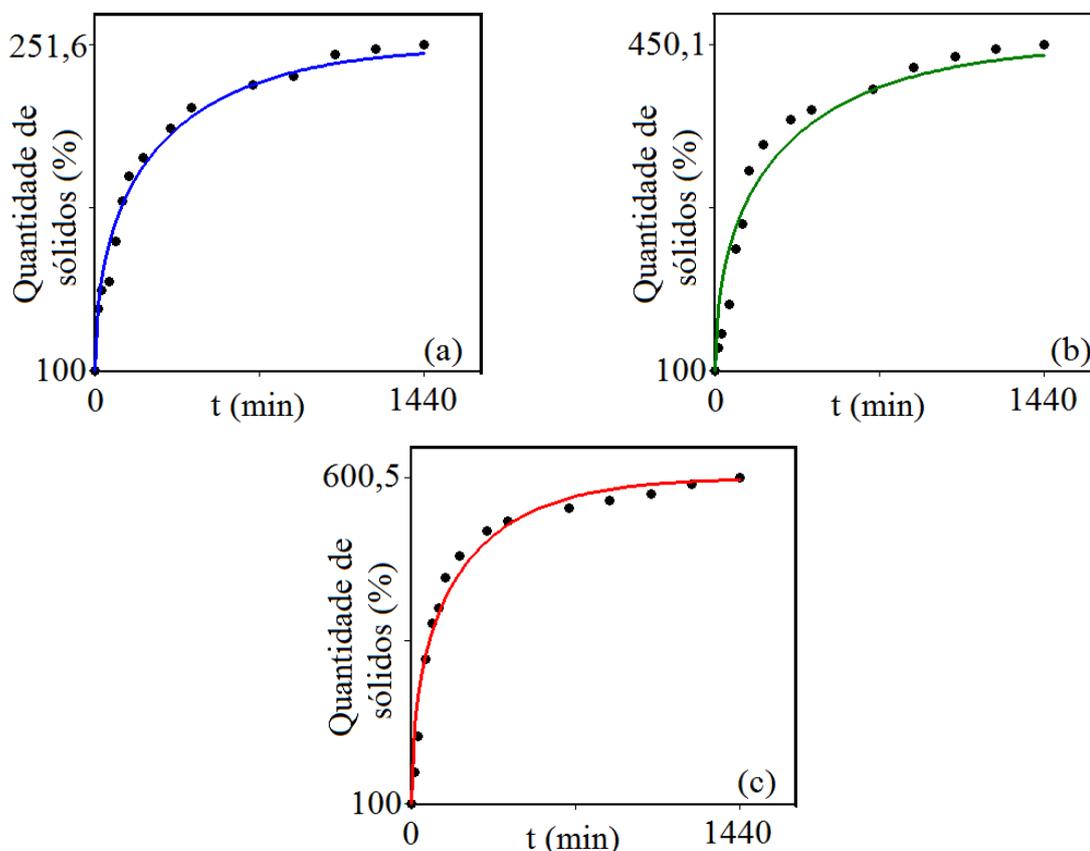


Figura 4.2: Quantidade de sólidos (percentual) *versus* tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, tratados osmoticamente em solução de sacarose nas concentrações de (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix.

Na Tabela 4.5 encontra-se um resumo com os valores das difusividades efetivas de sólidos nas amostras desidratadas nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix, e também os indicadores estatísticos referentes ao modelo.

Tabela 4.5 – Valores de difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante o ganho de sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, 45 °Brix e 65 °Brix.

Concentração (°Brix)	$D_{ef} (m^2 \text{ min}^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
25	$7,238 \times 10^{-9}$	$2,3191 \times 10^{-2}$	0,987693
45	$7,610 \times 10^{-9}$	$9,9267 \times 10^{-2}$	0,964724
65	$10,459 \times 10^{-9}$	$5,0991 \times 10^{-2}$	0,971230

Uma inspeção na Figura 4.2 permite afirmar que apesar do tempo relativamente longo do processo, a maior taxa de ganho de sacarose é verificada nas primeiras horas do experimento e tendem a zero nos instantes finais de operação, mostrando um comportamento típico da osmodesidratação de frutas (AIRES, 2015). Percebe-se ainda que amostras desidratadas em soluções com maiores concentrações de sacarose apresentam maiores ganhos de açúcares para o mesmo tempo de desidratação, fato este corroborado pelos valores obtidos na Tabela 4.5, que apresenta os valores de difusividade efetiva. Embora os valores obtidos encontrem-se dentro da faixa de valores observados em diversas pesquisas um fato interessante é que a difusividade efetiva de massa do soluto apresenta maiores valores que aqueles apresentados para difusividade efetiva de massa de água, uma vez que o peso molecular da água é consideravelmente menor que da molécula de sacarose. Resultados semelhantes foram relatados por Khoiyi e Hesari (2007) durante estudo sobre a desidratação osmótica de damascos, na qual foram encontrados difusividade média de  $13,10 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para água e  $14,50 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para a sacarose.

Rastogi et al. (2002), ao estudarem a cinética de desidratação osmótica de cubos de abacaxi (15 x 15 x 15 mm) em solução osmodesidratante nas concentrações de 40, 50, 60 e 70 °Brix, com diferentes temperaturas (30, 40 e 50 °C), determinaram a difusividade efetiva de massa da água e soluto, a partir de Lei de Fick. Os coeficientes de difusão efetiva para a água,

bem como soluto foram empiricamente correlacionada com a concentração e temperatura da solução osmótica. Verificou-se, para uma mesma temperatura de tratamento, neste caso 30 °C, que o aumento na quantidade de sólidos solúveis presente na solução osmótica acarretou, assim como obtido neste trabalho, aumento nos valores obtidos para os parâmetros difusividade efetiva de massa de água e sacarose.

Corrêa et al. (2010) estudaram a desidratação osmótica de placas de goiaba em soluções de sacarose, com e sem a influência de vácuo pulsado, utilizando várias concentrações de solução de sacarose a 40 °C com o nível de recirculação de 2,5 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. As difusividades foram calculadas utilizando uma solução analítica da equação de difusão para uma placa semi-infinita com condição de contorno do primeiro tipo, desconsiderando o encolhimento e considerando difusividade constante. De acordo com os autores, a difusividade da água foi menor do que a de sacarose na desidratação da concentração da solução de 40 °Brix.

Assis et al. (2016) ao desidratarem maçãs cortada em formato de cubos em solução osmótica de sacarose e sorbitol com teor de sólidos solúveis de 60 °Brix nas temperaturas de 25, 40 e 60 °C, também obtiveram para 10 dos 11 tratamentos valores para a difusividade efetiva de massa do agente desidratante maiores que os apresentados para a difusividade efetiva de massa de água. Sendo que para difusividade efetiva de massa do agente ficou no intervalo de 0,856 x 10<sup>-9</sup> a 2,802 x 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup> min<sup>-1</sup>, enquanto que para difusividade efetiva de massa de água o intervalo dos valores foi de 0,266 x 10<sup>-9</sup> a 2,483 x 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup> min<sup>-1</sup>.

Vale salientar que os índices de equilíbrio de captação de sacarose, em todos os experimentos, são relativamente altos, sendo atingidos em tempos consideravelmente longos. Em muitos casos, essa situação deve ser evitada diante de alguns aspectos negativos relativos ao consumo exagerado de sacarose (MEGÍAS-PÉREZ et al., 2014). E este é mais um motivo que realça a importância da modelagem matemática proposta neste trabalho à medida que fornece a possibilidade de predição dos níveis de sacarose e perda de água em qualquer instante de tempo, assim como as distribuições de água/sacarose em quaisquer instantes.

### 4.1.3 Quantidade de água durante a secagem em estufa

Durante o processo de secagem em estufa as amostras foram monitoradas a fim de verificar a massa apresentada nos instantes determinados.

**4.1.3.1 Razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C**

Na Figura 4.3 têm-se os gráficos da razão do teor de água (percentual) *versus* tempo (minutos) das amostras com arestas de 1,0 cm pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix e secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

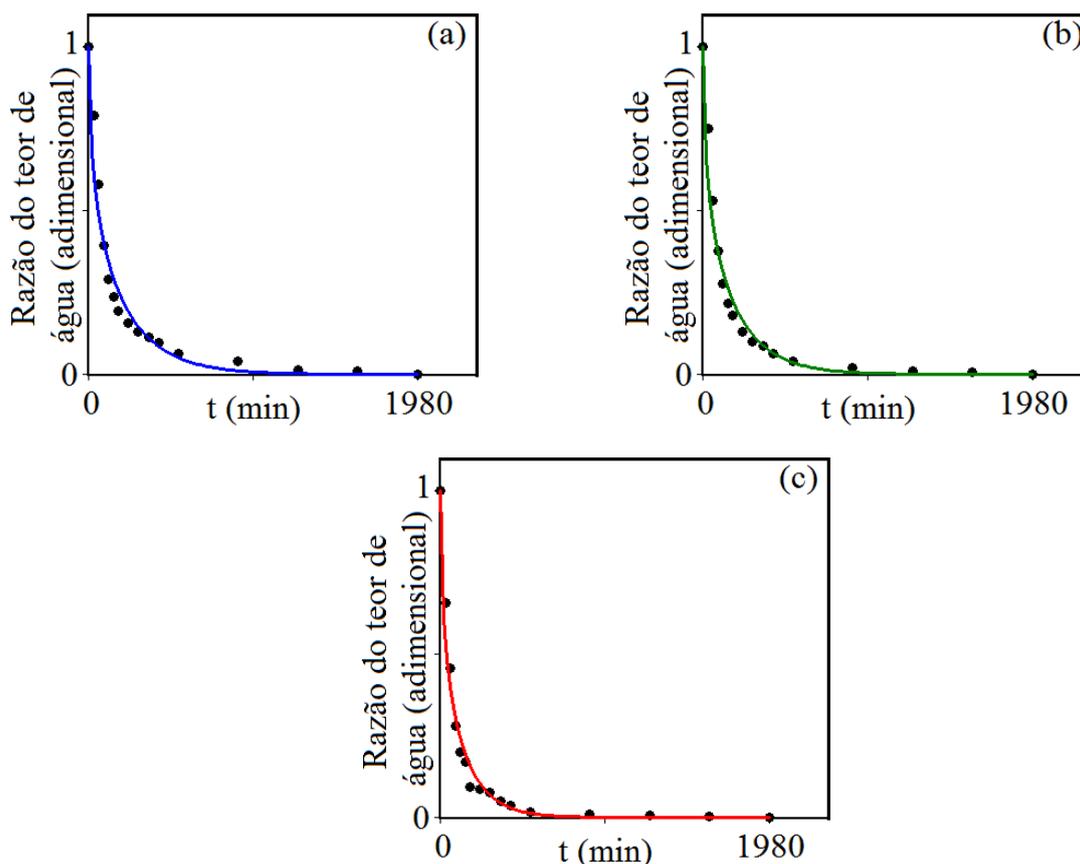


Figura 4.3: Razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetido a secagem à temperatura de (a) 50, (b) 60 e (c) 70 °C.

Na Tabela 4.6 encontram-se os valores dos coeficientes de difusividade efetivas da água para amostras com arestas de 1,0 cm, desidratadas em solução osmótica de 25 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Na Tabela B.1, em apêndice a

este trabalho, encontram-se os valores referentes aos teores de água das amostras de melão cortadas em formato de cubos e os respectivos instantes.

Tabela 4.6 – Valores de difusividade ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Temperatura (°C)	$D_{ef} (m^2 \text{ min}^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
50	$1,472 \times 10^{-8}$	$5,1521 \times 10^{-2}$	0,963810
60	$1,678 \times 10^{-8}$	$3,7125 \times 10^{-2}$	0,974334
70	$2,304 \times 10^{-8}$	$2,6100 \times 10^{-2}$	0,979841

Analisando os resultados descritos na Tabela 4.6 infere-se, como esperado, que os maiores coeficientes de difusividade da água são apresentados para amostras que foram tratadas em maior temperatura. Fato este reportado por vários autores ao trabalhar com diversos produtos (BASUNIA e ABE, 2001; AZZOUZ et al., 2002; KAYMAK-ERTEKIN, 2002; AKPINAR et al., 2003; LAHSASNI et al., 2004; BABALIS e BELESSIOTIS, 2004; MOHAPATRA e RAO, 2005; REVASKAR et al., 2014; MIRANDA, 2014).

Revaskar et al. (2014) realizaram experimentos de desidratação osmótica em fatias de cebola com solução desidratante de cloreto de sódio nas concentrações 10, 15 e 20 °Brix e secagem posterior nas temperaturas 50, 60 e 70 °C. As difusividades foram determinadas utilizando-se um conjunto de cinco equações baseadas na Lei de Fick e os maiores valores apresentados para a difusividade efetiva de massa de água foram atribuídos as maiores temperaturas de secagem.

Com relação aos indicadores estatísticos obtidos neste trabalho houve boa conformidade do modelo com os dados experimentais, tanto para desidratação osmótica quanto durante a secagem complementar em estufa. O maior valor obtido para o coeficiente de determinação foi obtido para temperatura de secagem de 70 °C (0,979841), enquanto que para 60 e 50 °C foram de 0,974334 e 0,963810, respectivamente.

**4.1.3.2 Razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 45 °Brix e submetido a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C**

Na Figura 4.4 têm-se os gráficos da razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) das amostras com arestas de 1,0 cm pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 45 °Brix e secagem posterior nas temperaturas de (a) 50 °C, (b) 60 °C e (c) 70 °C.

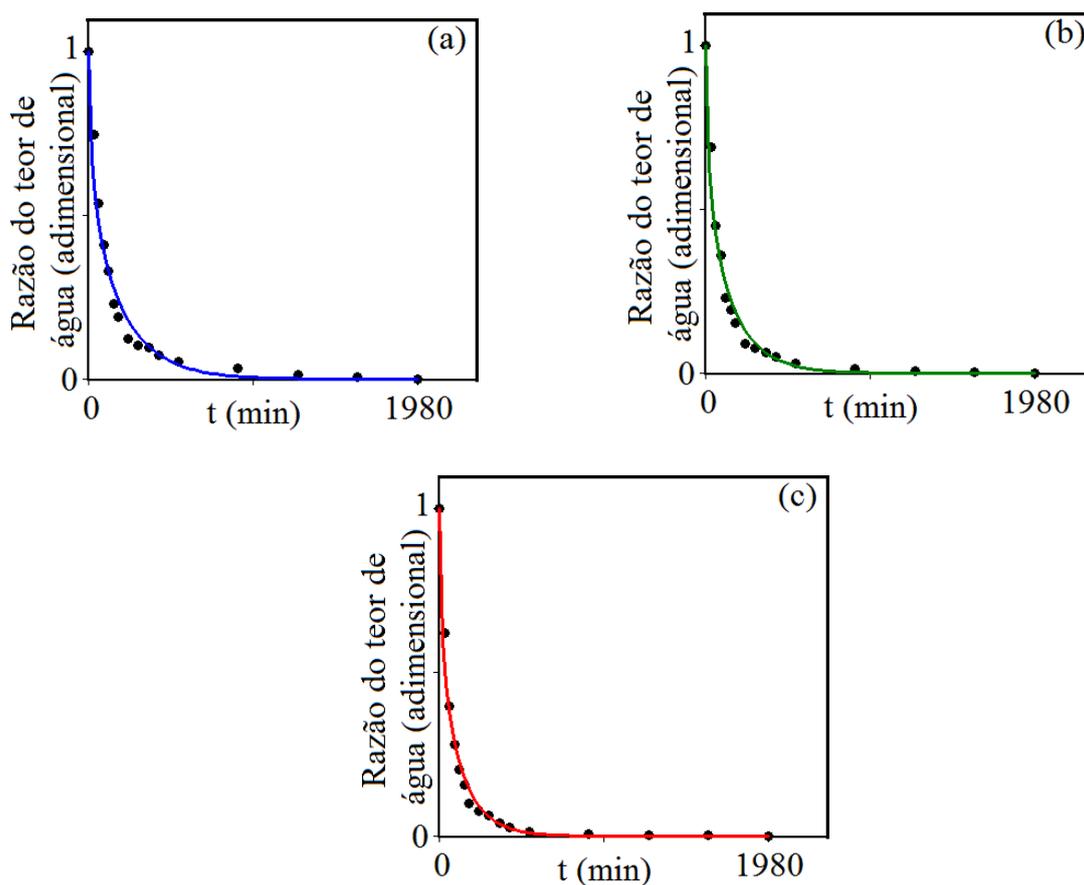


Figura 4.4: Razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução na concentração de 45 °Brix e submetido a secagem à temperatura de (a) 50 °C, (b) 60 °C e (c) 70 °C.

Na Tabela 4.7 encontram-se os valores dos coeficientes de difusividade efetivas da água para amostras com arestas de 1,0 cm, desidratadas em solução osmótica de 45 °Brix e

submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, bem como os indicadores estatísticos referentes ao modelo.

Na Tabela B.1, em apêndice a este trabalho, encontram-se os valores referentes aos teores de água (adimensional) das amostras de melão cortadas em formato de cubos e os respectivos instantes.

Tabela 4.7 – Valores de difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 45 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Temperatura (°C)	$D_{ef} (m^2 \text{ min}^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
50	$1,561 \times 10^{-8}$	$3,3405 \times 10^{-2}$	0,976807
60	$1,998 \times 10^{-8}$	$2,3452 \times 10^{-2}$	0,982575
70	$2,484 \times 10^{-8}$	$1,3201 \times 10^{-2}$	0,989412

Através de uma inspeção visual na Figura 4.3, assim como aconteceu na Figura 4.4, constata-se que, durante as primeiras horas houve rápida remoção de água do produto, sendo que após as duas primeiras horas de secagem a taxa de remoção diminuiu consideravelmente para todos os tratamentos, em todas as temperaturas, não sendo identificados períodos de taxa de secagem constante, sendo que a maior inclinação da curva referente a cinética de secagem é apresentada para amostra tratada na temperatura de 70 °C, seguida pela amostra de 60 e 50 °C, respectivamente.

Corroborando com a análise anterior percebe-se na Tabela 4.7, assim como ocorrido na Tabela 4.6, que os maiores valores para difusividade foram apresentados pelas amostras tratadas com secagem posterior na temperatura de 70 °C seguidas por 60 e 50 °C, respectivamente. Resultados similares foram encontrados por Simal et al. (1997) ao realizar experimento de secagem de cubos de maçã osmodesidratados em solução concentradas de sacarose na concentração de 70 °Brix e submetida a secagem posterior em estufa nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C e por Diamante e Yamaguchi (2013) na secagem de cubos de maçã osmodesidratados em sucos concentrados de groselha e de maçã.

#### 4.1.3.3 Razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C

Na Figura 4.5 têm-se os gráficos da razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) das amostras com arestas de 1,0 cm pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix e secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

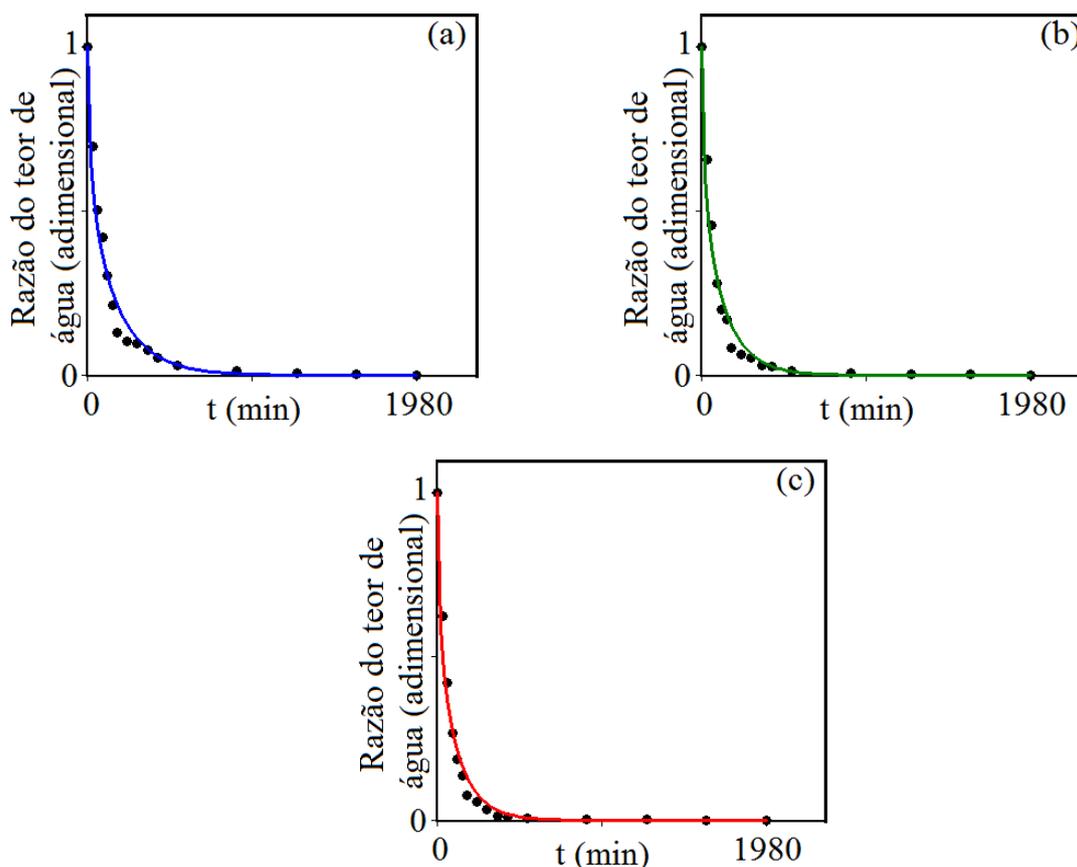


Figura 4.5: Razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem à temperatura de (a) 50 °C, (b) 60 °C e (c) 70 °C.

Na Tabela 4.8 encontram-se os valores dos coeficientes de difusividade efetivas da água para amostras com arestas de 1,0 cm desidratadas em solução osmótica de 65 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, bem como os indicadores estatísticos referentes ao modelo.

Tabela 4.8 – Valores de difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução na concentração de 65 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Temperatura (°C)	$D_{ef} (m^2 \text{ min}^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
50	$1,793 \times 10^{-8}$	$3,0038 \times 10^{-2}$	0,980521
60	$2,383 \times 10^{-8}$	$2,8523 \times 10^{-2}$	0,979224
70	$2,645 \times 10^{-8}$	$2,1815 \times 10^{-2}$	0,984338

Analisando os resultados obtidos na Tabela 4.8, percebe-se que a amostra que apresentou maior valor para a difusividade foi aquela submetida a secagem posterior na temperatura de 70 °C, seguida pela amostra tratada a 60 °C e que durante as primeiras horas houve rápida remoção de água do produto, não sendo identificados períodos de taxa de secagem constante. Vale salientar que comportamento similar a estas amostras, que foram pré-tratadas em solução osmótica na concentração de 65 °Brix, ocorreu com as amostras pré-tratadas em soluções osmóticas com teor de sólidos solúveis de 25 e 45 °Brix.

Outro fato relevante é que ao comparar amostras pré-tratadas em soluções com diferentes teores de sólidos solúveis e submetidas a secagem posterior na mesma temperatura nota-se que o pré-tratamento foi consideravelmente importante no auxílio da remoção de água durante a secagem, fator este que pode ser verificado através de uma inspeção nos valores apresentado para a difusividade efetiva da água nas Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8, onde pode-se perceber que para cada amostra tratada em uma mesma temperatura quanto maior a concentração da solução osmodesidratante maior o valor obtido para a difusividade efetiva de massa de água.

Resultados análogos são reportados por Ayala-Aponte et al. (2014) ao estudarem a influência de pré-tratamento osmótico sobre a secagem convectiva de pitaya amarela. Segundo os autores, considerando que as amostras osmodesidratadas continham menor teor de água inicial quando comparadas com amostras frescas, os tempos necessários para atingir teor de água de equilíbrio são menores do que aqueles correspondentes a amostras não tratadas. Além disso, as amostras submetidas a desidratação osmótica antes de secagem por convecção alterou a sua estrutura interna afetando a ação de diferentes mecanismos de transporte de massa, contribuindo assim para melhorar o transporte de água para fora do

sólido. Com relação aos indicadores estatísticos vê-se uma concordância relativamente boa entre o ajuste utilizando condição de contorno de primeiro tipo e os dados obtidos experimentalmente. Os valores para o qui-quadrado ficaram entre  $9,9267 \times 10^{-2}$  e  $1,3201 \times 10^{-2}$  e para o coeficiente de determinação os valores foram entre 0,954817 e 0,989412.

#### 4.1.3.4 Razão do teor de água em cubos com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratados em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior na temperatura de 50 °C

Na Figura 4.6 têm-se os gráficos da razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) das amostras com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix e secagem posterior nas temperaturas de 50 °C.

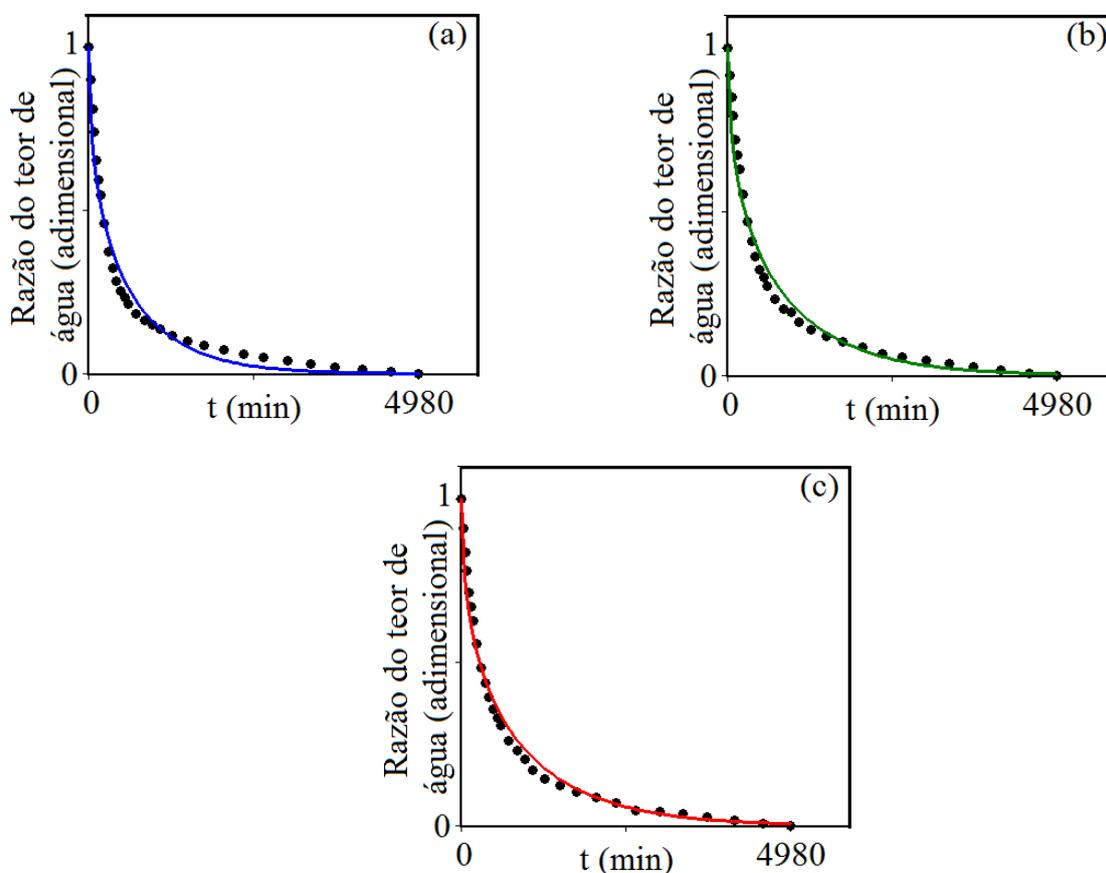


Figura 4.6: Razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de (a) 1,5 cm, (b) 2,0 cm e (c) 2,5 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem à temperatura de 50 °C.

Na Tabela 4.9 encontram-se os valores dos coeficientes de difusividade efetiva da água para amostras com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetidos à secagem na temperatura de 50 °C, bem como os indicadores estatísticos referentes ao modelo. Na Tabela G.1, em apêndice a este trabalho, encontram-se os valores referentes aos teores de água (adimensional) e os respectivos instantes.

Tabela 4.9 – Valores de difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.

Dimensões (cm)	$D_{ef} (m^2 \text{ min}^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
1,5	$4,242 \times 10^{-9}$	$6,9753 \times 10^{-2}$	0,975609
2,0	$3,195 \times 10^{-9}$	$7,5121 \times 10^{-2}$	0,979625
2,5	$3,017 \times 10^{-9}$	$4,9440 \times 10^{-2}$	0,987726

A Figura 4.6 apresenta os gráficos da cinética de secagem em estufa para amostras tratadas na melhor condição, obtida através da análise sensorial (pré-tratamento em solução com concentração de 65 °Brix e secagem posterior em estufa com temperatura de 50 °C). Com relação a amostras tratadas sob estas condições percebe-se que quanto menor a aresta maior a inclinação do gráfico e conseqüentemente menor o tempo necessário para que a amostra atinja o teor de água de equilíbrio. Os valores de difusividade efetiva obtidos nas Tabelas 4.8 e 4.9, tanto para amostra com 1,0 cm quanto para 1,5; 2,0 e 2,5 vem apenas corroborar com a descrição realizada anteriormente. Percebe-se que a amostra com 1,0 cm de aresta apresenta, para difusividade efetiva de massa de água,  $1,763 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  e para 1,5; 2,0 e 2,5 apresentaram valores de:  $4,242 \times 10^{-9}$ ;  $3,195 \times 10^{-9}$  e  $3,017 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , respectivamente. Segundo Doymaz (2016), ao realizar secagem convectiva de fatias de cenoura em diferentes dimensões, uma possível explicação para os valores da difusividade efetiva de massa de água maiores para amostras com as menores arestas decorre do fato de que as amostras com menores arestas apresentam maiores áreas superficiais expostas para um determinado volume

quando comparado com as amostras com maiores arestas. Resultados similares foram obtidos por Falade et al. (2007).

#### **4.2 Cinética de desidratação osmótica e secagem em estufa utilizando o *software Convective*: Condição de contorno de terceiro tipo**

Nesta seção através do *software “Convective Adsorption - Desorption”* V. 2.5 (SILVA e SILVA, 2009b) foi realizada a cinética de desidratação osmótica e secagem em estufa pressupondo a condição de contorno convectiva, também conhecida como condição de contorno de terceiro tipo. Neste caso, o modelo prevê que possa existir resistência ao fluxo de água na superfície do melão. Assim sendo, o processo é governado não só pela difusividade efetiva de massa mas, também pela transferência convectiva de massa. Os parâmetros analisados na desidratação osmótica foram: quantidade de água e ganho de sólidos para amostras de 1,0 cm de aresta. Já na secagem em estufa, assim como aconteceu na sessão 4.1 deste mesmo capítulo, o teor de água para amostra com as dimensões das arestas de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 cm nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e servirão pra determinar qual a condição de contorno melhor se adéqua aos dados obtidos através dos experimentos descritos neste trabalho.

##### **4.2.1 Quantidade de água das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm**

A quantidade de água foi verificada durante todo o processo de desidratação osmótica a fim de determinar a difusividade efetiva e transferência convectiva da água através do *software Convective*. Os teores de água foram determinados em cada instante, conforme estabelecido no capítulo anterior.

Em apêndice a este trabalho, na Tabela A.2, os valores referentes aos percentuais de água e os respectivos instantes podem ser verificados.

Na Figura 4.7 têm-se os gráficos do teor de água (percentual) *versus* tempo (minutos) das amostras tratadas em solução com (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix.

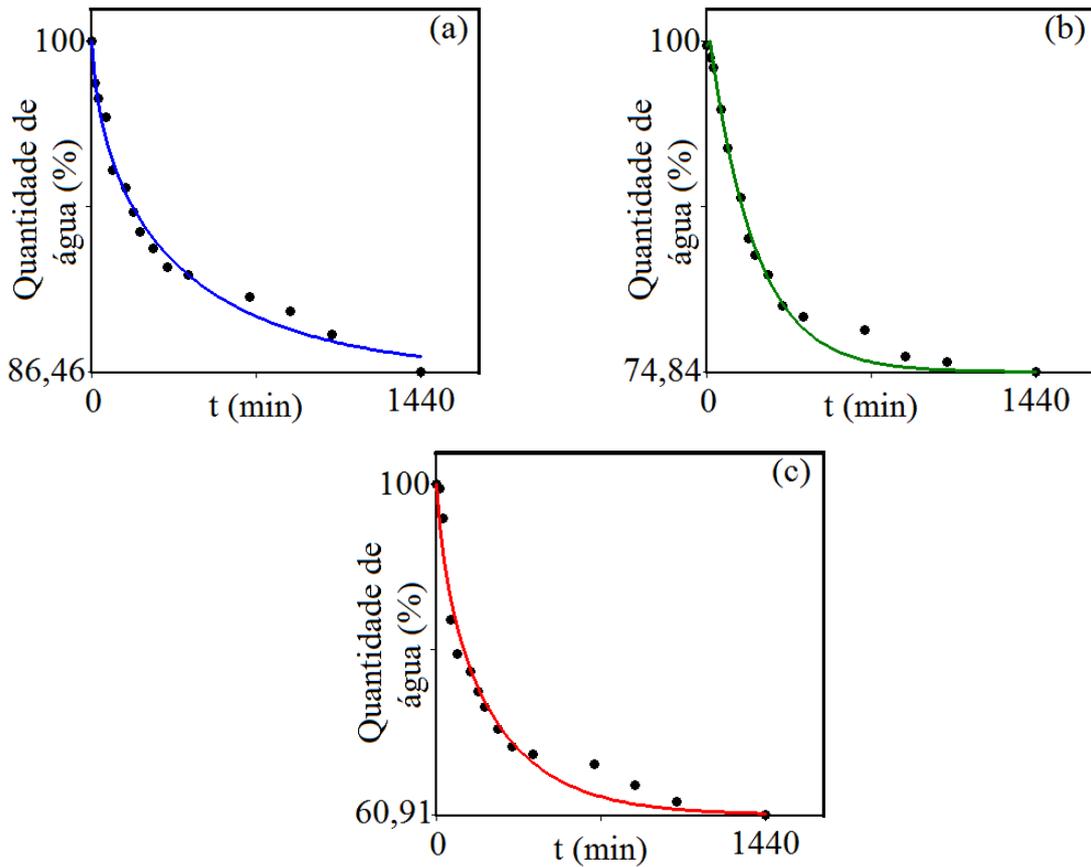


Figura 4.7: Quantidade de água (adimensional) versus tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, tratados osmoticamente em solução nas concentrações de (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix.

Na Tabela 4.10 encontra-se um resumo com os valores dos coeficientes de difusividade e transferência convectiva da água nas amostras desidratadas nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix, e também os indicadores estatísticos referentes ao modelo.

Tabela 4.10 – Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

Concentração (°Brix)	$D_{ef} (m^2 \text{ min}^{-1})$	$h (m \text{ min}^{-1})$	Biot	$\chi^2$	$R^2$
25	$0,645 \times 10^{-8}$	$3,257 \times 10^{-5}$	25,250	$1,7361 \times 10^{-2}$	0,986073
45	$1,312 \times 10^{-8}$	$2,957 \times 10^{-5}$	8,750	$2,7063 \times 10^{-2}$	0,982836
65	$1,915 \times 10^{-8}$	$2,011 \times 10^{-5}$	5,250	$3,8732 \times 10^{-2}$	0,977338

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.10 observa-se melhores resultados quando comparados os indicadores estatísticos,  $\chi^2$  e  $R^2$ , obtidos através a imposição da condição de contorno de terceiro, com os indicadores obtidos impondo a condição de contorno de primeiro tipo (Tabela 4.4). Enquanto que os valores para o qui-quadrado, quando imposta a condição de contorno de primeiro tipo, estão contidos no intervalo entre  $2,7099 \times 10^{-2}$  e  $8,8612 \times 10^{-2}$  para condição de contorno de terceiro tipo verificou-se valores entre  $1,7361 \times 10^{-2}$  e  $3,8732 \times 10^{-2}$ . Já para o coeficiente de determinação nota-se o mesmo comportamento, enquanto que para condição de contorno de primeiro tipo, os valores ficaram entre 0,954817 e 0,983173 para condição de contorno de terceiro tipo os valores obtidos são superiores 0,977338 e 0,986073.

Com relação aos valores obtidos para a difusividade efetiva a amostra que obteve o maior valor foi aquela osmodesidratada em solução com concentração de 65 °Brix, seguida pelas amostras tratadas em 45 e 25 °Brix, respectivamente.

Outro fato que merece citação são os valores obtido para os números de Biot: 25,25; 8,750 e 7,250, respectivamente, para amostras tratadas em solução nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix. Tais valores indicam que a condição de contorno de terceiro tipo é mais apropriada para descrição do processo. Neste sentido, as resistências aos fluxos mássicos de água e de sacarose na superfície dos cubos de melão não podem ser desprezados e devem ser considerados.

### **4.2.2 Quantidade de sólidos das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com aresta de 1,0 cm**

O ganho de sólidos foi verificado durante todo o processo de desidratação osmótica a fim de determinar a difusividade efetiva e o coeficiente de transferência convectiva da sacarose impondo a condição de contorno de primeiro tipo utilizando o *software Convective*.

Os valores referentes as quantidade de sólidos nas amostras foram determinadas em cada instante, conforme foi estabelecido no capítulo anterior, na Figura 4.8 tem-se os gráficos da teor de sólidos (percentual) *versus* tempo (minutos) das amostras tratadas em solução com (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 Brix.

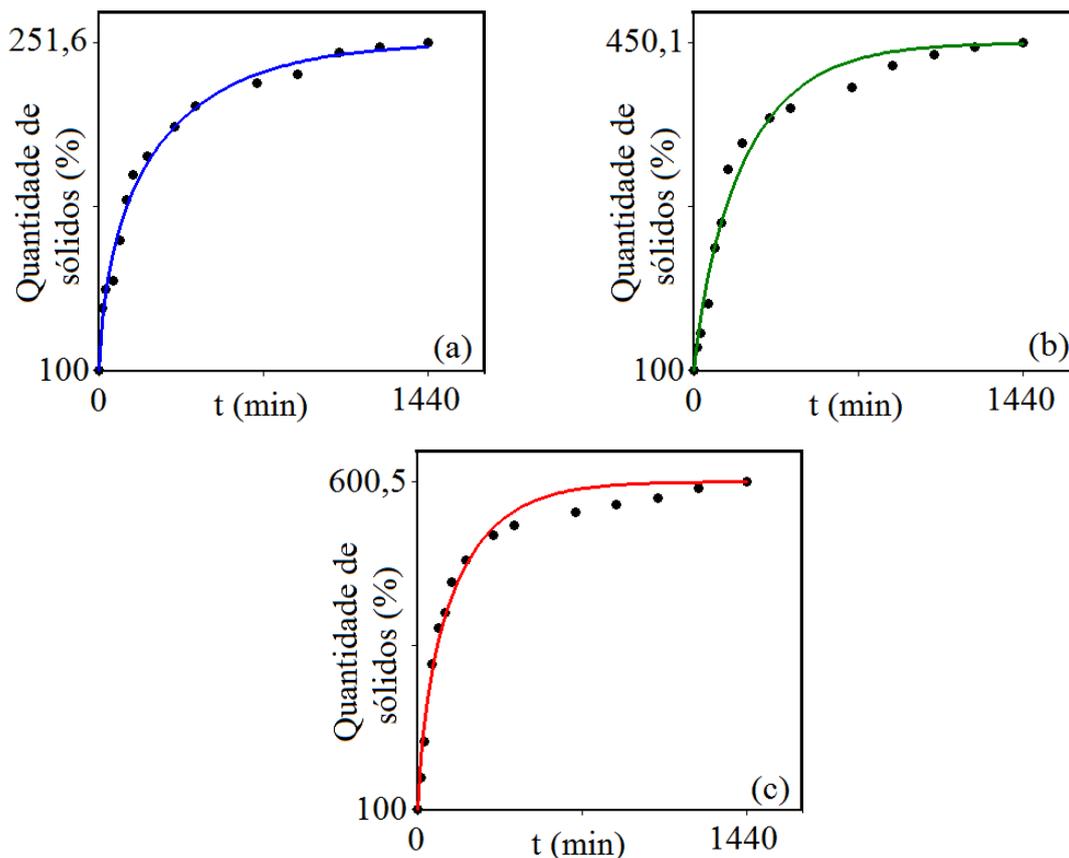


Figura 4.8: Quantidade de sólidos (percentual) *versus* tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, tratados osmoticamente em solução de sacarose nas concentrações de (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix.

Na Tabela 4.11 encontra-se um resumo com os valores da difusividade efetiva e coeficiente de transferência convectiva de sólidos nas amostras desidratadas nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix, bem como os indicadores estatísticos.

Tabela 4.11 – Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante o ganho de sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, em solução de sacarose na concentração de 25, 45 e 65 °Brix.

Concentração (°Brix)	$D_{ef} (m^2 \text{ min}^{-1})$	$h (m \text{ min}^{-1})$	Biot	$\chi^2$	$R^2$
25	$0,977 \times 10^{-8}$	$4,346 \times 10^{-5}$	22,25	$1,4613 \times 10^{-2}$	0,990194
45	$2,434 \times 10^{-8}$	$1,314 \times 10^{-5}$	2,700	$3,2969 \times 10^{-2}$	0,982795
65	$2,084 \times 10^{-8}$	$3,231 \times 10^{-5}$	7,500	$2,7095 \times 10^{-2}$	0,985770

Os resultados obtidos e expresso nas Tabelas 4.10 e 4.11 que tratam, respectivamente, da perda de água e ganho de sacarose durante o pré-tratamento em solução de sacarose nas diferentes concentrações são condizentes com a literatura no que diz respeito a valores encontrados para a difusividade efetiva de massa para água e sacarose em trabalhos que tratam sobre desidratação osmótica de frutas (RUÍZ LÓPEZ et al., 2011; SILVA et al., 2013d), embora eventuais discrepâncias possam ser atribuídas à utilização de diferentes metodologias e ao tipo, variedade e estágio de maturação da fruta estudada, dentre outros fatores (PORCIUNCULA et al., 2013). Neste trabalho, os valores obtidos para a difusividade efetiva de massa com a condição de contorno de primeiro tipo foram significativamente menores do que aqueles encontrados com a condição de terceiro tipo (que proporcionou um melhor ajuste aos dados experimentais), fato este também verificado para o teor de água durante a desidratação osmótica.

Na Figura 4.8 apreende-se que amostras desidratadas em soluções com maiores concentrações de sacarose apresentam maiores ganhos de açúcares para o mesmo tempo de desidratação, fato este corroborado pelos valores obtidos na Tabela 4.11, que apresenta os valores de difusividade efetiva crescente para amostras tratadas em soluções de 45 e 65 °Brix quando comparados com aquela tratada em soluções de 25 °Brix.

Assim como aconteceu para a perda de água, novamente a utilização da condição de contorno de terceiro tipo permitiu melhores ajustes. Os valores obtidos para o indicador estatístico qui-quadrado foram menores em todas as condições de tratamento enquanto o coeficiente de determinação para todas as amostras apresentou valores maiores quando comparados aos valores expressos na Tabela 4.5 em que se utiliza a condição de contorno de primeiro tipo.

Uma análise das Figuras 4.7 a 4.8 revelam que os resultados experimentais obtidos para os experimentos de desidratação osmótica dos cubos de melão apresentam um comportamento típico para as cinéticas de água e sólidos de frutas encontrados na literatura (MERCALI et al., 2010b; RUÍZ LÓPEZ et al., 2011; SILVA et al., 2013d; AIRES, 2015).

Para as seis otimizações realizadas (três para teor de água e três para o teor de sólidos), no processo de desidratação osmótica, os valores referentes ao número de Biot são relativamente altos, entretanto longe de apresentar valores compatíveis com a condição de primeiro tipo, conforme considerado por vários autores (CONCEIÇÃO et al., 2010; SOUZA et al., 2011; SILVA et al. 2013a). Desta forma, para o melão, a utilização da condição de

contorno de primeiro tipo para resolver a equação de difusão pode ser considerado um erro do modelo, uma vez que a condição de contorno apropriado é do terceiro tipo, como mostrado.

Observa-se ainda nas Tabelas 4.10 e 4.11 que em todos os experimentos o aumento da concentração da solução osmótica acarretou aumento para a difusividade efetiva e que os valores obtidos para a difusividade efetiva de massa de água foram inferiores aqueles relativos a sacarose. Zúñiga e Pedreschi (2011) testaram modelos para prever as condições de equilíbrio do processo de desidratação osmótica de placas de maçãs e, com isso, determinar a difusividade efetiva de massa para água e para a sacarose. Usando o melhor modelo, observou-se que, aumentando-se a concentração de 40 para 50 °Brix ocorreu aumento dos valores obtidos para difusividade efetiva de massa, tanto para água quanto para a sacarose, todavia o aumento foi mais significativo para a sacarose.

#### **4.2.3 Razão do teor de água durante a secagem em estufa**

A seguir temos os gráficos de razão do teor de água dos cubos de 1,0 cm desidratados em solução osmótica nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e submetidos a secagem posterior em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

##### **4.2.3.1 Razão do teor de água de cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetido a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C**

Na Figura 4.9 tem-se os gráficos da razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) para cubos de 1,0 cm de arestas, tratados em solução osmótica na concentração de 25 °Brix e submetido a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Na Tabela B.1, em apêndice a este trabalho, encontram-se os valores referentes aos teores de água (adimensional) das amostras e os respectivos instantes.

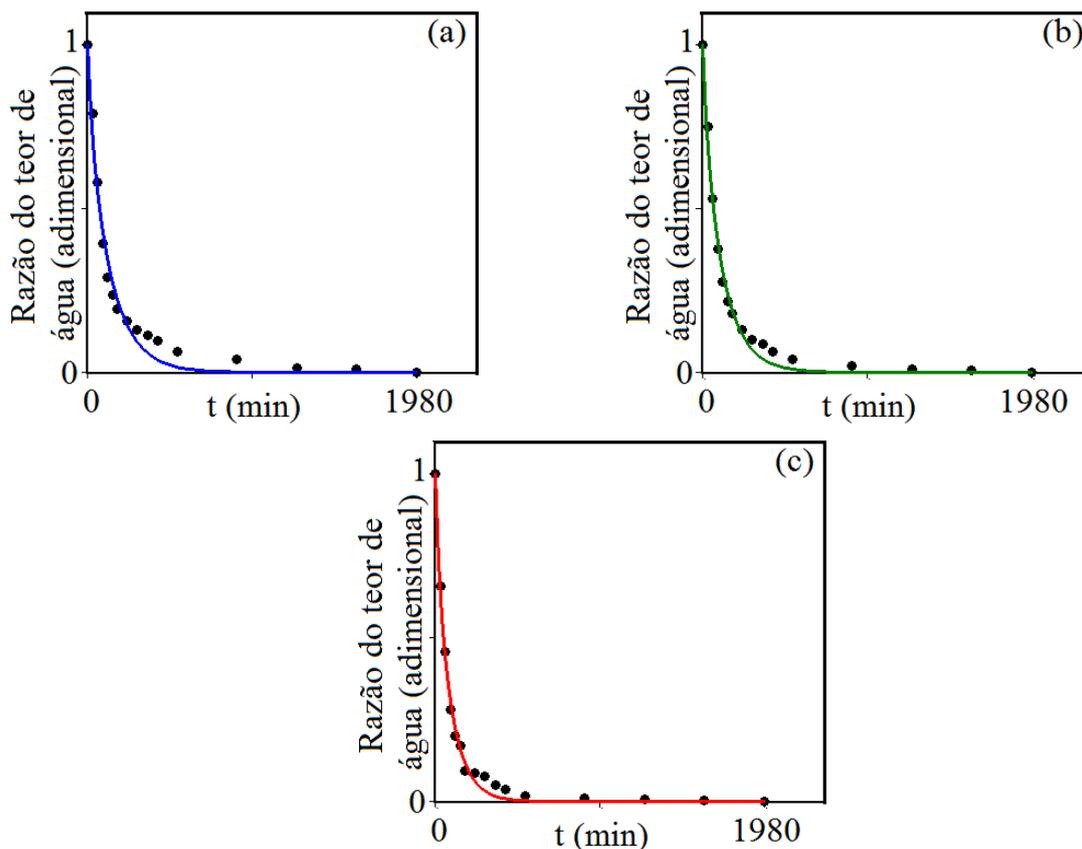


Figura 4.9: Razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) dos cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetido a secagem à temperatura de 50, 60 e 70 °C.

Na Tabela 4.12 encontra-se um resumo com os valores da difusividade efetiva e coeficiente de transferência convectiva da água para amostras com arestas de 1,0 cm, desidratadas em solução osmótica de 25 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Tabela 4.12 – Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante a secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Concentração (°Brix)	$D_{ef} (m^2 \text{ min}^{-1})$	$h (m \text{ min}^{-1})$	Biot	$\chi^2$	$R^2$
50	$3,910 \times 10^{-8}$	$2,834 \times 10^{-5}$	3,625	$2,4449 \times 10^{-2}$	0,9835921
60	$4,761 \times 10^{-8}$	$2,975 \times 10^{-5}$	3,125	$1,1135 \times 10^{-2}$	0,9926118
70	$6,301 \times 10^{-8}$	$3,938 \times 10^{-5}$	12,50	$0,8034 \times 10^{-2}$	0,9944167

Novamente, como aconteceu para o teor de sólidos e teor de água, na desidratação osmótica, a condição de contorno de terceiro tipo mostrou-se mais adequada a descrever a cinética de secagem em estufas das amostras de melão osmodesidratadas, fato este verificado através do número de Biot, coeficiente de transferência convectiva e dos indicadores estatísticos, todos melhores quando a condição de contorno de terceiro tipo é a utilizada.

#### 4.2.3.2 Razão do teor de água de cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 45 °Brix e submetido a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C

Na Figura 4.10 têm-se os gráficos da razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) das amostras com arestas de 1,0 cm. Na Tabela B.1, em apêndice a este trabalho, encontram-se os valores referentes aos teores de água (adimensional) das amostras de melão cortadas em formato de cubos e os respectivos instantes.

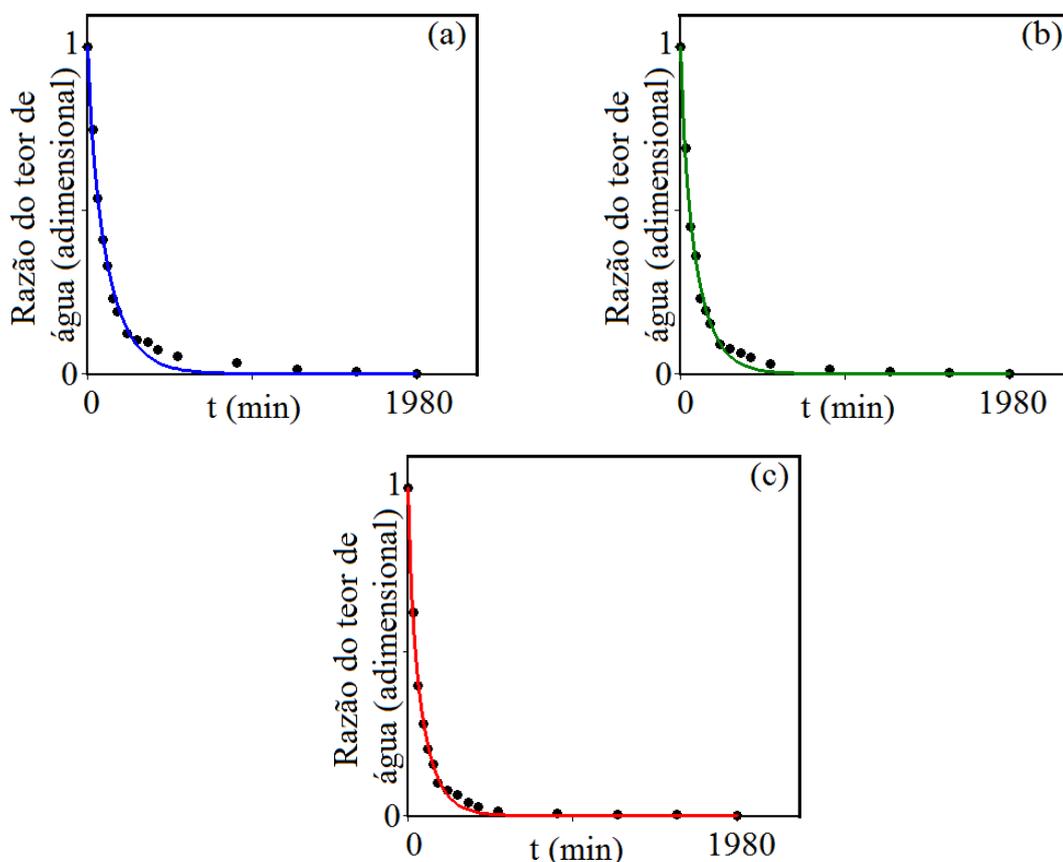


Figura 4.10: Razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) de cubo de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução de sacarose com 45 °Brix e submetido a secagem à temperatura de 50, 60 e 70 °C.

Na Tabela 4.13 encontra-se um resumo com os valores da difusividade efetiva e coeficiente de transferência convectiva da água para amostras com arestas de 1,0 cm, desidratadas em solução osmótica de 45 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, bem como os indicadores estatísticos referentes ao modelo.

Tabela 4.13 – Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante a secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 45 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Temperatura (°C)	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	Biot	$\chi^2$	$R^2$
50	$3,921 \times 10^{-8}$	$3,039 \times 10^{-5}$	3,875	$0,9771 \times 10^{-2}$	0,9936792
60	$4,431 \times 10^{-8}$	$4,099 \times 10^{-5}$	4,625	$0,6679 \times 10^{-2}$	0,9952753
70	$4,665 \times 10^{-8}$	$5,831 \times 10^{-5}$	6,250	$0,3340 \times 10^{-2}$	0,9975688

Analisando os resultados obtidos na Tabela 4.13, assim como ocorrido na Tabela 4.10, infere-se que para amostras desidratadas em soluções osmóticas de mesma concentração o aumento da temperatura de secagem acarretou aumento nos valores tanto da difusividade efetiva de massa da água quanto o coeficiente de transferência convectiva de massa. Assim como verificado na Tabela 4.12 tanto os números de Biot quanto os indicadores estatísticos indicam ser a condição de contorno de terceiro tipo mais apropriada na descrição do processo.

#### 4.2.3.3 Razão do teor de água de cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C

Na Figura 4.11 têm-se os gráficos da razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) das amostras com arestas de 1,0 cm pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix e secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Na Tabela B.1, em apêndice a este trabalho, encontram-se os valores referentes aos teores de água (adimensional) das amostras de melão cortadas em formato de cubos e os respectivos instantes.

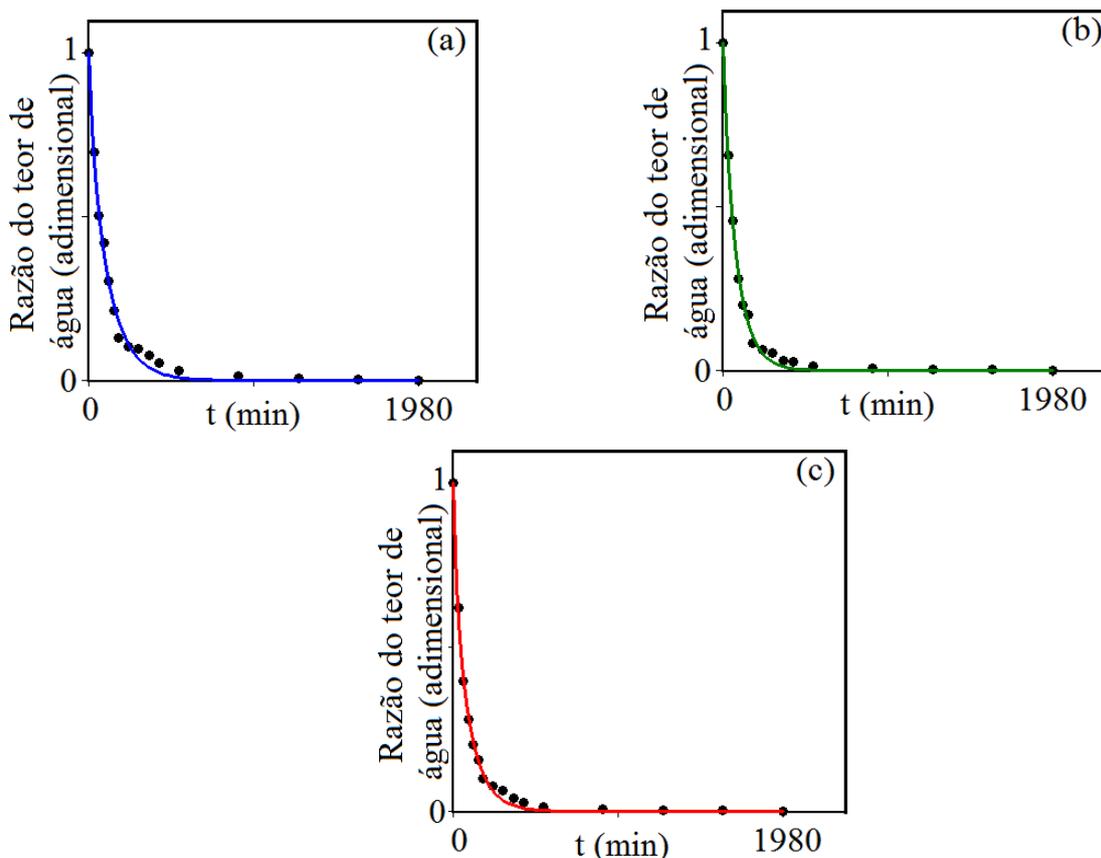


Figura 4.11: Razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) de cubo de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução de sacarose com 65 °Brix e submetido a secagem à temperatura de 50, 60 e 70 °C.

Na Tabela 4.14 encontra-se um resumo com os valores da difusividade efetiva e coeficiente de transferência convectiva da água para amostras com arestas de 1,0 cm, desidratadas em solução osmótica de 65 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Tabela 4.14 – Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante a secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Temperatura (°C)	$D_{ef} (m^2 \text{ min}^{-1})$	$h (m \text{ min}^{-1})$	Biot	$\chi^2$	$R^2$
50	$4,552 \times 10^{-8}$	$3,243 \times 10^{-5}$	3,562	$0,7729 \times 10^{-2}$	0,9944701
60	$9,377 \times 10^{-8}$	$3,282 \times 10^{-5}$	1,750	$0,0398 \times 10^{-2}$	0,9973000
70	$9,884 \times 10^{-8}$	$3,820 \times 10^{-5}$	2,150	$0,0893 \times 10^{-2}$	0,9993613

Através de inspeção visual na Figura 4.9; 4.10 e 4.11 pode-se afirmar que para amostras desidratadas em solução osmótica de mesma concentração quanto maior for a temperatura de secagem na estufa menor o tempo necessário para que se atinja o teor de água de equilíbrio. A temperatura de secagem mais elevada pode acelerar a evaporação das moléculas de água presentes nas amostras, proporcionando assim uma rápida diminuição do teor de unidade do material e de forma direta aumentando o valor que corresponde a difusividade efetiva e coeficiente de transferência convectiva de massa da água (DARVISHI et al., 2015; SINGH e PANDEY, 2012; THUWAPANICHAYANAN et al., 2011; RHIM e LEE, 2011). Fato este que pode ser verificado analisando os resultados obtidos na Tabela 4.14, assim como ocorrido nas Tabelas 4.12 e 4.13 onde pode-se observar que para amostras desidratadas em soluções osmóticas de mesma concentração e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C quanto maior a temperatura de secagem maior os valores atribuídos para a difusividade efetiva e coeficiente de transferência convectiva da massa de água.

Segundo reportado por diversos pesquisadores como Mrkic et al. (2007), Sérgio et al. (2010) e Jurendic (2012) o número de Biot é um número adimensional que relaciona uma medida da taxa de condução de calor interna ou de difusão de massa em sólidos com uma medida da taxa de convecção externa (JURENDIC, 2012; HAGHI e AMANIFARD, 2008). No presente trabalho, em que cubos de melão foram pré-tratados em solução osmótica de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e submetidos a secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, os números de Biot obtidos ficaram entre 1,750 e 12,50; conforme expressos nas Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14, corroborando com a afirmação feita anteriormente de que a melhor condição de contorno para os experimentos realizados é aquela que considera, como regente do processo de transferência de massa não apenas a difusividade efetiva mas, também o coeficiente de transferência convectiva de massa.

Quando comparados os indicadores estatísticos verifica-se das Tabelas 4.4; 4.5 e 4.6 e das Tabelas 4.12; 4.13 e 4.14 que os valores de qui-quadrado obtidos, impondo-se a condição de contorno de primeiro tipo, ficaram entre  $1,3201 \times 10^{-2}$  e  $5,1521 \times 10^{-2}$ , enquanto que os valores quando se utilizada a condição de contorno de terceiro tipo foram consideravelmente menores, entre  $0,0398 \times 10^{-2}$  e  $2,4449 \times 10^{-2}$ . Para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) comportamento similar foi verificado, enquanto que para condição de contorno de primeiro tipo os valores obtidos situavam-se entre 0,963818 e 0,989412, para condição de contorno de

terceiro tipo os valores obtidos situaram-se na faixa de 0,9835921 e 0,9993613, reiterando o melhor ajuste da condição de contorno de terceiro aos dados experimentais obtidos na desidratação osmótica seguida de secagem convectiva de cubos de melão.

**4.2.3.4 Razão do teor de água de cubos com arestas de 1,5; 20 e 2,5 cm, pré-tratados em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior na temperatura de 50 °C**

Na Figura 4.12 têm-se os gráficos da razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) das amostras com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm e pré-tratadas em solução osmótica de sacarose em concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa em temperatura de 50 °C.

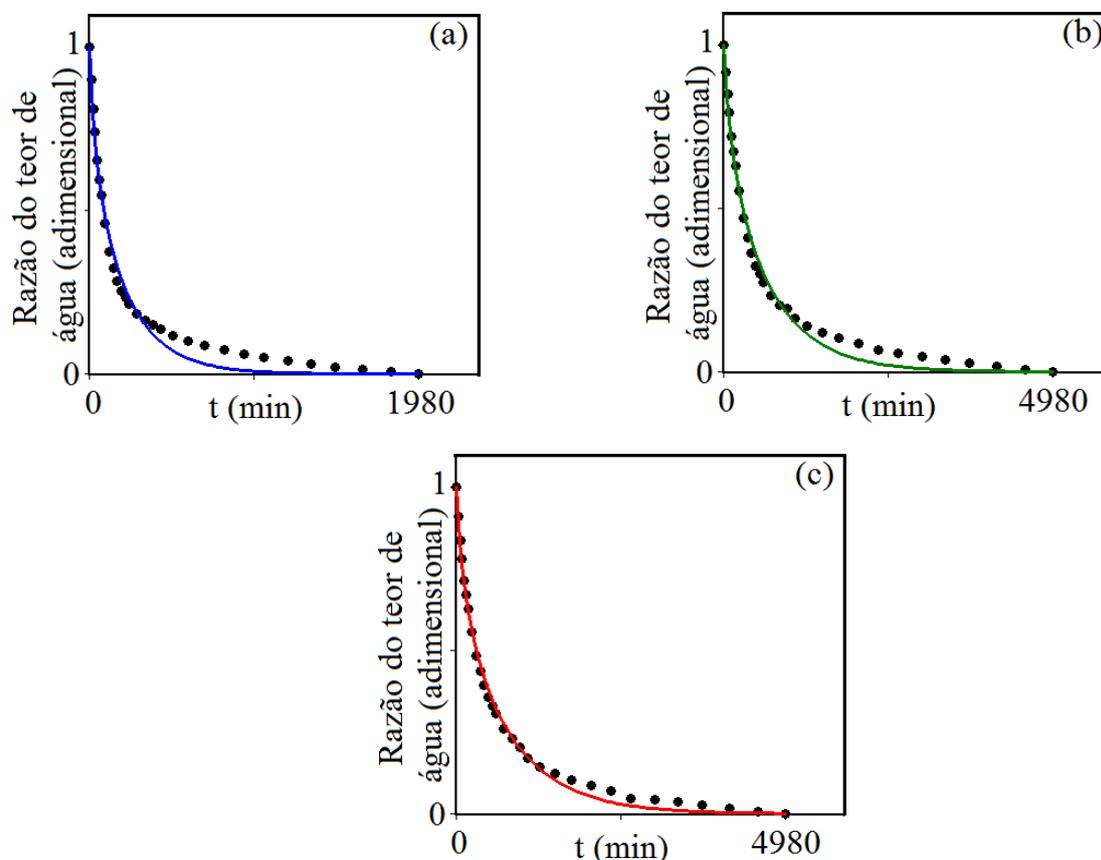


Figura 4.12: Razão do teor de água (adimensional) *versus* tempo (minutos) de cubo de melão com arestas de (a) 1,5 cm, (b) 2,0 cm e (c) 2,5 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, submetido a secagem à temperatura de 50 °C.

Na Tabela 4.15 encontram-se os valores dos coeficientes de difusividade efetiva da água para amostras com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratadas osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetidos à secagem na temperatura de 50 °C.

Tabela 4.15 – Valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) durante a secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.

Dimensões (cm)	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	Biot	$\chi^2$	$R^2$
1,5	$1,612 \times 10^{-8}$	$2,257 \times 10^{-5}$	10,50	$3,6120 \times 10^{-2}$	0,987905
2,0	$2,406 \times 10^{-8}$	$1,985 \times 10^{-5}$	8,250	$2,4884 \times 10^{-2}$	0,992122
2,5	$3,093 \times 10^{-8}$	$2,846 \times 10^{-5}$	11,50	$1,1707 \times 10^{-2}$	0,996176

Analisando-se os dois modelos de difusão, observa-se que, para todas as condições estudadas, tanto de desidratação osmótica como secagem em estufa, as curvas de secagem obtidas quando se utiliza a condição de contorno do terceiro tipo se ajustaram melhor aos dados experimentais quando comparadas as curvas obtidas com a condição de contorno do primeiro tipo, fato este percebido por meio dos indicadores estatísticos qui-quadrado e  $R^2$ .

Em se tratando dos valores obtidos para a difusividade efetiva da água percebe-se, de acordo com os dados expressos na Tabela 4.15 que quanto maior a aresta maior o valor da difusividade efetiva, enquanto que para amostra com aresta de 1,5 cm a difusividade efetiva apresentada foi de  $1,612 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , para amostras com arestas de 2,0 e 2,5 cm, os valores obtidos foram  $2,406 \times 10^{-8}$  e  $3,093 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , respectivamente. Fato idêntico é relatado por Darvishi et al. (2015) ao realizar secagem com fatias de melão cortados nas espessuras de 2,0; 3,0 e 6,0 mm, sendo que não foi realizado tratamento preliminar, mas apenas a secagem em estufa. Considerando-se os dados referentes a temperatura de secagem de 50 °C, a mesma temperatura que realizamos a secagem dos cubos de melão neste trabalho, os valores obtidos para a difusividade efetiva de massa de água foram  $0,333 \times 10^{-10}$ ;  $1,637 \times 10^{-10}$  e  $3,289 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , respectivamente, para amostras com espessuras de 2,0; 3,0 e 6,0 mm. Embora tenhamos diferenças nas condições de processamento, pré-tratamento e estágio de maturação entre os frutos utilizados nestes trabalhos pode-se verificar que existe um

comportamento similar, de que quanto maior a superfície do material maior os valores atribuídos para o a difusividade efetiva, isto para os casos em que se utiliza da condição de contorno de terceiro tipo.

Fato análogo ao que ocorreu com a difusividade nota-se com o coeficiente de transferência convectiva, quando se aumenta o tamanho da aresta segue-se um aumento nos valores obtidos para esta grandeza. Os valores obtidos por Darvishi et al. (2015) para esta grandeza foram:  $2,65 \times 10^{-9}$ ;  $4,14 \times 10^{-9}$  e  $7,87 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , respectivamente, para amostras com 2,0; 3,0 e 6,0 mm de espessura. É oportuno enfatizar que embora não tenha ocorrido o mesmo comportamento descrito para amostras com aresta de 2,0 cm, uma possível justificativa para o ocorrido seja a camada de onde foi retirada a amostra analisada, se do epicarpo, mesocarpo ou endocarpo.

### **4.3 Cinética de desidratação osmótica e secagem em estufa utilizando o algoritmo desenvolvido neste trabalho – Condição de contorno de primeiro tipo**

Para descrever a perda de água, bem como o ganho de soluto, suas propriedades térmicas e físicas devem ser conhecidas. Se a condição de contorno da equação de condução de calor é do primeiro tipo, o processo é regulado pela difusividade efetiva de massa ( $D_{ef}$ ). Normalmente, esta propriedade é determinada pelo ajuste da solução analítica com apenas o primeiro termo da série para um conjunto de dados experimentais do teor de água e sólidos em função do tempo. Neste caso, o valor obtido para difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) contém erros devido à consideração de apenas um termo e a inserção dos primeiros pontos experimentais no ajuste. Assim sendo nesta secção apresentaremos os dados obtidos implantando-se o algoritmo desenvolvido conforme explicitado no Capítulo 3 deste trabalho, algoritmo que se utiliza de uma técnica baseada na remoção ótima de pontos experimentais para minimizar erros na determinação da difusividade efetiva mantendo-se a maior quantidade de informação estatística possível.

A fim de validar a ferramenta analítica desenvolvida neste trabalho, utilizou-se os dados referentes a desidratação osmótica e secagem do melão cortado em formato de cubo, os resultados obtidos pelo algoritmo serão comparados com os resultados obtidos quando se utiliza o *Software Prescribed* que também utiliza a condição de contorno de primeiro tipo.

**4.3.1 Simulação da quantidade de água das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm**

A Tabela 4.16, a seguir, apresenta os valores obtidos para o parâmetro  $A$ , a difusividade efetiva da água ( $D_{ef}$ ) e o valor do indicador estatístico qui-quadrado ( $\chi^2$ ). Em apêndice a este trabalho, na Tabela A.2, encontram-se os valores utilizado na regressão não-linear.

Tabela 4.16 – Valores do parâmetro  $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

Concentração	Pontos removidos	$A(\text{min}^{-1})$	$D_{ef}(\text{m}^2 \text{min}^{-1})$	$\chi^2$
25 °Brix	0	$1,183857 \times 10^{-3}$	$3,998 \times 10^{-9}$	$4,5849 \times 10^{-2}$
	1	$1,183857 \times 10^{-3}$	$3,998 \times 10^{-9}$	$4,5672 \times 10^{-2}$
	2	$1,198356 \times 10^{-3}$	$4,047 \times 10^{-9}$	$4,3634 \times 10^{-2}$
	3	$1,224905 \times 10^{-3}$	$4,137 \times 10^{-9}$	$3,9994 \times 10^{-2}$
	4	$1,273060 \times 10^{-3}$	$4,300 \times 10^{-9}$	$3,4682 \times 10^{-2}$
	5	$1,310413 \times 10^{-3}$	$4,426 \times 10^{-9}$	$3,1614 \times 10^{-2}$
	6	$1,367669 \times 10^{-3}$	$4,619 \times 10^{-9}$	$2,8526 \times 10^{-2}$
	7	$1,410164 \times 10^{-3}$	$4,763 \times 10^{-9}$	$2,7378 \times 10^{-2}$
	8	$1,432261 \times 10^{-3}$	$4,837 \times 10^{-9}$	$2,7135 \times 10^{-2}$
	<b>9</b>	<b><math>1,443361 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>4,875 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>2,7100 \times 10^{-2}</math></b>
	10	$1,422477 \times 10^{-3}$	$4,804 \times 10^{-9}$	$2,7214 \times 10^{-2}$
45 °Brix	0	$1,858249 \times 10^{-3}$	$6,276 \times 10^{-9}$	$6,8152 \times 10^{-2}$
	1	$1,858249 \times 10^{-3}$	$6,276 \times 10^{-9}$	$6,8153 \times 10^{-2}$
	2	$1,899908 \times 10^{-3}$	$6,417 \times 10^{-9}$	$6,5773 \times 10^{-2}$
	3	$2,044159 \times 10^{-3}$	$6,904 \times 10^{-9}$	$6,1225 \times 10^{-2}$
	<b>4</b>	<b><math>2,094263 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>7,073 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>6,0853 \times 10^{-2}</math></b>
	5	$2,178416 \times 10^{-3}$	$7,357 \times 10^{-9}$	$6,1371 \times 10^{-2}$

Concentração	Pontos removidos	$A(\text{min}^{-1})$	$D_{ef} (\text{m}^2 \text{min}^{-1})$	$\chi^2$
65 °Brix	0	$2,015903 \times 10^{-3}$	$6,808 \times 10^{-9}$	$10,320 \times 10^{-2}$
	1	$2,015903 \times 10^{-3}$	$6,808 \times 10^{-9}$	$10,320 \times 10^{-2}$
	2	$2,070967 \times 10^{-3}$	$6,994 \times 10^{-9}$	$9,9086 \times 10^{-2}$
	3	$2,171267 \times 10^{-3}$	$7,333 \times 10^{-9}$	$9,5314 \times 10^{-2}$
	4	$2,237032 \times 10^{-3}$	$7,555 \times 10^{-9}$	$9,1078 \times 10^{-2}$
	<b>5</b>	<b><math>2,281293 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>7,705 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>8,9931 \times 10^{-2}</math></b>
	6	$2,356321 \times 10^{-3}$	$7,958 \times 10^{-9}$	$9,0816 \times 10^{-2}$

Para amostra desidratada em solução osmótica na concentração de 25 °Brix ao serem suprimidos os 9 primeiros valores, observa-se na Tabela 4.16, que o qui-quadrado assume seu menor valor;  $2,7100 \times 10^{-2}$ . Para esta situação de mínimo, a difusividade efetiva da água assume o valor de  $4,875 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ . Comparando-se estes resultados com àqueles obtidos utilizando-se o *software Prescribed* que foram de  $2,7099 \times 10^{-2}$  para o qui-quadrado e difusividade efetiva  $4,8797 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , a discrepância entre os valores obtidos foi -0,004% conforme visto logo abaixo. O que pode ser considerado uma discrepância pequena, assegurando, para este caso, a eficiência do otimizador.

$$\text{discrepância} = \frac{2,7099 \times 10^{-2} - 2,7100 \times 10^{-2}}{2,7099 \times 10^{-2}} = -0,004\%$$

Outro fator que merece destaque com relação ao otimizador é o ganho de tempo quando comparado ao *software Prescribed*. Enquanto o *Prescribed* necessitou de, aproximadamente, 1 minuto e 25 segundos, o otimizador desenvolvido realizou a mesma tarefa em um período de tempo consideravelmente menor, aproximadamente, 9,3 segundos.

Já para amostra tratada em solução de 45 °Brix, observa-se que o qui-quadrado assume seu menor valor,  $\chi^2 = 6,0833 \times 10^{-2}$ , quando retirados os quatro primeiros pontos experimentais obtidos. Para esta situação de mínimo, o valor da difusividade efetiva foi  $7,073 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ . A discrepância entre os valores obtidos pelo *Prescribed* e o otimizador desenvolvido neste trabalho foi de -0,003 %. Com relação ao tempo necessário para obtenção de resposta o *Prescribed* necessitou de 1 minuto e 30 segundos, enquanto que o otimizador

desenvolvido realizou a mesma tarefa em um período de tempo consideravelmente menor, de aproximadamente 10,36 segundos.

Já para amostra tratada em solução de 65 °Brix após a remoção do quinto ponto obtido experimentalmente, observa-se que o qui-quadrado assume seu menor valor,  $\chi^2 = 8,9931 \times 10^{-2}$ . Sendo que para esta situação de mínimo, o valor da difusividade efetiva obtido foi  $7,705 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ . Já quando se utilizou o *Prescribed* para o mesmo conjunto de dados obteve qui-quadrado de  $8,8612 \times 10^{-2}$  e difusividade efetiva de  $8,126 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ . Sendo a discrepância entre os valores do qui-quadrado igual a -1,488 %. Com relação ao tempo de resposta enquanto o *Prescribed* necessitou de 2 minutos e 14 segundos para fornecer os resultados o otimizador desenvolvido necessitou, novamente, de apenas 10,60 segundos.

#### 4.3.2 Simulação da quantidade de sólidos das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm

A Tabela 4.17, a seguir, apresenta os valores obtidos para o parâmetro  $A$ , a difusividade efetiva da água ( $D_{ef}$ ) e o valor do indicador estatístico qui-quadrado ( $\chi^2$ ). Em apêndice a este trabalho, na Tabela A.2, encontram-se os valores utilizado na regressão não-linear.

Tabela 4.17 – Valores do parâmetro  $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) durante o ganho de sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

Concentração	Pontos removidos	$A(\text{min}^{-1})$	$D_{ef}(\text{m}^2 \text{ min}^{-1})$	$\chi^2$
25 °Brix	0	$1,844731 \times 10^{-3}$	$6,230 \times 10^{-9}$	$3,2747 \times 10^{-2}$
	1	$1,844731 \times 10^{-3}$	$6,230 \times 10^{-9}$	$3,2747 \times 10^{-2}$
	2	$1,872838 \times 10^{-3}$	$6,325 \times 10^{-9}$	$3,0904 \times 10^{-2}$
	3	$1,922762 \times 10^{-3}$	$6,494 \times 10^{-9}$	$2,8174 \times 10^{-2}$
	4	$2,030081 \times 10^{-3}$	$6,856 \times 10^{-9}$	$2,4426 \times 10^{-2}$
	<b>5</b>	<b><math>2,147720 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>7,254 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>2,3193 \times 10^{-2}</math></b>
	6	$2,222289 \times 10^{-3}$	$7,505 \times 10^{-9}$	$2,3741 \times 10^{-2}$

Tabela 4.17 (Continuação)

Concentração	Pontos removidos	$A(\text{min}^{-1})$	$D_{ef}(\text{m}^2 \text{min}^{-1})$	$\chi^2$
45 °Brix	0	$1,810711 \times 10^{-3}$	$6,115 \times 10^{-9}$	$10,2001 \times 10^{-2}$
	1	$1,810711 \times 10^{-3}$	$6,115 \times 10^{-9}$	$10,2001 \times 10^{-2}$
	2	$1,847648 \times 10^{-3}$	$6,240 \times 10^{-9}$	$10,2001 \times 10^{-2}$
	3	$1,920597 \times 10^{-3}$	$6,486 \times 10^{-9}$	$10,0763 \times 10^{-2}$
	<b>4</b>	<b><math>2,059283 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>6,955 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>9,9427 \times 10^{-2}</math></b>
	5	$2,199472 \times 10^{-3}$	$7,428 \times 10^{-9}$	$10,0424 \times 10^{-2}$
65 °Brix	0	$2,680122 \times 10^{-3}$	$9,052 \times 10^{-9}$	$5,8691 \times 10^{-2}$
	1	$2,680122 \times 10^{-3}$	$9,052 \times 10^{-9}$	$5,8691 \times 10^{-2}$
	2	$2,782540 \times 10^{-3}$	$9,398 \times 10^{-9}$	$5,5198 \times 10^{-2}$
	3	$2,959870 \times 10^{-3}$	$9,996 \times 10^{-9}$	$5,1738 \times 10^{-2}$
	<b>4</b>	<b><math>3,104668 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>10,486 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>5,0993 \times 10^{-2}</math></b>
	5	$3,199297 \times 10^{-3}$	$1,0805 \times 10^{-8}$	$5,1375 \times 10^{-2}$

Assim como aconteceu para a perda de água os valores obtidos para o indicador estatístico qui-quadrado mostram-se coerentes e bem próximo aos que foram obtidos utilizando o *Prescribed*. A amostra desidratada em solução osmótica na concentração de 25 °Brix obteve, para ganho de sólidos, o menor qui-quadrado, com valor de  $2,3193 \times 10^{-2}$ , após a retirada dos 5 primeiros pontos experimentais, para este mínimo a difusividade efetiva de massa de sólidos obtido foi  $7,254 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ . Já para esta mesma situação o *Prescribed* apresentou valores de  $2,319 \times 10^{-2}$  e  $7,238 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , respectivamente, para o qui-quadrado e para difusividade efetiva de massa de sólidos. A discrepância entre os valores obtidos para o qui-quadrado nesta situação foi de -0,012 % e o tempo necessário para obtenção de respostas no *Prescribed* foi de 2 minutos e 50 segundos para fornecer os resultados, enquanto que o otimizador desenvolvido necessitou, novamente, de menos de 11 segundos.

Para amostra tratadas a 45 °Brix, obteve-se, para ganho de sólidos, o menor qui-quadrado, com valor de  $9,9427 \times 10^{-2}$ , após a retirada dos 4 primeiros pontos experimentais, para este mínimo a difusividade efetiva de massa de sólidos obtido foi  $6,955 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , enquanto para o *Prescribed* os valores foram  $9,9267 \times 10^{-2}$  e  $6,610 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , respectivamente, para o indicador estatístico e para a difusividade efetiva de massa de

sacarose. O tempo necessário para obtenção de respostas no *Prescribed* foi de 1 minuto e 32 segundos para fornecer os resultados o otimizador desenvolvido necessitou, de apenas 10,41 segundos, aproximadamente. A discrepância entre os indicadores estatísticos, novamente apresentou um valor pequeno, igual a -0,161 %.

Para amostra pré-tratada em solução osmótica com concentração de 65 °Brix o menor valor apresentado para o qui-quadrado foi verificado ao desconsiderar, assim como no caso anterior, os 4 primeiros pontos obtidos experimentalmente. Com valores de  $10,486 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  e  $5,0993 \times 10^{-2}$  para difusividade efetiva de massa e qui-quadrado, respectivamente. Enquanto que no *Prescribed* os valores foram  $10,459 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  e  $5,0991 \times 10^{-2}$ , com discrepância de -0,003% entre os valores obtidos para o indicador estatístico qui-quadrado. O tempo necessário para obtenção de respostas no *Prescribed* foi de 2 minutos e 30 segundos para fornecer os resultados o otimizador desenvolvido necessitou, novamente, de apenas 11,30 segundos.

### 4.3.3 Simulação da quantidade de água durante a secagem em estufa

A realização de regressão não-linear aos dados da Tabela B.1, em apêndice a este trabalho, possibilita determinar o parâmetro  $A$ , difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e o indicador estatístico, qui-quadrado ( $\chi^2$ ).

#### 4.3.3.1 Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C

Tem-se na Tabela 4.18 os valores referentes ao parâmetro  $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) das amostras desidratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetidas a secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Tabela 4.18 – Valores do parâmetro  $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) das amostras desidratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e secagem posterior a 50, 60 e 70 °C.

Temperatura	Pontos removidos	$A(\text{min}^{-1})$	$D_{ef}(\text{m}^2 \text{min}^{-1})$	$\chi^2$
50 °C	0	$4,110313 \times 10^{-3}$	$1,389 \times 10^{-8}$	$5,2935 \times 10^{-2}$
	1	$4,113123 \times 10^{-3}$	$1,389 \times 10^{-8}$	$5,2935 \times 10^{-2}$
	<b>2</b>	<b><math>4,397345 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>1,485 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>5,1555 \times 10^{-2}</math></b>
	3	$4,738963 \times 10^{-3}$	$1,600 \times 10^{-8}$	$5,4435 \times 10^{-2}$
60 °C	0	$4,745351 \times 10^{-3}$	$1,603 \times 10^{-8}$	$3,8001 \times 10^{-2}$
	1	$4,745532 \times 10^{-3}$	$1,603 \times 10^{-8}$	$3,8001 \times 10^{-2}$
	<b>2</b>	<b><math>5,081012 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>1,716 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>3,7319 \times 10^{-2}</math></b>
	3	$5,433023 \times 10^{-3}$	$1,835 \times 10^{-8}$	$4,0311 \times 10^{-2}$
70 °C	0	$6,586645 \times 10^{-3}$	$2,224 \times 10^{-08}$	$2,6533 \times 10^{-2}$
	<b>1</b>	<b><math>6,586645 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>2,224 \times 10^{-08}</math></b>	<b><math>2,6531 \times 10^{-2}</math></b>
	2	$7,120234 \times 10^{-3}$	$2,405 \times 10^{-08}$	$2,6739 \times 10^{-2}$

Conforme apresentado na Tabela 4.18, tanto para temperatura de 50 °C quanto 60 °C ao suprimir os dois primeiros valores experimentalmente obtidos foi atingido o valor mínimo do qui-quadrado com  $5,1555 \times 10^{-2}$  e  $3,7311 \times 10^{-2}$ , respectivamente, e para estes mínimos os valores de difusividade efetiva foram  $1,485 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  e  $1,716 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ . Já para a temperatura de tratamento de 70 °C foi necessário supressão de apenas um ponto obtendo-se assim, valor para qui-quadrado, de  $2,6531 \times 10^{-2}$  e difusividade efetiva de  $2,224 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ . Para esta mesma condição os valores obtidos pelo *Prescribed* foram muito próximos, com difusividade efetiva de  $1,472 \times 10^{-8}$ ;  $1,678 \times 10^{-8}$  e  $2,303 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , respectivamente e qui-quadrado de  $5,1521 \times 10^{-2}$ ;  $3,7120 \times 10^{-2}$  e  $2,6100 \times 10^{-2}$  respectivamente, para temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C.

As discrepâncias entre o *Prescribed* e o algoritmo desenvolvido neste trabalho, continuam pequenas, sendo, em média, -0,746 % para amostras osmodesidratadas em solução osmótica na concentração de 25 °Brix e temperaturas de secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Permitindo afirmar que os dados obtidos por meio do algoritmo proposto são satisfatórios. Com relação aos tempos necessários, o algoritmo desenvolvido neste

trabalho continua entregando os resultados em um espaço de tempo inferior. Enquanto o *Prescribed* necessitou de, aproximadamente, 1 minuto e 27 segundos, para temperatura de secagem de 50 °C, 3 minutos e 45 segundos para temperatura de secagem de 60 °C e 4,0 minutos para temperatura de 70 °C, o algoritmo forneceu as mesmas informações em, aproximadamente, 11 segundos.

#### 4.3.3.2 Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 45 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C

Estão expressos na Tabela 4.19 os valores referentes ao parâmetro  $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) das amostras desidratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetidos a secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Tabela 4.19 – Valores do parâmetro  $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) das amostras desidratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e secagem posterior a 50, 60 e 70 °C.

Temperatura	Pontos removidos	$A(\text{min}^{-1})$	$D_{ef}(\text{m}^2 \text{min}^{-1})$	$\chi^2$
50 °C	0	$4,378294 \times 10^{-3}$	$1,479 \times 10^{-8}$	$3,4630 \times 10^{-2}$
	1	$4,378294 \times 10^{-3}$	$1,479 \times 10^{-8}$	$3,4630 \times 10^{-2}$
	<b>2</b>	<b><math>4,650349 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>1,571 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>3,3422 \times 10^{-2}</math></b>
	3	$4,929218 \times 10^{-3}$	$1,665 \times 10^{-8}$	$3,5133 \times 10^{-2}$
60 °C	0	$5,656874 \times 10^{-3}$	$1,910 \times 10^{-8}$	$2,4218 \times 10^{-2}$
	1	$5,656874 \times 10^{-3}$	$1,910 \times 10^{-8}$	$2,4218 \times 10^{-2}$
	<b>2</b>	<b><math>6,066567 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>2,049 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>2,3686 \times 10^{-2}</math></b>
	3	$6,358453 \times 10^{-3}$	$2,147 \times 10^{-8}$	$2,5372 \times 10^{-2}$
70 °C	0	$7,048356 \times 10^{-3}$	$2,380 \times 10^{-8}$	$1,3812 \times 10^{-2}$
	1	$7,048356 \times 10^{-3}$	$2,380 \times 10^{-8}$	$1,3812 \times 10^{-2}$
	<b>2</b>	<b><math>7,584786 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>2,562 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>1,3512 \times 10^{-2}</math></b>
	3	$7,931456 \times 10^{-3}$	$2,679 \times 10^{-8}$	$1,5050 \times 10^{-2}$

Assim como verificado para amostras desidratadas em 25 °Brix constatou-se que, quanto maior a temperatura maior a difusividade efetiva para água. Para amostras tratadas em solução osmótica na concentração de 45 °Brix os valores obtidos pelo *Prescribed* foram respectivamente, para difusividade efetiva  $1,561 \times 10^{-8}$ ;  $1,998 \times 10^{-8}$  e  $2,484 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  e para o qui-quadrado  $3,3405 \times 10^{-2}$ ;  $2,3452 \times 10^{-2}$  e  $1,3201 \times 10^{-2}$ . Já ao utilizar o otimizador desenvolvido neste trabalho os valores foram próximos, conforme Tabela 4.19, tendo para difusividade  $1,571 \times 10^{-8}$ ,  $2,049 \times 10^{-8}$  e  $2,562 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  e para o indicador estatístico  $3,3422 \times 10^{-2}$ ;  $2,3686 \times 10^{-2}$  e  $1,3512 \times 10^{-2}$ , Após a supressão dos dois primeiros pontos experimentais. Sendo que a discrepância entre os valores obtidos para o qui-quadrado foi de, aproximadamente, -1,134 %, em média. Com relação ao tempo necessário pra obtenção dos resultados enquanto o *Prescribed* levou, em média, 4 minutos e 16 segundos, o otimizador desenvolvido necessitou de apenas 11 segundos, em média.

#### 4.3.3.3 Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C

Estão expressos na Tabela 4.20 os valores referentes ao parâmetro  $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) das amostras desidratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetidos a secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Os valores que foram usados na regressão não-linear para tais determinações podem ser verificados na Tabela B.1, em apêndice a este trabalho.

Tabela 4.20 – Valores do parâmetro  $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) das amostras desidratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e secagem posterior a 50, 60 e 70 °C.

Temperatura	Pontos removidos	$A(\text{min}^{-1})$	$D_{ef}(\text{m}^2 \text{ min}^{-1})$	$\chi^2$
50 °C	0	$4,992475 \times 10^{-3}$	$1,728 \times 10^{-8}$	$3,0603 \times 10^{-2}$
	1	$4,992475 \times 10^{-3}$	$1,728 \times 10^{-8}$	$3,0603 \times 10^{-2}$
	2	<b><math>5,289507 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>1,831 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>3,0218 \times 10^{-2}</math></b>

Tabela 4.20 (Continuação)

Temperatura	Pontos removidos	$A(\text{min}^{-1})$	$D_{ef}(\text{m}^2 \text{min}^{-1})$	$\chi^2$
50 °C	3	$5,594873 \times 10^{-3}$	$1,9393 \times 10^{-8}$	$3,2504 \times 10^{-2}$
	0	$6,883034 \times 10^{-3}$	$2,325 \times 10^{-8}$	$2,8740 \times 10^{-2}$
60 °C	<b>1</b>	<b><math>6,883893 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>2,325 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>2,8748 \times 10^{-2}</math></b>
	2	$7,459341 \times 10^{-3}$	$2,519 \times 10^{-8}$	$2,9599 \times 10^{-2}$
	3	$8,144234 \times 10^{-3}$	$2,751 \times 10^{-8}$	$3,5509 \times 10^{-2}$
70 °C	0	$7,656457 \times 10^{-3}$	$2,586 \times 10^{-8}$	$2,1999 \times 10^{-2}$
	<b>1</b>	<b><math>7,656353 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>2,586 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>2,1990 \times 10^{-2}</math></b>
	2	$8,304235 \times 10^{-3}$	$2,805 \times 10^{-8}$	$2,2943 \times 10^{-2}$
	3	$9,008045 \times 10^{-3}$	$3,042 \times 10^{-8}$	$2,8112 \times 10^{-2}$

Ao serem removidos os 2 primeiros pontos, observa-se na Tabela 4.20 que o qui-quadrado assume seu menor valor, que foi  $3,0218 \times 10^{-2}$ . Para esta situação de mínimo, o valor da difusividade obtida foi  $1,8314 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  para amostra submetida a secagem posterior na temperatura de 50 °C. Para amostra tratada a 60 °C obteve-se o mínimo quando suprimiu-se o primeiro valor experimental. Nesta simulação o menor qui-quadrado obtido foi  $2,8748 \times 10^{-2}$  e para este mínimo o valor da difusividade foi  $2,325 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ . Fato similar aconteceu com a amostra submetidas a 70 °C onde o menor valor de qui-quadrado foi de  $2,1990 \times 10^{-2}$  e difusividade de  $2,586 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , todos os valores muito próximos daqueles obtidos pelo *Prescribed* que para realizar tal tarefa necessitou de, aproximadamente, 2 minutos e 36 segundos, em média, enquanto que o otimizador desenvolvido novamente necessitou de 10 segundos. Com discrepância média dos valores obtidos para o qui-quadrado de, apenas, -0,613 %.

#### 4.3.3.4 Simulação da razão do teor de água de cubos com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratados em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior na temperatura de 50 °C

Estão expressos na Tabela 4.21 os valores referentes ao parâmetro  $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) das amostras de cubos de melão com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm e desidratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetidos a

secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C. Os valores que foram usados na regressão não-linear para tais determinações podem ser verificados na Tabela G.1, em apêndice a este trabalho.

Tabela 4.21 – Valores do parâmetro  $A$ , da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) das amostras com arestas de dimensões de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, desidratada em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e secagem posterior a 50 °C.

Dimensão	Pontos removidos	$A(\text{min}^{-1})$	$D_{ef}(\text{m}^2 \text{min}^{-1})$	$\chi^2$
1,5 cm	0	$1,115184 \times 10^{-3}$	$3,766 \times 10^9$	$8,0349 \times 10^{-2}$
	1	$1,115184 \times 10^{-3}$	$3,766 \times 10^9$	$8,0349 \times 10^{-2}$
	2	$1,130543 \times 10^{-3}$	$3,819 \times 10^9$	$7,8115 \times 10^{-2}$
	3	$1,156974 \times 10^{-3}$	$3,908 \times 10^9$	$7,4889 \times 10^{-2}$
	4	$1,191188 \times 10^{-3}$	$4,023 \times 10^9$	$7,1839 \times 10^{-2}$
	5	$1,226386 \times 10^{-3}$	$4,142 \times 10^9$	$7,0174 \times 10^{-2}$
	<b>6</b>	<b><math>1,263236 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>4,266 \times 10^9</math></b>	<b><math>6,9778 \times 10^{-2}</math></b>
	7	$1,301385 \times 10^{-3}$	$4,395 \times 10^9$	$7,0668 \times 10^{-2}$
2,0 cm	0	$0,843878 \times 10^{-3}$	$2,850 \times 10^9$	$8,5953 \times 10^{-2}$
	1	$0,843878 \times 10^{-3}$	$2,850 \times 10^9$	$8,5953 \times 10^{-2}$
	2	$0,852280 \times 10^{-3}$	$2,878 \times 10^9$	$8,4147 \times 10^{-2}$
	3	$0,867168 \times 10^{-3}$	$2,929 \times 10^9$	$8,1389 \times 10^{-2}$
	4	$0,887264 \times 10^{-3}$	$2,997 \times 10^9$	$7,8515 \times 10^{-2}$
	5	$0,909734 \times 10^{-3}$	$3,072 \times 10^9$	$7,6378 \times 10^{-2}$
	<b>6</b>	<b><math>0,935509 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>3,159 \times 10^9</math></b>	<b><math>7,5223 \times 10^{-2}</math></b>
	7	$0,963912 \times 10^{-3}$	$3,255 \times 10^9$	$7,5410 \times 10^{-2}$
2,5 cm	0	$0,789638 \times 10^{-3}$	$2,667 \times 10^9$	$6,2305 \times 10^{-2}$
	1	$0,789638 \times 10^{-3}$	$2,667 \times 10^9$	$6,2305 \times 10^{-2}$
	2	$0,796643 \times 10^{-3}$	$2,690 \times 10^9$	$6,0517 \times 10^{-2}$
	3	$0,808626 \times 10^{-3}$	$2,731 \times 10^9$	$5,7803 \times 10^{-2}$
	4	$0,824597 \times 10^{-3}$	$2,785 \times 10^9$	$5,4827 \times 10^{-2}$
	5	$0,842688 \times 10^{-3}$	$2,846 \times 10^9$	$5,2292 \times 10^{-2}$
	6	$0,862955 \times 10^{-3}$	$2,914 \times 10^9$	$5,0436 \times 10^{-2}$

Tabela 4.21 (Continuação)

Dimensão	Pontos removidos	$A(\text{min}^{-1})$	$D_{ef}(\text{m}^2 \text{min}^{-1})$	$\chi^2$
2,5 cm	7	<b><math>0,885223 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>2,989 \times 10^9</math></b>	<b><math>4,9506 \times 10^{-2}</math></b>
	8	$0,907945 \times 10^{-3}$	$3,066 \times 10^9$	$4,9664 \times 10^{-2}$

Verifica-se, através dos valores expressos na Tabela 4.21 que, para amostra com aresta de 1,5 cm, o menor valor de qui-quadrado foi atribuído após a supressão dos primeiros 6 pontos experimentais e foi  $6,9778 \times 10^{-2}$ , para este mínimo obteve-se difusividade de  $4,266 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ . Enquanto que para amostra com aresta de 2,0 cm o menor valor do qui-quadrado foi  $7,5223 \times 10^{-2}$ , obtido quando removeu-se os 6 primeiros pontos, e para este mínimo a difusividade foi de  $3,159 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ . Já para amostra com aresta de 2,5 cm o valor mínimo de qui-quadrado foi  $4,9506 \times 10^{-2}$  com difusividade de  $2,989 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  após a remoção dos 7 primeiros pontos. Sendo estes os valores que melhor representam a cinética de secagem em estufa, na temperatura de 50 °C, para amostras previamente desidratadas osmoticamente em solução de sacarose, com concentração de 65 °Brix, cortadas no formato de cubos, com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm. A discrepância entre os valores obtidos pelo *Prescribed* e o otimizador desenvolvido conforme descrito neste trabalho foi, em média, -0,102 %.

É válido salientar que a técnica utilizada e reportada na literatura é usualmente logaritmo aplicado sobre a expressão da temperatura, teor de água ou teor de sólidos, adimensional, em que apenas a porção linear é usada para determinação da difusividade efetiva através de regressão linear, conforme reportado por Markowski et al. (2004), Panas e Sypek (2006), Erdogan (2008) e Silva et al. (2014e). Sendo que a retirada dos pontos iniciais ocorre, exclusivamente por inspeção visual do gráfico, antes de realizar a regressão linear, fato este que torna a retirada dos pontos experimentais demasiadamente subjetiva. Outros pesquisadores usam a solução analítica da equação de difusão reduzindo-a ao primeiro termo da série que a representa (URIBE et al., 2011; ZÚÑIGA e PEDRESCHI, 2011; RODRÍGUEZ et al., 2013; ABBASI et al., 2014). Entretanto este procedimento pode acarretar erros de truncamento que não podem ser desprezados, principalmente para os primeiros instantes de tempo conforme relatado por Silva et al. (2012e).

O algoritmo aqui proposto elimina os erros que pode ser apresentado em função da utilização de apenas o primeiro termo da série, uma vez que se utilizou os primeiros 100

termos, bem como o caráter subjetivo, quando da retirada dos primeiros pontos experimentais, haja visto que esta retirada ocorre de forma a reduzir o indicador estatístico qui-quadrado, baseando-se no conceito de otimização e mantendo maior quantidade de informação estatística.

A partir dos valores obtidos, tanto para absorção de sólidos e perda de água durante a desidratação osmótica, quanto para a secagem posterior em estufa pode-se concluir que o algoritmo apresenta bons resultados no cálculo da difusividade efetiva.

Conforme relatado por Silva et al. (2013a) outro fator que merece destaque e que geralmente é desprezado por diversas pesquisas é o fato de que a determinação da transferência de massa através da equação de difusão permite conhecer o teor da grandeza objeto de análise em cada instante e em cada posição durante o processo, permitindo a predição de tensões internas ao produto que podem danificá-lo, conforme apresentado na seção 4.4 deste trabalho.

#### **4.4 Cinética de desidratação osmótica e secagem em estufa utilizando o algoritmo desenvolvido neste trabalho – Condição de contorno de terceiro tipo**

Para descrever a perda de água, bem como o ganho de soluto, quando se utiliza da condição de contorno de terceiro tipo faz-se necessário conhecer tanto a difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), como o coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ). Para isto, de forma geral, a solução analítica da equação de difusão com apenas o primeiro termo é considerada. Apesar de esta técnica ser bem usual contém falha para os números de Fourier inferior a 0,2 (SILVA et al., 2012d). Assim sendo nesta seção apresentaremos os dados obtidos implantando-se o algoritmo desenvolvido conforme explicitado no Capítulo 3 deste trabalho, algoritmo este que utiliza uma técnica baseada na remoção ótima de pontos experimentais para minimizar erros na determinação da difusividade efetiva da massa de água e sólido e o coeficiente de transferência convectiva, mantendo a maior quantidade de informação estatística possível. Outro benefício da utilização da equação de difusão é a possibilidade de se determinar o teor de água local em qualquer instante durante o processo de desidratação. Nesta seção também serão apresentados os gráficos referentes a distribuição espacial do teor de água e sólidos, na desidratação osmótica e o teor de água durante a secagem em estufa. O *software Contour Plot*, desenvolvido por Silva W (2010) foi utilizado para “Gerar Gráficos de Contorno”, que

possibilitam analisar visualmente a evolução temporal da distribuição espacial da grandeza  $\Phi$  em geometria bidimensional no domínio físico.

Para validar a ferramenta analítica desenvolvida neste trabalho, foram utilizados os dados referentes a desidratação osmótica e secagem do melão em cubo através de comparação dos resultados obtidos no *software Convective* que também utiliza a condição de contorno de terceiro tipo.

#### 4.4.1 Simulação da quantidade de água das amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm

Nas Tabelas 4.22, 4.23 e 4.24, a seguir, são apresentados os valores obtidos para o parâmetro  $B$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e do indicador estatístico ( $\chi^2$ ), para o teor de água em amostra tratadas em solução osmótica na concentração de 25 °Brix. Em apêndice a este trabalho, na Tabela A.2, encontram-se os valores utilizado na regressão.

Tabela 4.22 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 25 °Brix.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9666404	2,978981	1,055005	$2,231 \times 10^{-8}$	$8,299 \times 10^{-6}$	1,860	$6,0659 \times 10^{-2}$
1	0,9493359	2,697209	1,161341	$1,666 \times 10^{-8}$	$8,916 \times 10^{-6}$	2,676	$5,5188 \times 10^{-2}$
2	0,9371893	2,522830	5,219804	$1,413 \times 10^{-8}$	$9,413 \times 10^{-6}$	3,331	$5,2188 \times 10^{-2}$
3	0,9163316	2,226107	1,302190	$1,111 \times 10^{-8}$	$1,051 \times 10^{-5}$	4,730	$4,7459 \times 10^{-2}$
4	0,8815184	1,906199	1,409696	$0,799 \times 10^{-8}$	$1,386 \times 10^{-5}$	8,674	$3,7950 \times 10^{-2}$
5	0,8681003	0,179223	1,444736	$0,715 \times 10^{-8}$	$1,630 \times 10^{-5}$	11,400	$3,3272 \times 10^{-2}$
6	0,8454577	1,638718	1,498322	$0,608 \times 10^{-8}$	$2,509 \times 10^{-5}$	20,637	$2,4071 \times 10^{-2}$
<b>7</b>	<b>0,8289120</b>	<b>1,551185</b>	<b>1,533989</b>	<b><math>0,546 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>4,549 \times 10^{-5}</math></b>	<b>41,657</b>	<b><math>2,0671 \times 10^{-2}</math></b>
8	0,8206059	1,497000	1,550980	$0,519 \times 10^{-8}$	$8,123 \times 10^{-5}$	78,259	$2,1658 \times 10^{-2}$

Tabela 4.23 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 45 °Brix.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,987079	4,666056	0,845547	$5,439 \times 10^{-8}$	$1,038 \times 10^{-5}$	0,954	$4,7223 \times 10^{-2}$
1	0,978373	4,476009	0,954112	$4,097 \times 10^{-8}$	$1,103 \times 10^{-5}$	1,346	$4,4139 \times 10^{-2}$
2	0,951354	3,689336	1,150579	$2,322 \times 10^{-8}$	$1,196 \times 10^{-5}$	2,575	$4,5335 \times 10^{-2}$
3	0,894372	3,074122	1,373217	$1,358 \times 10^{-8}$	$1,863 \times 10^{-5}$	6,860	$3,1168 \times 10^{-2}$
<b>4</b>	<b>0,870970</b>	<b>2,778109</b>	<b>1,437472</b>	<b><math>1,120 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>2,401 \times 10^{-5}</math></b>	<b>10,718</b>	<b><math>3,0458 \times 10^{-2}</math></b>
5	0,867315	2,737370	1,446704	$1,089 \times 10^{-8}$	$2,526 \times 10^{-5}$	11,598	$3,0489 \times 10^{-2}$

Tabela 4.24 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante a perda de água no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose nas concentrações de 65 °Brix.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9958936	5,466495	0,643220	$1,101 \times 10^{-7}$	$1,061 \times 10^{-5}$	0,482	$5,1117 \times 10^{-2}$
1	0,9928702	5,393589	0,734278	$8,336 \times 10^{-8}$	$1,105 \times 10^{-5}$	0,663	$5,0059 \times 10^{-2}$
2	0,9620608	4,762210	1,086753	$3,360 \times 10^{-8}$	$1,388 \times 10^{-5}$	2,066	$4,3267 \times 10^{-2}$
<b>3</b>	<b>0,8889141</b>	<b>3,522967</b>	<b>1,389096</b>	<b><math>1,521 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>2,300 \times 10^{-5}</math></b>	<b>7,560</b>	<b><math>4,0146 \times 10^{-2}</math></b>
4	0,8737155	3,331304	1,430411	$1,349 \times 10^{-8}$	$2,731 \times 10^{-5}$	10,122	$4,3052 \times 10^{-2}$

Verifica-se, de acordo com os valores apresentados nas Tabelas 4.22; 4.23 e 4.24, que os menores valores atribuídos para os indicadores estatísticos foram obtidos após a supressão de 7, 4 e 3 pontos experimentais, respectivamente, para amostras tratadas em solução osmótica na concentração de 25, 45 e 65 °Brix e que os valores obtidos para a difusividade efetiva da água aumentam quando se aumenta a concentração da solução osmodesidratante. Quando comparados os tempos necessários a obtenção dos valores verificou-se que, em

média, o algoritmo apresentou resultados transcorridos 12 segundos, enquanto que o *Convective* necessitou de, aproximadamente, 16 minutos e 30 segundos.

Uma vez que os parâmetros termofísicos tenham sido determinados usando a Equação (3.26) e o algoritmo apresentado na Seção 3.13.2, a Equação (3.18) pode ser usadas para determinar a distribuição do teor de água como função de  $x$  e  $y$ , em qualquer posição, para um dado instante de tempo. Os gráficos de distribuição foram apresentados considerando o quarto do plano  $xy$  em diferentes instantes, considerando  $z = 0,0$ , conforme demonstrado na Figura 3.5, bem como nos planos paralelos ao citado, a saber,  $z = 0,001$ ;  $z = 0,003$  e  $z = 0,004$  metros. Todos os conjuntos de imagens apresentados para distribuição do teor de água são referentes ao quarto do plano supracitados e por conta da simetria apenas um quarto do plano contido no cubo foi exposto. Utilizou-se o *software Contour Plots* (SILVA W, 2010), na análise visualmente da evolução temporal da distribuição espacial do transporte da grandeza  $\Phi$ .

Como dito anteriormente, uma das vantagens do modelo difusivo sobre outros modelos é a possibilidade de prever a distribuição da grandeza de interesse no interior do sólido. Na Figura 4.13 é apresentada a distribuição do teor de água no interior do produto nos tempos:  $t = 150$ ,  $t = 220$  e  $t = 300$  minutos.

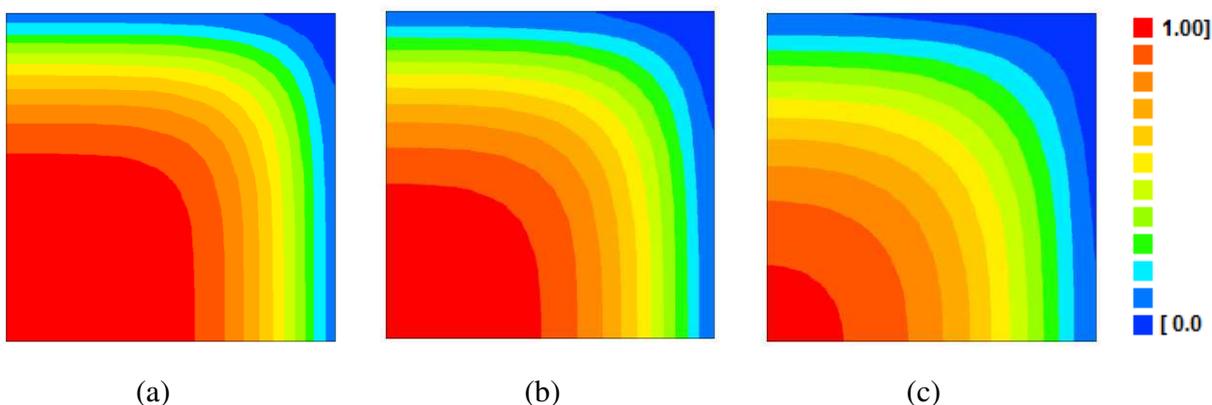


Figura 4.13: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix nos instantes (a) 150 minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o quarto de plano  $xy$  com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.14 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de água para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 25 °Brix, após 220 minutos de desidratação osmótica para o quarto do plano  $xy$  com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros.

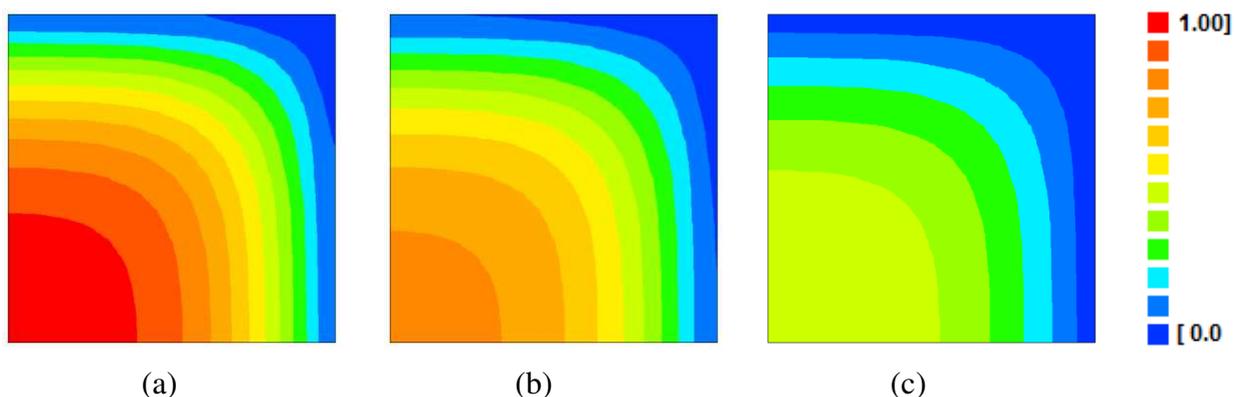


Figura 4.14: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix no instante 220 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

É possível verificar, a partir da Figura 4.13, a evolução da distribuição do teor de água nos instantes 150, 220 e 300 minutos na desidratação osmótica em solução osmótica de 25 °Brix. Percebe-se, ainda na Figura 4.13, que a camada que detém maior quantidade de água localiza-se na região central do produto e que a água diminui quanto mais próximo está o ponto analisado da superfície do material. Esse fato evidencia o sentido do fluxo de água que se dá de dentro para fora do produto, como esperado para o processo de desidratação osmótica, conforme observado por Aires (2015) ao apresentar a distribuição do teor de água no processo de desidratação osmótica de maçã cortadas em formato de paralelepípedo.

Pode-se perceber ainda, ao analisar as Figuras 4.13 e 4.14, a existência de simetria lateral em todos os instantes e para todas as posições. E como consequência desta simetria o vértice localizado na região inferior do lado direito apresenta o mesmo valor para o teor de água que àquele localizado no vértice superior do lado esquerdo. Enquanto que o vértice superior direito é uma região que permanece em contato com a solução osmótica tanto do lado direito quanto na parte superior e por este motivo apresenta os menores valores para o teor de água, e por conseguinte é a região que primeiro atinge o teor de água de equilíbrio, já o vértice situado na região inferior mais a esquerda da amostra pertence a região mais interna e encontra-se no centro do cubo, por este motivo, até o momento em que se atinge o teor de água de equilíbrio, apresenta os maiores valores para o teor de água em cada instante.

Como esperado, na Figura 4.14, que apresenta a distribuição do teor de água para o mesmo tempo de secagem variando-se a localização do quarto de plano xy em relação ao eixo z conforme descrito anteriormente, quanto mais próximo o quarto de plano encontra-se da superfície da amostra menor o teor de água apresentada para um determinado instante de tempo.

Faz-se oportuno frisar que a cinética de secagem é afetada por valores locais de teores de água no interior do fruto, que por sua vez afetam outros atributos de qualidade, tais como cor e textura, evitando tensões e perda de qualidade. Desta forma, a descrição do processo de secagem é importante para se obter produto com boa qualidade (BAINI e LANGRISH, 2008).

Na Figura 4.15 estão dispostas as distribuições do teor de água para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 45 °Brix para os tempos: t = 150, t = 220 e t = 300 minutos.

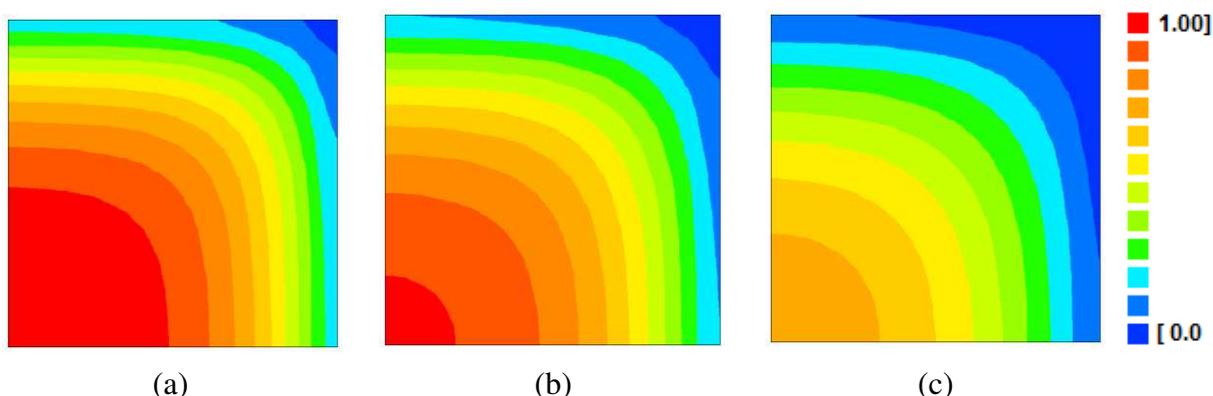


Figura 4.15: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix nos instantes (a) 150 minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o quarto de plano xy com  $z = 0,0$ .

Uma observação simultânea das Figuras 4.13 e 4.15 permite concluir que, para um mesmo instante, o teor de água em uma dada posição é menor para amostra tratada em solução na concentração de 45 °Brix que o correspondente 25 °Brix.

Na Figura 4.16 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de água para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 45 °Brix, após 220 minutos de desidratação osmótica para os planos xy com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros.

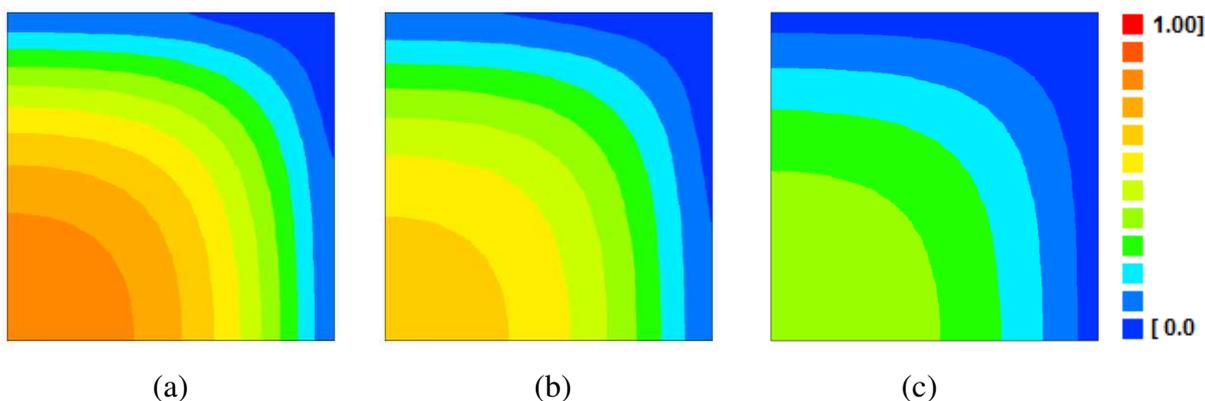


Figura 4.16: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix no instante 220 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Comportamento similar a amostra tratada em solução osmótica na concentração de 25 °Brix foi verificado para amostra tratada em solução na concentração de 45 °Brix, o teor de água diminuindo com o tempo, bem como o teor de água de equilíbrio sendo atingido mais rapidamente nas proximidades das regiões mais externas da amostra.

As informações sobre a distribuição de água no interior do cubo tratado em solução osmótica com concentração de 65 °Brix, nos instantes de tempo:  $t = 150$ ,  $t = 220$  e  $t = 300$  minutos, são apresentadas na Figura 4.17, a seguir.

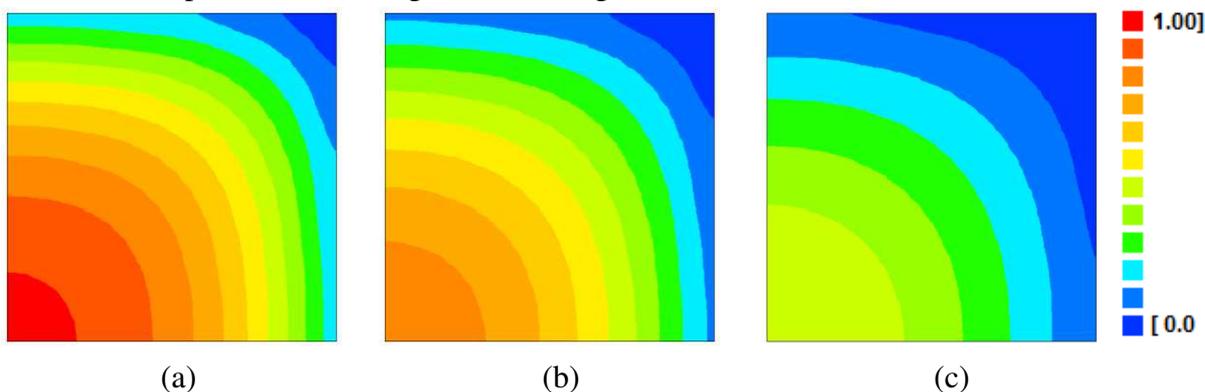


Figura 4.17: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix nos instantes (a) 150 minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o quarto de plano xy com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.18 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de água para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 65 °Brix, após 220 minutos de desidratação osmótica para os planos xy com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros.

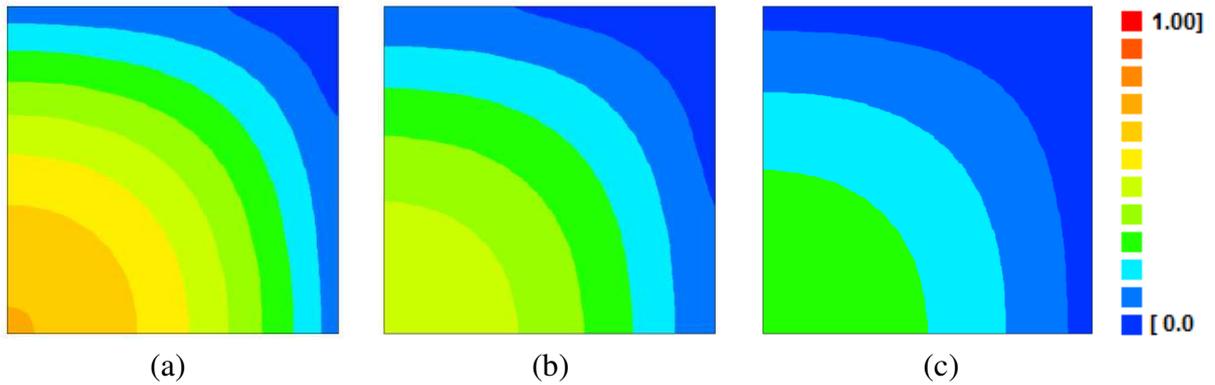


Figura 4.18: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix no instante 220 minutos para os quartos de planos, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Nas Figuras 4.17 e 4.18 verificou-se, para o teor de água da amostra desidratada em solução osmótica com concentração de 65 °Brix, comportamento similar àquelas tratadas nas soluções de 25 e 45 °Brix e apresentadas nas Figuras 4.13 a 4.16. Um fato que merece destaque é que quanto maior a concentração da solução osmótica mais acentuada a diminuição do teor de água apresentado pela amostras para um mesmo instante de tempo quando considerada a mesma posição. A fim de permitir uma melhor visualização da descrição realizada a Figura 4.19, logo abaixo, apresenta as imagens da distribuição do teor de água das amostras tratada em solução osmótica nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix, respectivamente, para o mesmo instante de tempo, 220 minutos.

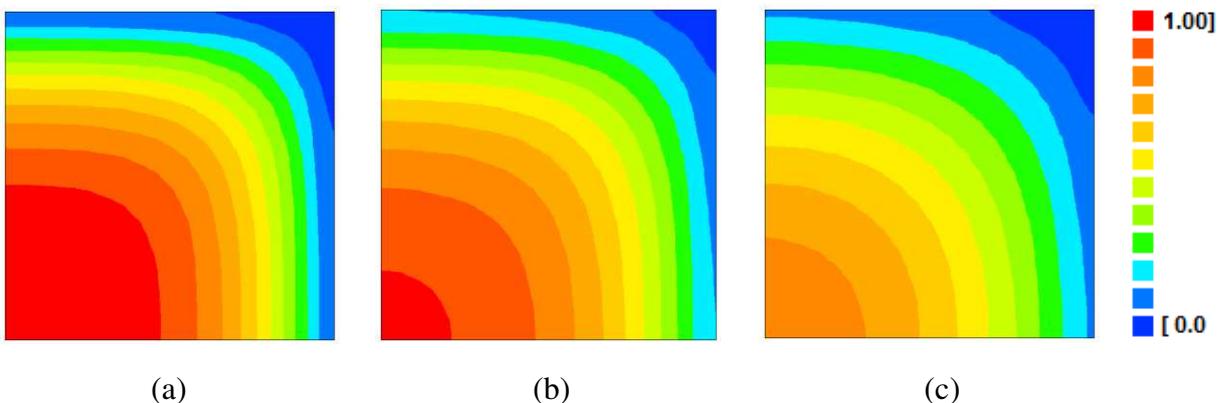


Figura 4.19: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de (a) 25 °Brix, (b) 45 °Brix e (c) 65 °Brix no instante 220 minutos para o quarto de plano xy com  $z = 0,0$ .

**4.4.2 Simulação da quantidade de sólidos nas amostras durante a desidratação osmótica em cubos de melão com arestas de 1,0 cm**

Nas Tabelas 4.25, 4.26 e 4.27, a seguir, são apresentados os valores obtidos para o parâmetro  $B$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e do indicador estatístico ( $\chi^2$ ), para o ganho de sacarose em amostra tratadas em solução osmótica na concentração de 25 °Brix.

Em apêndice a este trabalho, na Tabela A.1 encontram-se os valores utilizados na regressão não linear.

Tabela 4.25 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante o ganho de sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose na concentração de 25 °Brix.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9664335	4,350690	1,056511	$3,248 \times 10^{-8}$	$1,215 \times 10^{-5}$	1,870	$4,3661 \times 10^{-2}$
1	0,9441474	3,826629	1,187531	$2,261 \times 10^{-8}$	$1,332 \times 10^{-5}$	2,945	$3,9496 \times 10^{-2}$
2	0,9389809	3,724459	1,211773	$2,114 \times 10^{-8}$	$1,365 \times 10^{-5}$	3,228	$3,8633 \times 10^{-2}$
3	0,9320153	3,600503	1,241915	$1,945 \times 10^{-8}$	$1,416 \times 10^{-5}$	3,641	$3,7282 \times 10^{-2}$
4	0,8897606	3,000510	1,386673	$1,300 \times 10^{-8}$	$1,936 \times 10^{-5}$	7,446	$2,6869 \times 10^{-2}$
5	0,8524366	2,605339	1,482453	$0,988 \times 10^{-8}$	$3,307 \times 10^{-5}$	16,736	$1,6997 \times 10^{-2}$
<b>6</b>	<b>0,8339495</b>	<b>2,449918</b>	<b>1,532400</b>	<b><math>0,879 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>5,646 \times 10^{-5}</math></b>	<b>32,118</b>	<b><math>1,5340 \times 10^{-2}</math></b>
7	0,8306446	2,425815	1,530372	$0,863 \times 10^{-8}$	$6,531 \times 10^{-5}$	37,837	$1,5653 \times 10^{-2}$

Tabela 4.26 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante o ganho de sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose na concentração de 45 °Brix.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9999565	4,883432	0,209830	$9,243 \times 10^{-7}$	$7,764 \times 10^{-6}$	0,042	$6,2921 \times 10^{-2}$
1	0,9999293	4,882816	0,236788	$7,257 \times 10^{-7}$	$8,273 \times 10^{-6}$	0,057	$6,2883 \times 10^{-2}$
2	0,9996010	4,875345	0,363757	$3,070 \times 10^{-7}$	$8,473 \times 10^{-6}$	0,138	$6,2456 \times 10^{-2}$
3	0,9831813	4,539045	0,899641	$4,674 \times 10^{-8}$	$1,059 \times 10^{-5}$	1,133	$5,2118 \times 10^{-2}$
<b>4</b>	<b>0,9210101</b>	<b>3,519205</b>	<b>1,285233</b>	<b><math>1,775 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>1,554 \times 10^{-5}</math></b>	<b>4,378</b>	<b><math>3,3051 \times 10^{-2}</math></b>
5	0,8766984	2,976768	1,422609	$1,226 \times 10^{-8}$	$2,337 \times 10^{-5}$	9,530	$3,9742 \times 10^{-2}$

Tabela 4.27 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante o ganho de sólidos no processo de desidratação osmótica, de cubos de melão com aresta de 1,0 cm, em soluções de sacarose na concentração de 65 °Brix.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9911669	7,315958	0,772724	$1,021 \times 10^{-7}$	$1,538 \times 10^{-5}$	0,753	$3,8384 \times 10^{-2}$
1	0,9817074	6,984338	0,917518	$6,913 \times 10^{-8}$	$1,658 \times 10^{-5}$	1,199	$3,6271 \times 10^{-2}$
2	0,9501855	6,063972	1,156854	$3,776 \times 10^{-8}$	$1,988 \times 10^{-5}$	2,633	$3,1512 \times 10^{-2}$
<b>3</b>	<b>0,8690492</b>	<b>4,141888</b>	<b>1,442348</b>	<b><math>1,659 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>3,705 \times 10^{-5}</math></b>	<b>11,167</b>	<b><math>2,8873 \times 10^{-2}</math></b>
4	0,8259690	0,338033	1,540074	$1,187 \times 10^{-8}$	$1,190 \times 10^{-4}$	50,114	$3,9120 \times 10^{-2}$

Analisando as Tabelas 4.25, 4.26 e 4.27 percebe-se que os menores valores para o indicador estatístico foram obtidos após a supressão de 6, 4 e 3 pontos experimentais para os tratamentos nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix, respectivamente. Sendo que os valores obtidos para o indicador estatístico foram  $1,5340 \times 10^{-2}$ ;  $3,2051 \times 10^{-2}$  e  $2,8873 \times 10^{-2}$  quando submeteu-se os dados experimentais ao algoritmo proposto neste trabalho, já para o *Convective* os valores foram  $1,4613 \times 10^{-2}$ ;  $3,2969 \times 10^{-2}$  e  $2,6095 \times 10^{-2}$ , apresentando divergência de -5 % entre os valores obtidos entre o algoritmo proposto e o *software Convective*. Faz-se oportuno frisar que os resultados obtidos usando a técnica de remoção de pontos experimentais, principalmente para a desidratação osmótica, seriam mais precisos para os casos em que se tem maior quantidade de pontos experimentalmente colhidos, assim, quanto maior a quantidade de pontos experimentais melhores os resultados apresentados.

Na Figura 4.20 estão dispostas as distribuições do teor de sólidos para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 25 °Brix para os tempos:  $t = 150$ ,  $t = 220$  e  $t = 300$  minutos.

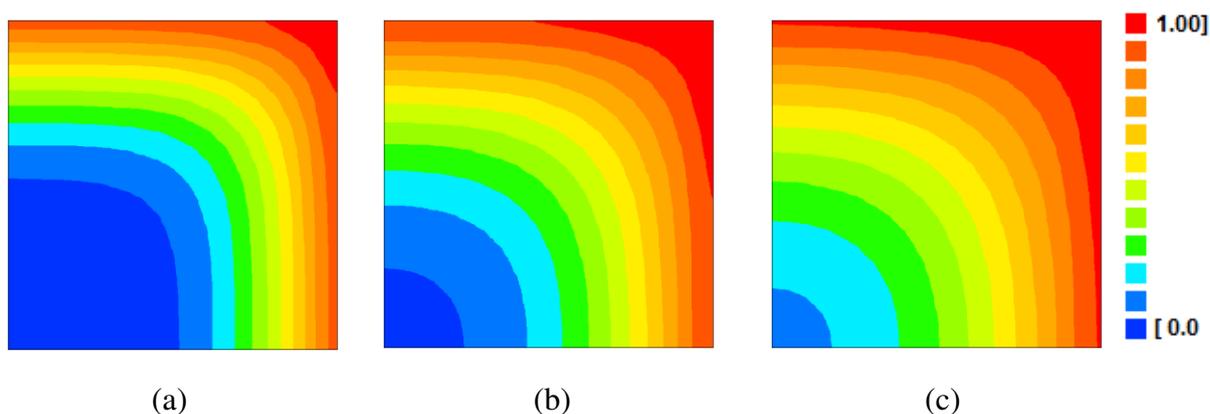


Figura 4.20: Distribuição do teor de sólidos em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix nos instantes (a) 150 minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o quarto de plano xy com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.21 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de sólidos para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 25 °Brix, após 220 minutos de desidratação osmótica para os planos xy com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros.

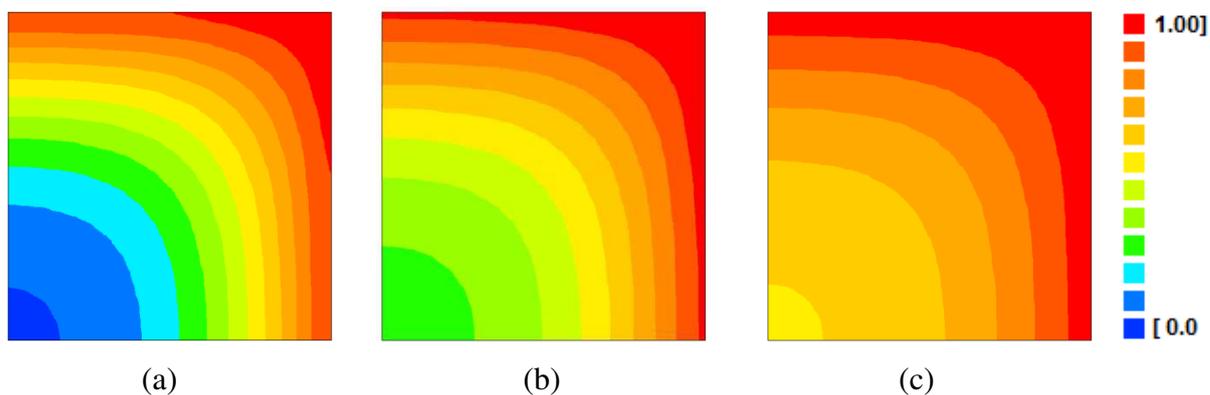


Figura 4.21: Distribuição do teor de sólidos em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix no instante 220 minutos para o quarto de plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Na Figura 4.20 vê-se a evolução da penetração de sacarose nas amostras de melão nos primeiros 150, 220 e 300 minutos do experimento. Nota-se que as regiões com maior presença de sacarose são as mais externas, ao contrário do que se verificou para a água, o que certifica o sentido do fluxo de sacarose da superfície para o centro do produto, como esperado, haja vista que a sacarose passa da solução para as amostras de melão. Observe-se, ainda, que, após os primeiros 220 minutos de osmodesidratação a região localizada próximo ao centro geométrico da amostra praticamente não apresenta alteração no que diz respeito ao teor de sólidos, enquanto que as regiões mais próximas das extremidades encontram-se, praticamente, com o teor de sólidos de equilíbrio. Mesmo fenômeno observou-se com relação ao teor de água para mesma situação.

Já na Figura 4.21 que apresenta, para o quarto do plano  $xy$  com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros, a distribuição de sólidos também verificou-se comportamento inverso ao apresentado na Figura 4.14, que apresenta a distribuição do teor de água para mesma condição de tratamento. Sendo que para o instante 220 minutos a sacarose já penetrou em todo o quarto de plano cujo cota foi de  $0,3 \times 10^{-2}$  metros.

Na Figura 4.22 estão dispostas as distribuições do teor de sólidos para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 45 °Brix para os tempos:  $t = 150$  min,  $t = 220$  min e  $t = 3000$  min.

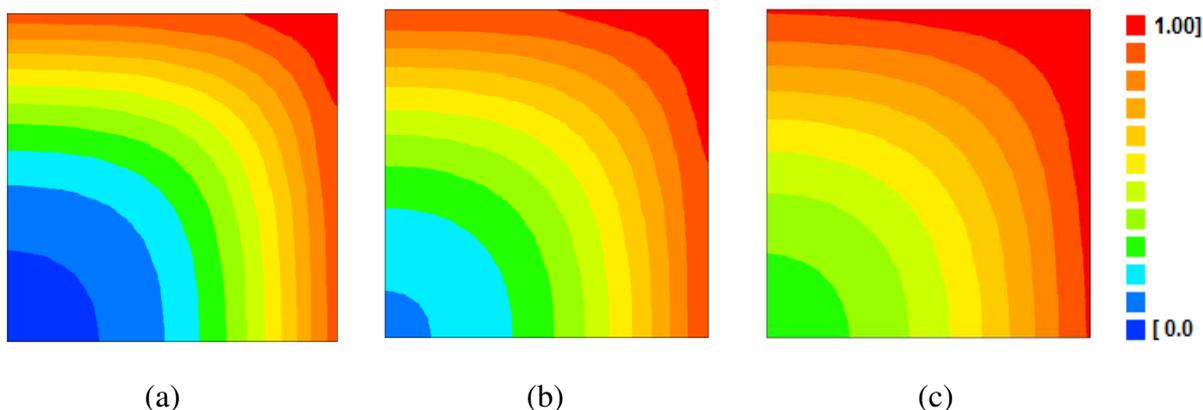


Figura 4.22: Distribuição do teor de sólidos em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix nos instantes (a) 150 minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o quarto de plano xy com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.23 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de sólidos para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 45 °Brix, após 220 minutos de desidratação osmótica para os planos xy com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros.

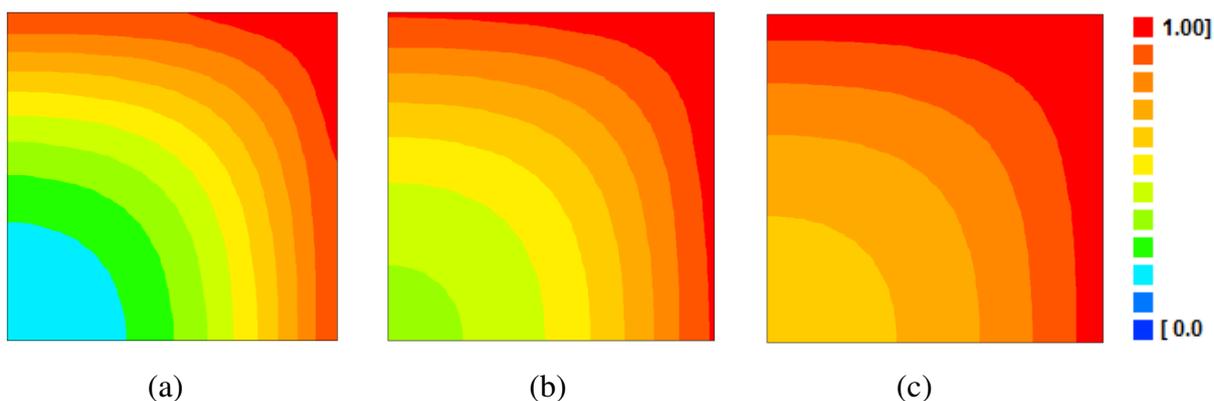


Figura 4.23: Distribuição do teor de sólidos em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix no instante 220 minutos para os quarto de plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

A exemplo do que aconteceu com o teor de água, em que o equilíbrio foi atingido de forma mais rápida para amostras tratadas em solução osmótica com maiores concentração, para o teor de sólidos verificou-se a mesma situação. Sendo que após os primeiros 150 minutos de tratamento ainda existem regiões próximas ao centro do cubo que, praticamente,

ainda não apresentam a presença da sacarose.

Na Figura 4.24 estão dispostas as distribuições do teor de sólidos para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 65 °Brix para os tempos:  $t = 150$  min,  $t = 220$  min e  $t = 300$  minutos.

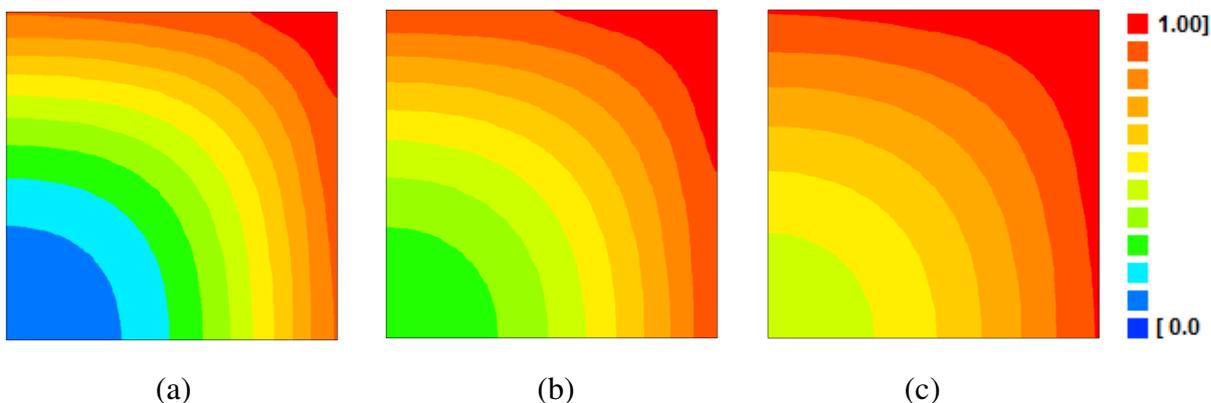


Figura 4.24: Distribuição do teor de sólidos em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix nos instantes (a) 150 minutos, (b) 220 minutos e (c) 300 minutos para o quarto de plano  $xy$  com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.25 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de sólidos para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 65 °Brix, após 220 minutos de desidratação osmótica para os planos  $xy$  com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros.

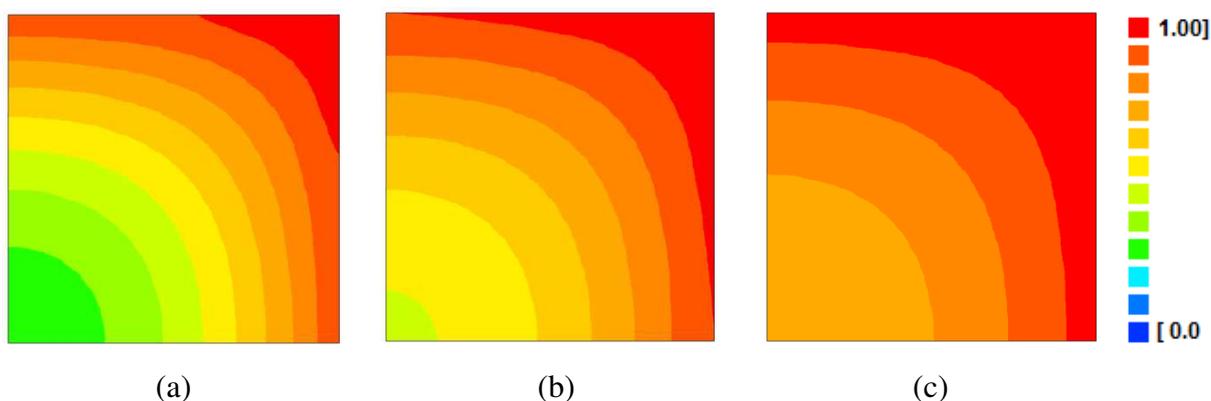


Figura 4.25: Distribuição do teor de sólidos em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix no instante 220 minutos para o quarto de plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Na Figura 4.24, que apresenta a distribuição do teor de sólidos para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 65 °Brix, verifica-se, como esperado, que a maior quantidade de sólidos solúveis no xarope ocasionou a inserção mais rápida da sacarose nos cubos desidratados, sendo perceptível que após os 150 primeiros minutos de osmodesidratação, diferentemente do que aconteceu com amostras tratadas em 25 e 45 °Brix, a amostra já apresenta sacarose em todas as regiões, inclusive na região localizada em seu centro geométrico. Corroborando com estudos de vários autores que afirmam ser o teor de sólidos solúveis no xarope uma das importantes variáveis do processo tanto no diz respeito à diminuição da quantidade de água, quanto a absorção do agente osmodesidratante (VASCONCELOS et al., 2012; BARBOSA et al., 2013; SILVA et al. 2014b; NAGAI et al., 2014; ZHAO et al., 2014)

Pode-se verificar, ainda, ao comparar as Figuras 4.13 a 4.18, que trazem as imagens da distribuição do teor de água, com as Figuras 4.20 a 4.25, que apresentam a distribuição do teor de sacarose, que a difusão da sacarose ocorreu em maior intensidade e de forma mais rápida para amostras tratadas em soluções com maiores teores de sólidos solúveis, fato este que pode ser explicado em virtude dos maiores valores obtidos para a difusividade efetiva e coeficiente de transferência convectiva para o teor de água, expressos nas Tabelas 4.21 a 4.23, quando comparado com os valores obtidos para o teor de sólidos, expressos nas Tabelas 4.24 a 4.26.

Resultados semelhantes são reportados por Amami et al. (2006) que obtiveram valores inferiores para a difusividade efetiva de massa para a água quando comparados à sacarose, em duas situações experimentais relativas ao estudo do efeito de pulsos elétricos sobre a desidratação osmótica de discos de maçã em soluções hipertônicas de água e sacarose e também por Khoiyi e Hesari (2007) no estudo da desidratação osmótica de damascos, no qual se encontrou uma difusividade média de  $7,86 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  para a água e de  $8,70 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  para a sacarose.

Resultados diferentes foram obtidos Silva et al. (2013a) que obteve, para sacarose, maior difusividade efetiva e menor valor para coeficiente de transferência ao desidratar osmoticamente pedaços de coco cortado em formato de paralelepípedo nas dimensões de  $(6,13 \pm 0,91)$ ;  $(10,12 \pm 0,85)$  e  $(30,65 \pm 0,51)$  mm em solução com teor de sólidos solúveis de 35 °Brix. A determinação dos parâmetros foi realizada através da equação de difusão considerando a condição de contorno de terceiro tipo.

#### 4.4.3 Simulação do teor de água durante a secagem em estufa

A realização de regressão não-linear aos dados da Tabela B.1, em apêndice a este trabalho, possibilita determinar os parâmetros  $B$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e do indicador estatístico ( $\chi^2$ ), para o teor de água, em amostra tratadas em solução osmótica na concentração de 25, 45 e 65 °Brix e submetido à secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, conforme discriminada em cada tabela.

##### 4.4.3.1 Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 25 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Tem-se nas Tabelas 4.28, 4.29 e 4.30 os valores referentes aos parâmetros  $B$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e do indicador estatístico ( $\chi^2$ ), para o teor de água, em amostra tratadas em solução osmótica na concentração de 25 °Brix e submetidos a secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Tabela 4.28 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, na temperatura de 50 °C.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9971478	8,943611	0,589039	$2,148 \times 10^{-7}$	$1,688 \times 10^{-5}$	0,393	$2,7271 \times 10^{-2}$
1	0,9892991	8,688141	0,808896	$1,106 \times 10^{-7}$	$1,874 \times 10^{-5}$	0,847	$2,6690 \times 10^{-2}$
2	<b>0,9189209</b>	<b>6,893481</b>	<b>1,292899</b>	<b><math>3,435 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>3,113 \times 10^{-5}</math></b>	<b>4,532</b>	<b><math>2,4681 \times 10^{-2}</math></b>
3	0,8094885	4,713832	-	-	-	-	-

Tabela 4.29 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, na temperatura de 60 °C.

Pontos Removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $\text{m min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9954797	9,803353	0,658273	$1,885 \times 10^{-7}$	$1,919 \times 10^{-5}$	0,509	$1,3482 \times 10^{-2}$
1	0,9820577	9,347699	0,913375	$9,339 \times 10^{-7}$	$2,210 \times 10^{-4}$	1,183	$1,2465 \times 10^{-2}$
<b>2</b>	<b>0,9218246</b>	<b>7,774501</b>	<b>1,282202</b>	<b><math>3,941 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>3,404 \times 10^{-5}</math></b>	<b>4,319</b>	<b><math>1,1260 \times 10^{-2}</math></b>
3	0,8421393	6,114519	1,505687	$2,248 \times 10^{-8}$	$1,039 \times 10^{-4}$	23,10	$2,4740 \times 10^{-2}$

Tabela 4.30 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 25 °Brix, na temperatura de 70 °C.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $\text{m min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,994833	1,280562	0,679770	$2,309 \times 10^{-7}$	$2,535 \times 10^{-5}$	0,549	$0,9667 \times 10^{-2}$
1	0,971911	1,187657	1,013872	$9,628 \times 10^{-8}$	$3,135 \times 10^{-5}$	1,628	$0,8430 \times 10^{-2}$
<b>2</b>	<b>0,931055</b>	<b>1,064936</b>	<b>1,246008</b>	<b><math>5,714 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>4,232 \times 10^{-5}</math></b>	<b>3,703</b>	<b><math>0,8052 \times 10^{-2}</math></b>
3	0,799981	0,745143	-	-	-	-	-

Como se pode verificar nas Tabelas 4.28, 4.29 e 4.30 os menores valores para o indicador estatístico foram atribuídos ao suprimir os dois primeiros valores experimentais obtidos. Para estas condições os valores obtidos para o qui-quadrado foram  $2,4681 \times 10^{-2}$ ;  $1,1260 \times 10^{-2}$  e  $0,8052 \times 10^{-2}$ , respectivamente, para amostras submetidas a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, após a desidratação em solução osmótica com concentração de 25 °Brix. Enquanto que para estas mesmas condições os valores apresentados pelo *software Convective* foram  $2,4449 \times 10^{-2}$ ;  $1,1135 \times 10^{-2}$  e  $0,8034 \times 10^{-2}$ . Relativo aos valores

apresentados para difusividade efetiva e coeficiente de transferência convectiva da massa de água apreende-se que a elevação de temperatura acarretou um aumento nos valores obtidos.

Concernente aos números de Biot determinados, 4,532; 4,319 e 3,703 para temperatura de secagem 50, 60 e 70 °C, respectivamente, conforme já mencionado, para todas as condições, apresenta valores que possibilitam afirmar que a condição de contorno de terceiro é a mais apropriada para descrição do processo secagem precedida de desidratação osmótica em xarope de sacarose para cubos de melão. Com relação ao tempo gasto para entrega dos resultados verificou-se que o *Convective* necessitou de, aproximadamente 28 minutos, em média, enquanto que o algoritmo desenvolvido necessitou, em média, de apenas 20 segundos, sendo que a discrepância entre os resultados obtidos foi de -0,765 %, em média, para estas condições de tratamentos.

Na Figura 4.26 estão dispostas as distribuições do teor de água para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C para os tempos:  $t = 60$  min,  $t = 120$  min e  $t = 220$  min.

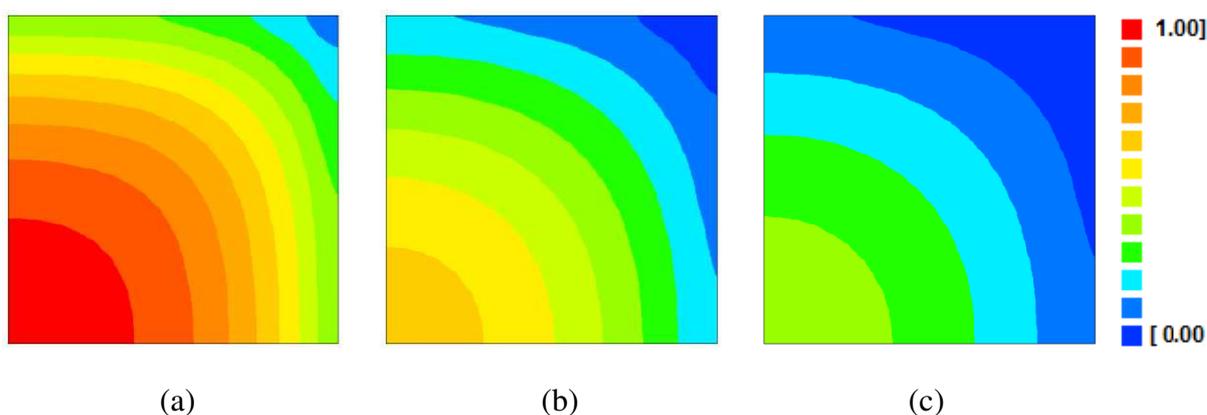


Figura 4.26: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano  $xy$  com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.27 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de sólidos para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C para o quarto de plano  $xy$

com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros, depois de decorridos 60 minutos de secagem.

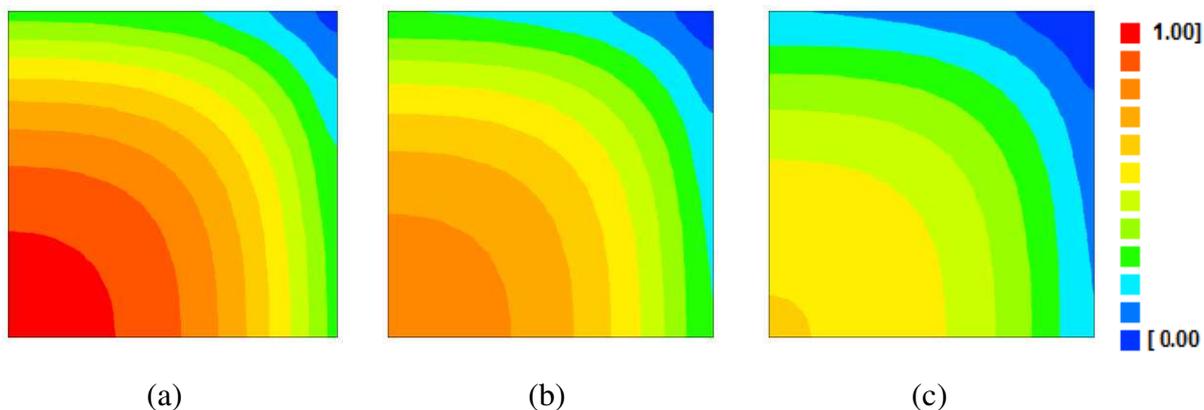


Figura 4.27: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C no instante 60 minutos para o quarto de plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Conforme pode-se perceber na Figura 4.27 que apresenta a distribuição do teor de água para amostra desidratada em solução osmodesidratante com concentração de sólidos solúveis de 25 °Brix e secagem posterior em temperatura de 50 °C que o teor de água de equilíbrio foi atingido primeiro na região localizada no vértice superior direito, assim como constatado para desidratação osmótica mostrado na Figura 4.13, enquanto que na região situada no centro geométrico do cubo ainda não houve remoção de água. Tal comportamento deu-se em virtude da simetria da amostra, conforme já relatado anteriormente, sendo oportuno registrar que a condição de equilíbrio foi atingido bem mais rápido na secagem que na desidratação osmótica.

Já na Figura 4.27, que apresenta a distribuição do teor de água no instante 60 minutos para o quarto de plano paralelo ao plano xy foi verificado o mesmo padrão de distribuição exposta durante a desidratação osmótica na Figura 4.14.

Na Figura 4.28 estão dispostas as distribuições do teor de água para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C para os tempos:  $t = 60$  min,  $t = 120$  min e  $t = 220$  min.

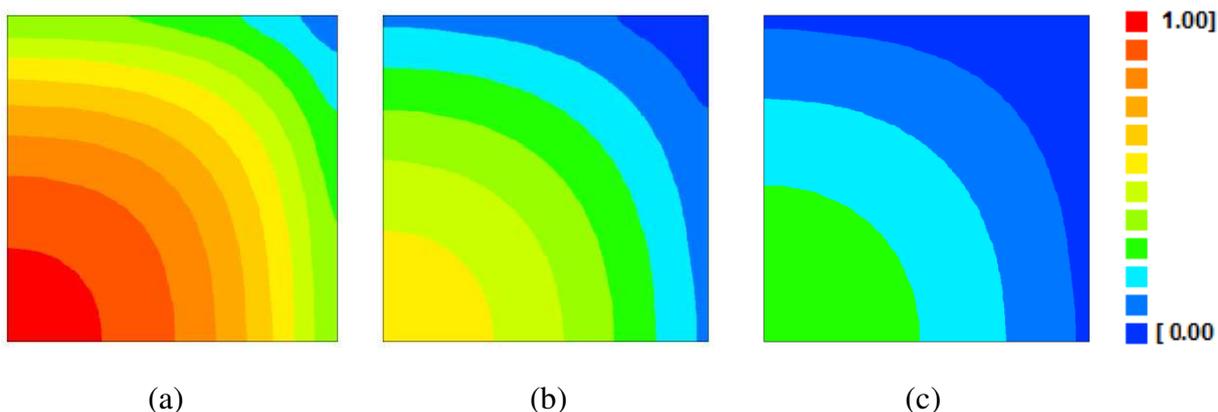


Figura 4.28: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.29 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de água para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C para o quarto de plano xy com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros, após decorridos 60 minutos de secagem.

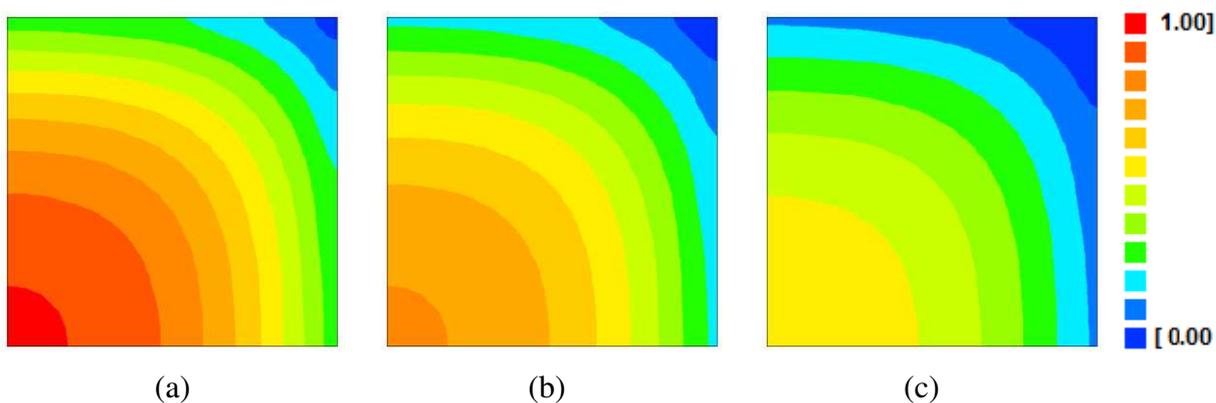


Figura 4.29: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C no instante 60 minutos para o quarto de plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Verifica-se nas Figuras 4.28 e 4.29 o mesmo padrão da amostra submetida a secagem posterior em temperatura de 50 °C, entretanto pode-se perceber, em todas as figuras, que os

teores de água em cada posição são consideravelmente menores para amostra submetida a secagem posterior a 60 °C.

Na Figura 4.30 estão dispostas as distribuições do teor de água para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C para os tempos:  $t = 60$  min,  $t = 120$  min e  $t = 220$  min.

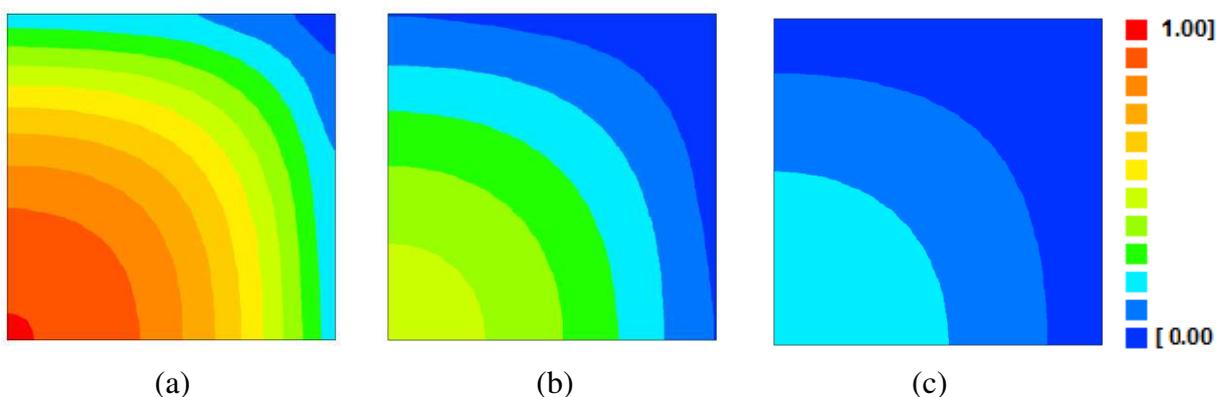


Figura 4.30: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano  $xy$  com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.31 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de sólidos para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C para o quarto do plano  $xy$  com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros, após decorridos 60 minutos de secagem.

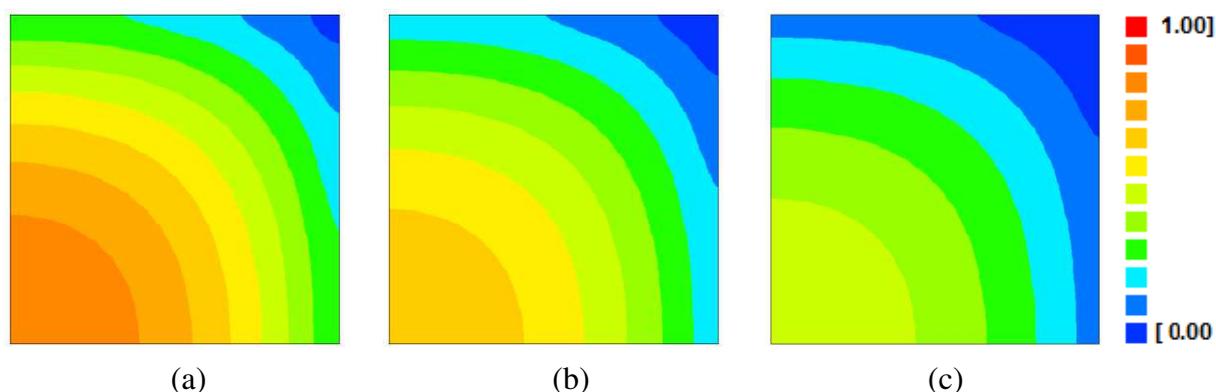


Figura 4.31: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 25 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Pode-se perceber nas Figuras 4.26, 4.28 e 4.30 que as amostras submetidas as maiores temperaturas apresentaram teores de água menores para um mesmo instante de tempo e mesma posição. Sendo que a amostras submetida a secagem na temperatura de 70 °C, após os primeiros 60 minutos de secagem, já apresenta diminuição do teor de água em seu centro geométrico, conforme apresentado na Figura 4.30 (a) e após os primeiros 220 minutos de secagem encontra-se com praticamente todas as regiões com teor de água de equilíbrio, conforme Figura 4.30 (c).

**4.4.3.2 Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 45 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C**

Tem-se nas Tabelas 4.31, 4.32 e 4.33 os valores referentes aos parâmetros  $B$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e do indicador estatístico ( $\chi^2$ ), para o teor de água, em amostra tratadas em solução osmótica na concentração de 45 °Brix e submetidos a secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Tabela 4.31 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 45 °Brix, na temperatura de 50 °C.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,992163	9,078464	0,750983	$1,341 \times 10^{-7}$	$1,877 \times 10^{-5}$	0,700	$1,3477 \times 10^{-2}$
1	0,972021	8,437098	1,012977	$6,852 \times 10^{-7}$	$2,224 \times 10^{-4}$	1,623	$1,1495 \times 10^{-2}$
<b>2</b>	<b>0,926806</b>	<b>7,321293</b>	<b>1,263739</b>	<b><math>3,823 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>3,039 \times 10^{-5}</math></b>	<b>3,975</b>	<b><math>0,9748 \times 10^{-2}</math></b>
3	0,882704	6,429702	1,406522	$2,708 \times 10^{-8}$	$4,595 \times 10^{-5}$	8,485	$1,2072 \times 10^{-2}$

Tabela 4.32 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 45 °Brix, na temperatura de 60 °C.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,991744	1,119905	0,760390	$1,614 \times 10^{-7}$	$2,33 \times 10^{-5}$	0,7233	$1,0820 \times 10^{-2}$
1	0,962493	1,011953	1,083888	$7,178 \times 10^{-8}$	$2,939 \times 10^{-5}$	2,0472	$8,1753 \times 10^{-2}$
<b>2</b>	<b>0,899342</b>	<b>0,839252</b>	<b>1,358234</b>	<b><math>3,970 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>4,771 \times 10^{-5}</math></b>	<b>6,2923</b>	<b><math>0,7024 \times 10^{-2}</math></b>
3	0,870399	0,775156	1,438928	$3,119 \times 10^{-8}$	$6,769 \times 10^{-5}$	10,856	$0,9203 \times 10^{-2}$

Tabela 4.33 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 45 °Brix, na temperatura de 70 °C.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9904926	1,347846	0,786349	$1,816 \times 10^{-7}$	$2,862 \times 10^{-5}$	0,788	$0,8846 \times 10^{-2}$
1	0,9448790	1,156310	1,183947	$6,870 \times 10^{-8}$	$3,993 \times 10^{-5}$	2,906	$0,4847 \times 10^{-2}$
<b>2</b>	<b>0,8807245</b>	<b>0,964986</b>	<b>1,411850</b>	<b><math>4,034 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>7,106 \times 10^{-5}</math></b>	<b>8,808</b>	<b><math>0,3384 \times 10^{-2}</math></b>
3	0,8345460	0,854512	1,522131	$3,073 \times 10^{-8}$	$1,921 \times 10^{-4}$	31,26	$0,8835 \times 10^{-2}$

Conforme pode-se perceber nas Tabelas 4.31, 4.32 e 4.32 os menores valores para o indicador estatísticos qui-quadrado foram obtidos após a supressão das duas primeiras medidas realizadas. Sendo que para estas condições de tratamento a discrepância entre os valores obtidos pelo algoritmo desenvolvido e o *software Convective* foi, aproximadamente, -2 %. Com relação ao tempo gasto para entrega dos resultados verificou-se que o *Convective* necessitou de, aproximadamente 30 minutos, em média, enquanto que o algoritmo desenvolvido levou, em média, 30 segundos.

Na Figura 4.32 estão dispostas as distribuições do teor de água para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C para os tempos:  $t = 60$ ,  $t = 120$  e  $t = 220$  minutos.

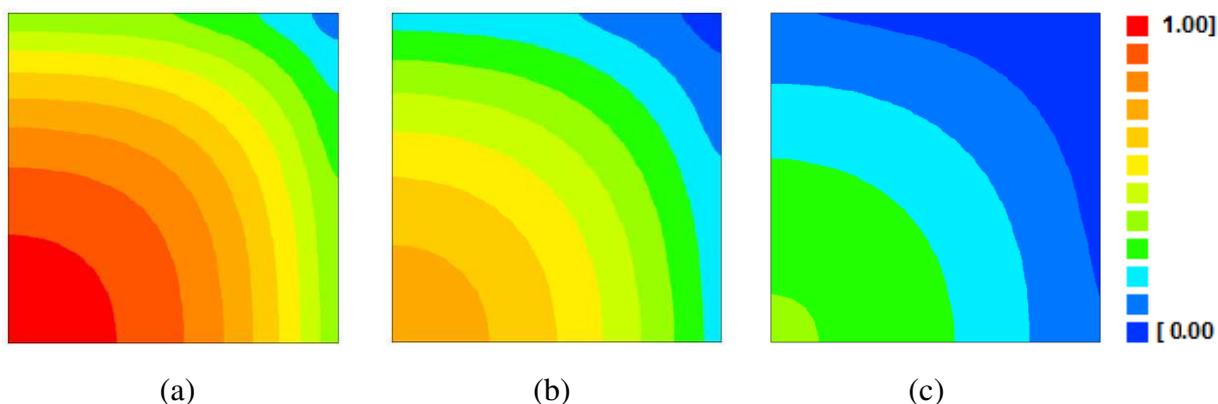


Figura 4.32: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano  $xy$  com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.33 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de sólidos para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C para o quarto do plano  $xy$  com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros, após decorridos 60 minutos de secagem.

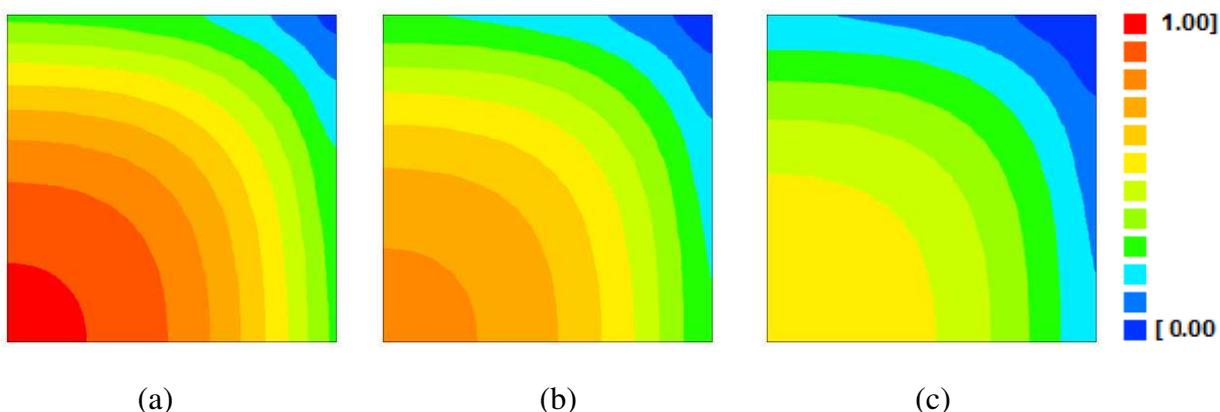


Figura 4.33: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano , localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Para amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa a temperatura de 50 °C, assim como aconteceu com as demais amostras o teor de água de equilíbrio foi atingido primeiramente nas regiões mais externas. Diferentemente do ocorrido com a amostra desidratada em solução osmótica na concentração de 25 °Brix esta apresenta, já aos 220 minutos, praticamente toda a região mais externa com o teor de água de equilíbrio atingido, um indício de que o teor de sólidos solúveis da amostra também interfere no processo de secagem posterior, encurtando o tempo em que a amostra necessita de ficar exposta a temperatura elevada. O que certamente acarretará na manutenção da qualidade do fruto seco. Neste sentido, ao analisar os experimentos de desidratação osmótica e secagem convectiva complementar dos cubos de melão, pode-se afirmar que o tempo total de processo é substancialmente longo. Entretanto, como destacado no estudo da desidratação osmótica, as maiores taxas de transferência de massa ocorrem nas primeiras horas do experimento de desidratação osmótica. Assim sendo, as amostras submetidas à desidratação osmótica podem ser levadas à secagem convectiva antes de atingirem o equilíbrio no processo osmótico e, com isso, diminuir o tempo total do processo. Aminzadeh et al. (2012) atestaram que a desidratação osmótica de melão reduziu o tempo total do processo de desidratação osmótica seguida de secagem convectiva em 6,8 horas, considerando-se um tempo de imersão de 4 horas.

Na Figura 4.34 estão dispostas as distribuições do teor de água para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C para os tempos:  $t = 60$ ,  $t = 120$  e  $t = 220$  minutos.

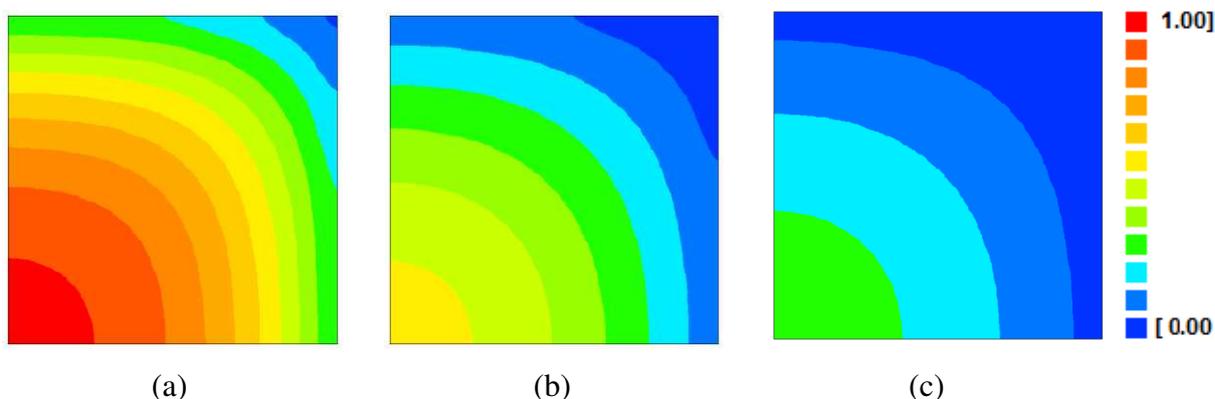


Figura 4.34: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano  $xy$  com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.35 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de sólidos para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C para o quarto do plano xy com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros após decorridos 60 minutos de secagem.

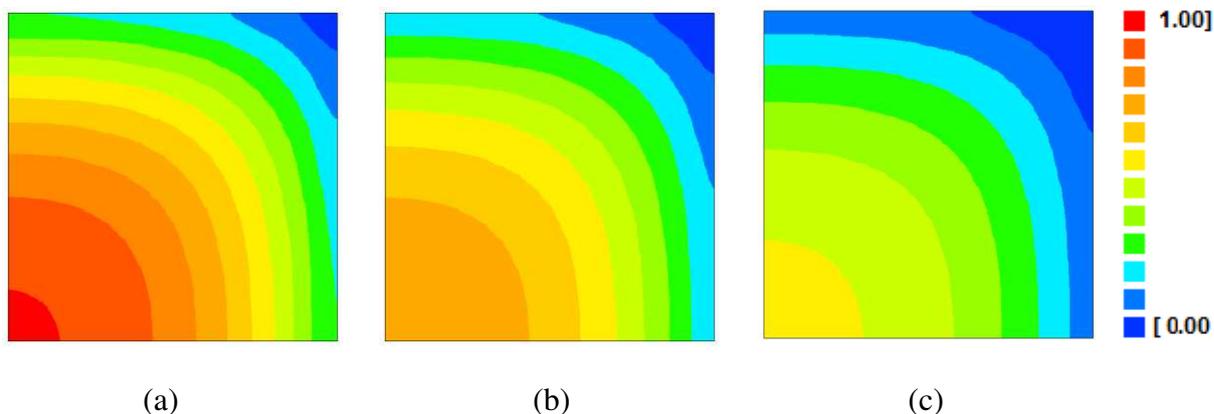


Figura 4.35: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Na Figura 4.34 que apresenta a distribuição do teor de água para amostras pré-tratadas em solução osmótica de 45 °Brix e secagem complementar de 60 °C pode-se verificar o mesmo padrão apresentado na Figura 4.28 que apresenta as imagens de uma amostra tratada em solução osmótica com teor de sólidos solúveis de 25 °Brix e secagem complementar em mesma temperatura. Nota-se, entretanto, que a amostra tratada em solução com 45 °Brix apresentou o teor de água menores em todas as posições quando considerados o mesmo tempo e condição. Fenômeno também observado para amostras submetidas a secagem complementar nas temperaturas de 50 e 60°C.

Na Figura 4.36 estão dispostas as distribuições do teor de água para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C para os tempos:  $t = 60$ ,  $t = 120$  e  $t = 220$  minutos.

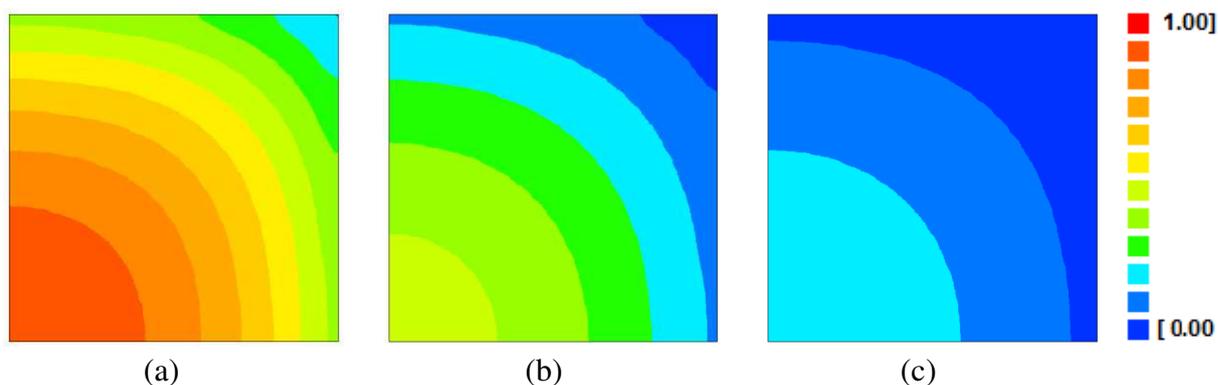


Figura 4.36: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.37 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de sólidos para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 45 °Brix e submetidos a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C para o quarto do plano xy com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros após decorridos 60 minutos de secagem.

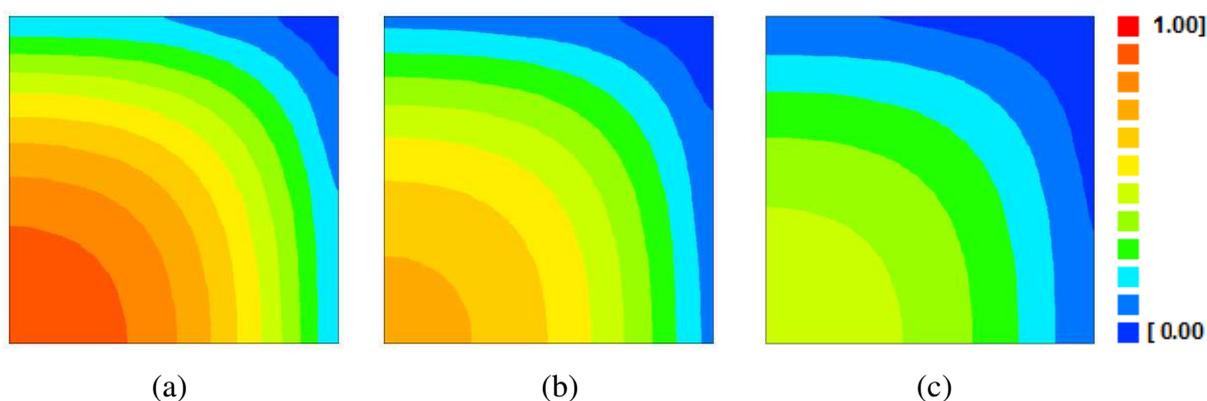


Figura 4.37: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 45 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Os mesmos comentários feitos para a distribuição do teor de água nas Figuras 4.34 e 4.35 se aplicam para Figuras 4.36 e 4.37. Atente-se, no entanto, para o menor teor de água mostrado na escala.

**4.4.3.3 Simulação da razão do teor de água em cubos com arestas de 1,0 cm, pré-tratados osmoticamente em solução na concentração de 65 °Brix e submetidos a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C**

Tem-se nas Tabelas 4.34, 4.35 e 4.36, os valores referentes aos parâmetros  $B$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e do indicador estatístico ( $\chi^2$ ), para o teor de água, em amostra tratadas em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetidos a secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Tabela 4.34 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9916071	9,976676	0,763385	$1,427 \times 10^{-7}$	$2,083 \times 10^{-5}$	0,730	$1,0602 \times 10^{-2}$
1	0,9690111	9,236691	1,037193	$7,155 \times 10^{-8}$	$2,511 \times 10^{-5}$	1,755	$0,8724 \times 10^{-2}$
<b>2</b>	<b>0,9578030</b>	<b>8,955819</b>	<b>1,113656</b>	<b><math>6,017 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>2,724 \times 10^{-5}</math></b>	<b>2,264</b>	<b><math>0,8176 \times 10^{-2}</math></b>
3	0,9873071	9,571989	0,842014	$1,125 \times 10^{-7}$	$2,122 \times 10^{-5}$	0,943	$1,0621 \times 10^{-2}$

Tabela 4.35 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 60 °C.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9964694	1,305784	0,620186	$2,829 \times 10^{-7}$	$2,501 \times 10^{-5}$	0,442	$0,0460 \times 10^{-2}$
1	0,9811068	1,243914	0,924478	$1,212 \times 10^{-7}$	$2,969 \times 10^{-5}$	1,225	$0,0407 \times 10^{-2}$
<b>2</b>	<b>0,9632765</b>	<b>1,191006</b>	<b>1,078634</b>	<b><math>8,530 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>3,431 \times 10^{-5}</math></b>	<b>2,011</b>	<b><math>0,0401 \times 10^{-2}</math></b>
3	0,8659060	0,956179	1,450211	$3,789 \times 10^{-8}$	$9,069 \times 10^{-5}$	11,968	$1,5143 \times 10^{-2}$

Tabela 4.36 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 70 °C.

Pontos Removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9954011	1,415565	0,661006	$2,700 \times 10^{-7}$	$2,776 \times 10^{-5}$	0,514	$0,192 \times 10^{-2}$
1	0,9728685	1,320186	1,005757	$1,088 \times 10^{-7}$	$3,451 \times 10^{-5}$	1,586	$0,102 \times 10^{-2}$
<b>2</b>	<b>0,9614981</b>	<b>1,285719</b>	<b>1,090441</b>	<b><math>9,010 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>3,770 \times 10^{-5}</math></b>	<b>2,092</b>	<b><math>0,0897 \times 10^{-2}</math></b>
3	0,9097056	1,159656	1,324986	$5,504 \times 10^{-8}$	$5,813 \times 10^{-5}$	5,281	$0,342 \times 10^{-2}$

Conforme apresentado nas Tabelas 4.34, 4.35 e 4.36 os valores ótimos obtidos para o qui-quadrado foram  $0,8176 \times 10^{-2}$ ;  $0,040 \times 10^{-2}$  e  $0,0897 \times 10^{-2}$ , respectivamente, para amostras submetidas a secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C após a supressão dos dois primeiros pontos. Apresentando uma discrepância de, aproximadamente -2,3. Assim como ocorrido para desidratações osmóticas em soluções com concentrações de 25 e 45 °Brix os maiores valores atribuídos a difusividade efetiva e ao coeficiente de transferência convectiva foram para amostras tratadas nas maiores temperaturas. Com relação ao tempo de determinação, o *software Convective* apresentou os resultados após 30 minutos, aproximadamente, para 30 segundos com o algoritmo descrito neste trabalho.

Na Figura 4.38 estão dispostas as distribuições do teor de água para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C para os tempos:  $t = 60 \text{ min}$ ,  $t = 120 \text{ min}$  e  $t = 220 \text{ min}$ .

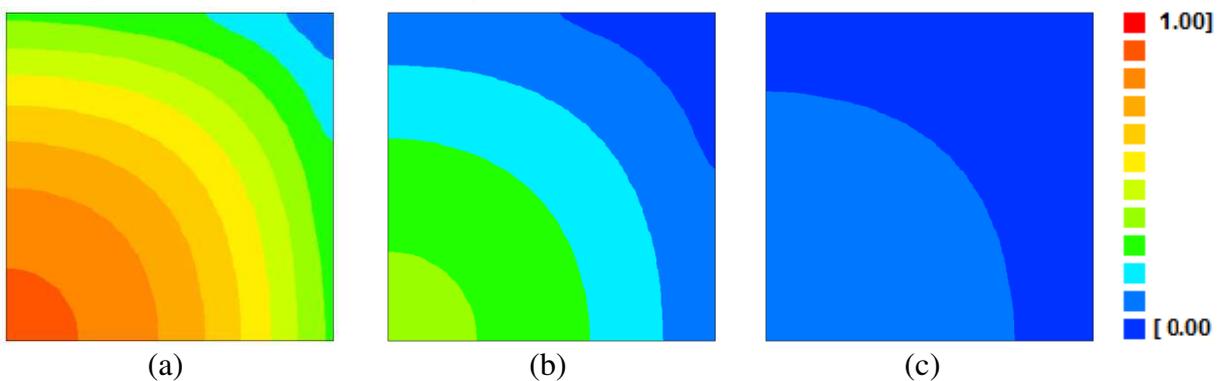


Figura 4.38: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano  $xy$  com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.39 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de água para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 65 °Brix e submetidos a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C para o quarto do plano xy com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros após decorridos 60 minutos de secagem.

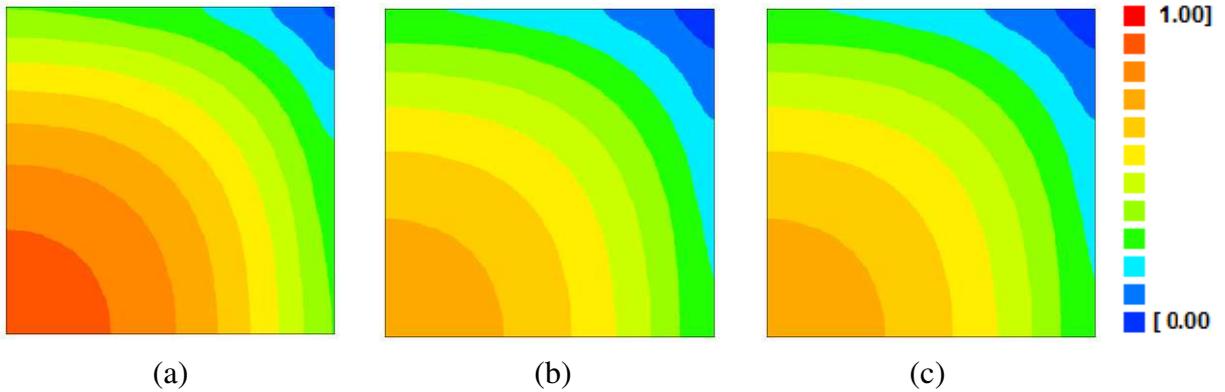


Figura 4.39: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 50 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Na Figura 4.40 estão dispostas as distribuições do teor de água para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C para os tempos:  $t = 60$ ,  $t = 120$  e  $t = 220$  minutos.

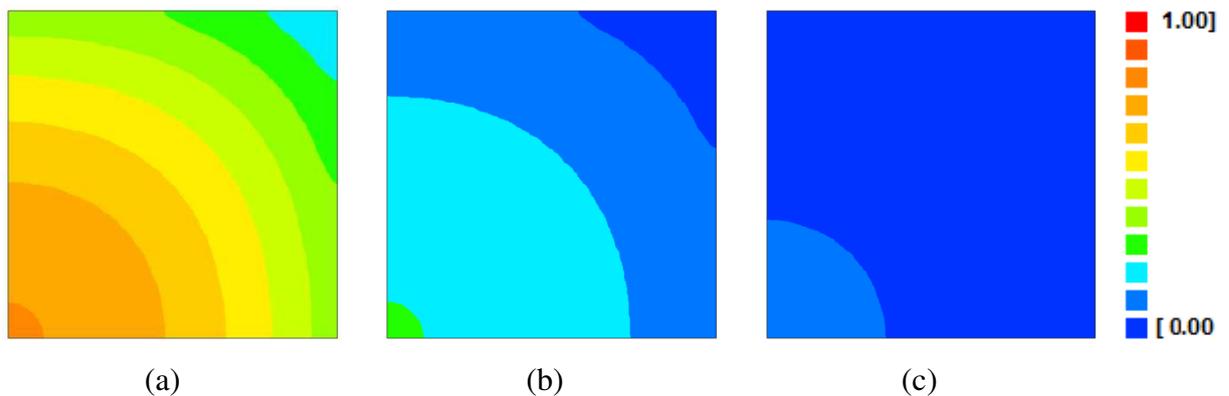


Figura 4.40: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.41 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de água para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 65 °Brix e submetidos a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C para o quarto do plano xy com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros após decorridos 60 minutos de secagem.

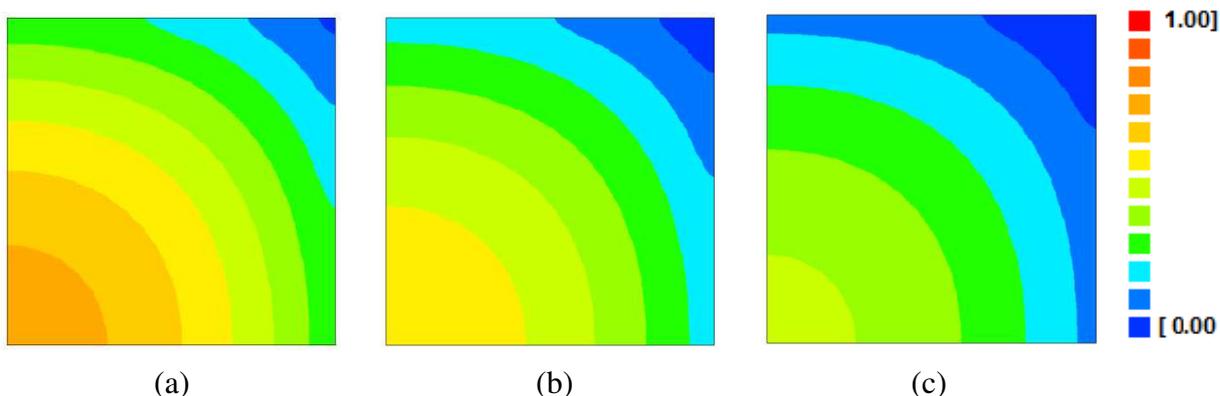


Figura 4.41: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 60 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Na Figura 4.42 estão dispostas as distribuições do teor de água para amostra tratada em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C para os tempos:  $t = 60$ ,  $t = 120$  e  $t = 220$  minutos.

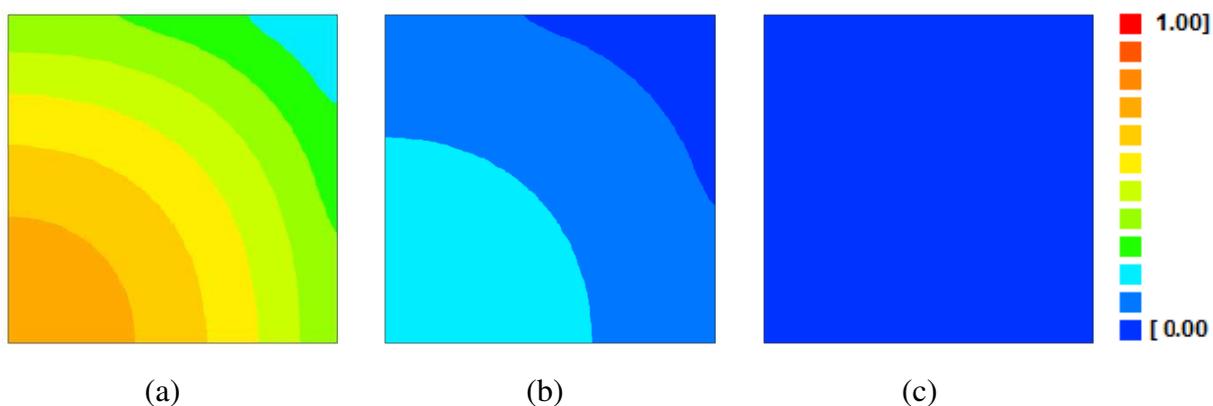


Figura 4.42: Distribuição do teor de água em amostras tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C nos instantes (a) 60 minutos, (b) 120 minutos; (c) 220 minutos para o quarto do plano xy com  $z = 0,0$ .

Na Figura 4.43 são apresentadas as imagens da distribuição do teor de sólidos para amostras tratadas em solução osmótica, com quantidade de sólidos solúveis totais de 65 °Brix e submetidos a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C para o quarto do plano xy com  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ;  $0,3 \times 10^{-2}$  e  $0,4 \times 10^{-2}$  metros após decorridos 60 minutos de secagem.

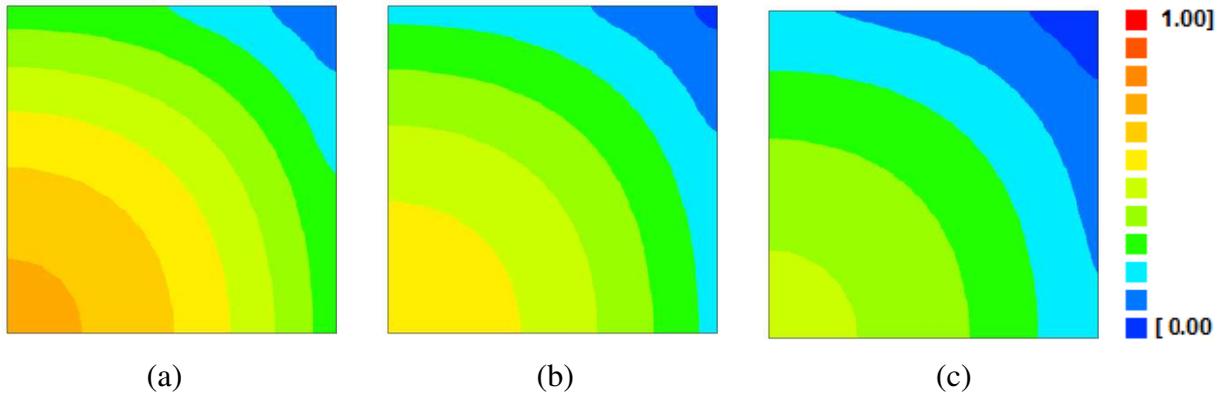


Figura 4.43: Distribuição do teor de água em amostras pré-tratadas em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior em estufa na temperatura de 70 °C no instante 60 minutos para o quarto do plano, localizados nas seguintes posições, em metros, (a)  $z = 0,1 \times 10^{-2}$ ; (b)  $z = 0,3 \times 10^{-2}$  e (c)  $z = 0,4 \times 10^{-2}$ .

Estas informações sobre a distribuição de água são significativas porque possibilitam prever regiões de grandes tensões produzidas por gradientes do teor de água, e isto é importante porque estas tensões podem danificar o produto durante a secagem.

#### 4.4.3.4 Simulação da razão do teor de água de cubos com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, pré-tratados em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetido a secagem posterior na temperatura de 50 °C

Tem-se nas Tabelas 4.37, 4.38 e 4.39, respectivamente, para os cubos de melão com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm, os valores referentes aos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e do indicador estatístico ( $\chi^2$ ), para o teor de água, em amostra tratadas em solução osmótica na concentração de 65 °Brix e submetidos a secagem posterior nas temperaturas de 50 °C.

Tabela 4.37 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 1,5 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.

Pontos Removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9776371	2,617065	0,961578	$5,306 \times 10^{-8}$	$1,462 \times 10^{-5}$	1,378	$6,084 \times 10^{-2}$
1	0,9642819	2,465437	1,071758	$3,945 \times 10^{-8}$	$1,551 \times 10^{-5}$	1,966	$5,589 \times 10^{-2}$
2	0,9492557	2,304707	1,161762	$3,142 \times 10^{-8}$	$1,684 \times 10^{-5}$	2,680	$5,113 \times 10^{-2}$
3	0,9326012	2,142560	1,239580	$2,576 \times 10^{-8}$	$1,857 \times 10^{-5}$	3,604	$4,660 \times 10^{-2}$
4	0,9100292	1,942611	1,323912	$2,063 \times 10^{-8}$	$2,167 \times 10^{-5}$	5,253	$4,128 \times 10^{-2}$
<b>5</b>	<b>0,8887152</b>	<b>1,764197</b>	<b>1,389663</b>	<b><math>1,720 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>2,610 \times 10^{-5}</math></b>	<b>7,588</b>	<b><math>3,729 \times 10^{-2}</math></b>
6	0,8247279	1,547570	1,542619	$1,075 \times 10^{-8}$	$3,661 \times 10^{-5}$	17,030	$5,027 \times 10^{-2}$

Tabela 4.38 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 2,0 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.

Pontos Removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9811965	2,055336	0,923450	$8,034 \times 10^{-8}$	$1,962 \times 10^{-5}$	1,221	$4,444 \times 10^{-2}$
1	0,9730974	1,977335	1,003783	$6,576 \times 10^{-8}$	$2,073 \times 10^{-5}$	1,576	$4,127 \times 10^{-2}$
2	0,9646576	1,904583	1,069149	$5,553 \times 10^{-8}$	$2,314 \times 10^{-5}$	2,084	$3,850 \times 10^{-2}$
3	0,9542670	1,823638	1,134414	$4,724 \times 10^{-8}$	$2,298 \times 10^{-5}$	2,432	$3,555 \times 10^{-2}$
4	0,9404889	1,726120	1,204869	$3,963 \times 10^{-8}$	$2,492 \times 10^{-5}$	3,144	$3,219 \times 10^{-2}$
5	0,9271201	1,639274	1,261872	$3,431 \times 10^{-8}$	$3,399 \times 10^{-5}$	4,953	$2,942 \times 10^{-2}$
6	0,9076608	1,522435	1,331771	$2,861 \times 10^{-8}$	$3,127 \times 10^{-5}$	5,465	$2,634 \times 10^{-2}$
<b>7</b>	<b>0,8768174</b>	<b>1,352069</b>	<b>1,422294</b>	<b><math>2,227 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>4,234 \times 10^{-5}</math></b>	<b>9,507</b>	<b><math>2,529 \times 10^{-2}</math></b>
8	0,8422136	1,183592	1,505523	$1,740 \times 10^{-8}$	$8,015 \times 10^{-5}$	23,032	$3,751 \times 10^{-2}$

Tabela 4.39 – Valores dos parâmetros  $B_1$  e  $C$ , da primeira raiz ( $\mu$ ), difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), coeficiente de transferência convectiva ( $h$ ), número de Biot ( $Bi$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), durante secagem em estufa de cubos de melão com arestas de 2,5 cm, pré-tratadas em solução de sacarose na concentração de 65 °Brix, na temperatura de 50 °C.

Pontos removidos	$B_1$	$C \times 10^3$	$\mu$	$D_{ef}$ ( $m^2 \text{ min}^{-1}$ )	$h$ ( $m \text{ min}^{-1}$ )	$Bi$	$\chi^2$
0	0,9715572	1,813682	1,016818	$9,135 \times 10^{-8}$	$3,002 \times 10^{-5}$	1,643	$4,424 \times 10^{-2}$
1	0,9604803	1,716455	1,097003	$7,428 \times 10^{-8}$	$3,178 \times 10^{-5}$	2,139	$3,946 \times 10^{-2}$
2	0,9499436	1,634411	1,158138	$6,348 \times 10^{-8}$	$3,358 \times 10^{-5}$	2,645	$3,561 \times 10^{-2}$
3	0,9394204	1,560221	1,209776	$5,552 \times 10^{-8}$	$3,558 \times 10^{-5}$	3,204	$3,220 \times 10^{-2}$
4	0,9271333	1,481639	1,261820	$4,846 \times 10^{-8}$	$3,831 \times 10^{-5}$	3,953	$3,837 \times 10^{-2}$
5	0,9152287	1,411041	1,306080	$4,308 \times 10^{-8}$	$4,151 \times 10^{-5}$	4,818	$2,483 \times 10^{-2}$
6	0,9000171	1,328934	1,356128	$3,763 \times 10^{-8}$	$4,681 \times 10^{-5}$	6,220	$2,036 \times 10^{-2}$
7	0,8788999	1,223048	1,416759	$3,173 \times 10^{-8}$	$5,790 \times 10^{-5}$	9,124	$1,541 \times 10^{-2}$
<b>8</b>	<b>0,8598932</b>	<b>1,126374</b>	<b>1,471198</b>	<b><math>2,779 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>8,215 \times 10^{-5}</math></b>	<b>14,78</b>	<b><math>1,208 \times 10^{-2}</math></b>
9	0,8308554	1,063911	1,529930	$2,297 \times 10^{-8}$	$1,719 \times 10^{-5}$	37,41	$2,315 \times 10^{-2}$

Conforme pode-se verificar nas Tabelas 4.37 a 4.39 os menores valores obtidos para o indicador estatístico qui-quadrado foram obtidos quando suprimidos os primeiros 5, 7 e 8 pontos experimentais, respectivamente, para amostras com 1,5; 2,0 e 2,5 cm de aresta. Para estes mínimos os indicadores estatísticos obtidos foram  $3,729 \times 10^{-2}$ ;  $2,529 \times 10^{-2}$  e  $1,208 \times 10^{-2}$ . A discrepância entre os valores obtidos através deste algoritmo e o *software Convective* foi de -2,4 %, aproximadamente, levando para entrega dos resultados, aproximadamente, 44 minutos, enquanto o algoritmo desenvolvido necessitou de, aproximadamente, 30 segundos.

### 4.3 Análise físico-química

#### 4.3.1 Avaliação físico-química do melão “*in natura*” e desidratado em solução osmótica nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix

Nas Tabelas 4.40 e 4.41 encontram-se os valores das médias da caracterização físico-química dos cubos de melão “*in natura*” e desidratados em soluções osmóticas de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

Obteve-se, neste trabalho, para o teor de água 94,16 % (melão *in natura*) e 81,91; 74,81 e 65,28 %, respectivamente, para as amostras desidratadas nas soluções de sacarose com concentrações de 25, 45 e 65 °Brix. O valor expresso para o teor de água do melão *in natura* condiz com os obtidos por Silva et al. (2011b) que ao estudar parâmetros químicos, físicos e físico-químicos de três variedades de melão verificou teores de água que variavam entre 92,77 % e 95,75 %, para as variedades Japonês e Pele-de-Sapo, respectivamente. Valores menores, para este parâmetro, são mencionados na Tabela Brasileira de Composição de Alimentos, 91,3 % (TACO, 2011) e por Solval et al. (2012), ao determinar o teor de água em amostras de melão da variedade Cantaloupe, com 91,3 %. A amplitude verificada em muitos trabalhos para este parâmetro deve-se, principalmente, a dois fatores principais: a variedade de melão analisada e estágio de maturação das amostras.

Ainda para o teor de água as amostras tratadas em soluções com concentrações mais elevadas de sacarose apresentaram menores valores para o teor de água, nota-se que houve reduções de 13; 20,55 e 30,67 % nos teores de água presentes nos frutos desidratados em soluções osmóticas de 25, 45 e 65 °Brix, respectivamente, quando comparados ao fruto *in natura*. Comportamento similar foi observado por Nagai (2012) ao desidratar fatias de manga utilizando soluções osmóticas com concentrações de 40, 50 e 60 °Brix. Segundo Barbosa (2013) a redução do teor de água conforme o aumento da concentração da solução osmótica ocorre devido à diferença de potencial osmótico da água e soluto entre a amostra e a solução osmótica, fato também relatado por Zhao et al. (2014) ao analisar pré-tratamento de desidratação osmótica para melhorar atributos de manga congelados e quais os efeitos de diferentes solutos osmóticos e concentrações.

Tabela 4.40 – Valores médios da caracterização físico-química do melão “*in natura*”.

PARÂMETROS											
<i>In Natura</i>	Teor de água	Aw <sup>1</sup>	pH	Acidez	AT <sup>2</sup> (g/100g)	AR <sup>3</sup> (g/100g)	ANR <sup>4</sup> (g/100g)	Cinzas (g/100g)	Cor		
									L*	a*	b*
<b>Média</b>	94,16	0,97	6,36	1,23	11,75	7,96	3,66	0,51	66,13	-1,68	36,02
<b>DMS</b>	0,05	0,00	0,07	0,01	0,03	0,04	0,04	0,06	0,03	0,08	0,30

Médias seguidas das mesmas letras na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

<sup>1</sup>Aw Atividade de água, <sup>2</sup>AT Açúcar Total, <sup>3</sup>AR Açúcar Redutor, <sup>4</sup>ANR Açúcar Não-Redutor, DMS – diferença mínima significativa, L\* Luminosidade, a\* Transição da cor verde para cor vermelha, b\* Transição da cor azul para cor amarela.

Tabela 4.41 – Valores médios da caracterização físico-química do melão com arestas de 1,0 cm, submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix

PARÂMETROS											
°Brix	Teor de água	Aw <sup>1</sup>	pH	Acidez	AT <sup>2</sup> (g/100g)	AR <sup>3</sup> (g/100g)	ANR <sup>4</sup> (g/100g)	Cinzas (g/100g)	Cor		
									L*	a*	b*
<b>25</b>	81,91 a	0,96 a	5,97 c	1,33 b	14,06 c	9,62 a	4,09 c	0,82 a	67,05 c	-1,86 a	9,07 c
<b>45</b>	74,81 b	0,93 b	6,22 b	1,42 ab	28,39 b	9,17 b	17,56 b	0,73 a	68,00 b	-2,01 b	9,56 b
<b>65</b>	65,28 c	0,86 c	6,30 a	1,56 a	39,11 a	7,55 c	29,98 a	0,52 b	70,02 a	-2,5 c	10,03 a
<b>DMS</b>	0,65	0,01	0,05	0,15	0,15	0,16	0,12	0,17	0,88	0,13	0,34
<b>CV%</b>	0,35	0,23	0,31	4,18	0,22	0,75	0,28	10,00	2,00	0,56	0,20

Médias seguidas das mesmas letras na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

<sup>1</sup>Aw Atividade de água, <sup>2</sup>AT Açúcar Total, <sup>3</sup>AR Açúcar Redutor, <sup>4</sup>ANR Açúcar Não-Redutor, DMS – diferença mínima significativa, L\* Luminosidade, a\* Transição da cor verde para cor vermelha, b\* Transição da cor azul para cor amarela.

A água é o principal constituinte dos alimentos frescos, como é o caso das frutas, sendo possível estabelecer uma estreita relação entre o conteúdo de água no alimento e sua conservação. A atividade de água, expressa pelo teor de água livre no produto, é considerada um parâmetro de referência no processamento de alimentos, uma vez que está relacionada com o crescimento microbiano e com as reações químicas e enzimáticas que podem ocorrer no produto durante o armazenamento.

Os valores de atividade de água obtidos para as amostras, 0,97 (*in natura*) e 0,96; 0,93 e 0,86 para amostras desidratadas em solução nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix, respectivamente, evidenciam a relação inversamente proporcional da concentração da solução osmótica e a atividade de água nas amostras desidratadas. Os valores obtidos corroboram com as observações realizadas por Ferrari (2005) que ao desidratar melão utilizando solução osmótica de sacarose nas concentrações de 40, 50 e 60 °Brix verificou decréscimo da atividade de água, sendo esta característica mais perceptível entre as amostras de 50 e 60 °Brix, assim como o comportamento verificado nas amostras submetidas a tratamentos de 45 e 65 °Brix deste experimento.

Segundo Yan et al. (2008) quando a atividade de água nos alimentos encontra-se com valores entre 0 e 0,6 o crescimento de micro-organismos é reduzida ou praticamente desativado, garantindo assim uma prolongação na vida de prateleira do alimento. E este é o motivo para que posterior à desidratação osmótica seja realizada outro tipo de secagem, como por exemplo, a secagem em estufa.

Os quantitativos obtidos para o pH variaram entre 6,36 (*in natura*) e 5,97 (solução osmótica à concentração de 25 °Brix). Enquanto que para a acidez, como era de se esperar, os valores são crescentes. Resultado de pH próximos a este foram verificados por Silva et al. (2011b) para melões da variedade Japonês (6,49). Segundo Azeredo et al. (2004) este comportamento torna o alimento menos susceptíveis ao desenvolvimento de microrganismos. De forma geral todas as amostras apresentaram pH superior a 4,5, sendo considerados alimentos de baixa acidez, de acordo com Franco e Landgraf (2008).

Nas Tabelas 4.16 e 4.17, respectivamente, os valores referentes aos açúcares totais aumentaram com o aumento da concentração da solução osmótica no processo de desidratação. Comportamento similar foi evidenciado por Amaral (2011) ao desidratar fatias de coco em soluções osmóticas de sacarose nas concentrações de 25, 35 e 45 °Brix.

O comportamento verificado ao analisar os teores de açúcares redutores (diminuição para concentrações mais elevadas da solução osmótica) e açúcares não redutores (aumento para concentrações mais elevadas da solução osmótica) deve-se ao fato de que os açúcares redutores (glicose e frutose) sofrerem lixiviação já que a membrana celular responsável pelo transporte osmótico não é perfeitamente seletiva (GOULA e LAZARIDES, 2012), enquanto que a incorporação da sacarose presente na solução acarreta o aumento nos teores de açúcares não redutores (sacarose) nas amostras.

Em relação ao conteúdo de minerais (cinzas) as amostras apresentaram teores variando de 0,5 % (*in natura*) a 0,82 % (desidratado em solução osmótica com concentração de 25 °Brix). Valor superior de cinzas foi encontrado por Argandoña et al. (2002) para a mesma variedade de melão que foi de 0,56 %. De acordo com TACO (2011) o teor de cinzas do melão é em média 0,5 %. Gondim et al. (2005) relataram valor de minerais superior nas cascas do melão (0,96 %), enfatizando que as cascas das frutas apresentam, em geral, teores de nutrientes maiores do que os das suas respectivas partes comestíveis.

Os pigmentos naturais são compostos instáveis e participam de diferentes reações. Em função disto, a alteração de cor de um alimento é um indicador das alterações químicas e bioquímicas possíveis de ocorrer durante o processamento e estocagem (RIBEIRO et al., 2007). Segundo Osório et al. (2007), no processo de desidratação osmótica a alteração de cor é uma das mudanças sensoriais mais significativas.

Um dos atributos de qualidade e preferência do consumidor é a coloração. Através da análise de cor das amostras de melão (*in natura* e desidratado em solução de 25, 45 e 65 °Brix), obteve-se para o parâmetro de luminosidade ( $L^*$ ), 66,13 (*in natura*) e 67,05, 68,00 e 70,02, para as amostras submetidas a soluções com 25, 45 e 65 °Brix, respectivamente, os quais indicam tendência de amostras mais claras, comportamento semelhante foi observado por Sanjinez-Argandoña et al. (2002), sendo que os autores atribuíram a elevação do parâmetro  $L^*$  nas amostras desidratadas osmoticamente à variação das concentrações da solução hipertônica. Silva et al. (2011b) obtiveram valores para o parâmetro  $L^*$  de 71,95, 69,92 e 55,29 para as variedade de melão Amarelo-Ouro, Japonês e Pele-de-Sapo, respectivamente, todos *in natura*. Indicando que a variedade de melão Amarelo-Ouro demonstra uma tendência ao escuro enquanto que a Pele-de-Sapo mostra uma tendência mais clara quando comparada com a variedade estudada (melão Amarelo). Valores próximos aos obtidos foram relatados por Sanjinez-Argandoña (2002) para a polpa de melão Gold Mine

com teor médio de luminosidade de 65,80. Valor próximo ao obtido neste trabalho também é relatado por Silva et al. (2016) para o melão cantaloupe.

Abraão et al. (2013), ao estudar a Influência dos parâmetros do processo de desidratação osmótica na qualidade de amostra na forma cilíndrica de abóboras cristalizadas em soluções de sacarose nas concentrações de 40, 50 e 60 °Brix, afirmam que o processo de desidratação osmótica altera a composição interna da amostra, tornando-a mais homogênea. Isto leva a índices de refração mais homogêneos, que promovem a absorção de luz contra a dispersão, resultando em produtos com maior transparência.

A escala do parâmetro  $a^*$  varia do índice de saturação verde (-) ao vermelho (+), constata que as amostras dos melões, tanto *in natura*, quanto desidratados em 25, 45 e 65 °Brix apresentaram valores que estão dentro da escala de intensidade verde, -1,68 (*in natura*) e -1,86, -2,01 e -2,5 para amostras desidratadas em solução de sacarose à 25, 45 e 65 °Brix, respectivamente. Silva et al. (2011b) encontrou valores próximos para o melão Amarelo-Ouro (-1,28) e Pele-de-Sapo (-1,57). Para Ferrari (2005), que estudou o processo de desidratação osmótica em melão Gold Mine com soluções de maltose e sacarose nas concentrações de 40, 50 e 60 °Brix, a baixa variação no parâmetro  $a^*$ , deve-se à ausência de cor vermelha e da cor verde pouco pronunciada no produto, já que foram utilizadas frutas maduras em todos os ensaios.

Com relação ao parâmetro  $b^*$ , responsável pela cor amarela do melão e que varia do índice de saturação azul (-) ao amarelo (+), todos os valores foram positivos, indicando que estavam dentro da escala da intensidade de amarelo ( $+b^*$ ) com tendência de amarelo mais acentuado para as amostras *in natura*. Os dados obtidos para este parâmetro foram: 36,02 (*in natura*), 9,07; 9,56 e 10,03, respectivamente, para as amostras tratadas em solução osmótica de 25, 45 e 65 °Brix. Este fato provavelmente esteja relacionado à perda de pigmentos junto aos líquidos que constituem as amostras, além da incorporação de açúcares durante o processo. Valores para o parâmetro  $b^*$  igual a 9,78 para a variedade Amarelo Ouro, 35,79 e 35,99 para melões das variedades Japonês e Pele-de-Sapo foram obtidos por Silva et al. (2011b) indicando uma tendência para o amarelo das amostras *in natura*, assim como nas amostras analisadas neste trabalho.

### 4.3.2 Avaliação físico-química do melão submetido à desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C

Na Tabela 4.42 encontram-se os valores das médias da caracterização físico-química dos cubos de melão submetido à desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Os quantitativos expressos para teor de água, obtidos neste trabalho, variam de 13,08 a 7,47, respectivamente, para amostras pré-tratadas em solução osmótica na concentração de 25 °Brix e secagem em temperatura de 50 °C e para amostras pré-tratadas em solução osmótica de 65 °Brix e secagem em temperatura de 70 °C. Nelas observa-se que o aumento da temperatura do ar de secagem provoca maiores perdas de água em período de tempo reduzido. Todas as amostras demonstraram comportamentos similares com uma dependência do teor de água para temperatura, quanto maior a temperatura menor o teor de água, e dependência do teor de água para a concentração da solução desidratante, quanto maior a concentração da solução menor o teor de água da amostra ao final do processo.

Resultados análogos foram relatados por Amaral (2011) ao realizar secagem de côco nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, pré-tratadas em solução osmótica de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix. Segundo Ihns et al. (2011) tanto o tempo de secagem como o teor de água final do material é afetado pela temperatura do ar de secagem, isso por que com o acréscimo da temperatura de secagem o a difusividade efetiva da água que constituía o material também sofre um acréscimo.

Nota-se que o teor de água em todas as amostras encontram-se abaixo de 14 % reduzindo mais de 86 % do teor de água em todas as amostras quando comparadas com a fruta *in natura*. O teor de água do melão submetido a secagem se mantém dentro dos padrões estabelecidos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) para produtos desidratados. A resolução RDC n° 272 de 22 de setembro de 2005 da ANVISA preconiza que produtos de frutas secos ou desidratados devem apresentar no máximo 25% do teor de água (BRASIL, 2005).

Tabela 4.42 – Valores médios da caracterização físico-química do melão com arestas de 1,0 cm, submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

PARÂMETROS												
°Brix	Temp. °C	Teor de água	Aw*	pH	Acidez	AT** (g/100g)	AR*** (g/100g)	ANR**** (g/100g)	Cinzas (g/100g)	Cor		
										L*	a*	b*
25	50	13,08 a	0,50 d	5,22 e	14,36 c	51, 94 i	24,17 d	27,06 i	3,08 a	39,90 bc	13,70 b	35,40 a
	60	11,75 c	0,44 e	5,22 e	15,28 b	59,54 h	31,68 b	35,94 c	3,05 a	22,82 e	19,53 a	31,00 bcd
	70	8,60 d	0,40 f	5,17 e	15,85 a	64,31g	35,41 a	37,04 g	3,02 a	9,13 f	18,55 a	30,45 bcd
45	50	12,61 ab	0,60 a	6,04 a	5,94 h	66, 40 f	20,05 f	30,03 h	1,78 b	50,14 a	12,20 bc	33,88 ab
	60	11,43 c	0,60 a	5,57 c	9,09 e	70,88 e	22,73 e	41,20 e	1,80 b	39,60 c	12,46 bc	30,34 bcd
	70	7,61 e	0,52 c	5,43 d	10,80 d	74,59 d	26,52 c	46,22 d	1,78 b	29,97 d	14,13 b	29,71 cd
65	50	12,04 bc	0,59 a	6,08 a	5,56 i	80, 25 c	12,55 i	49,30 f	1,47 c	50,56 a	8,31 e	27,39 de
	60	11,54 c	0,57 b	5,74 b	6,50 g	83,47 b	17,60 h	63,68 b	1,49 c	46,58 ab	9,64 de	24,52 e
	70	7,47 e	0,53 c	5, 27 e	8, 23 f	96, 41 a	19,02g	75,19 a	1,53 c	35,66 cd	11,31 cd	24,68 e
DMS		0,77	0,017	0,13	0,16	0,17	0,18	0,15	0,18	6,94	2,09	4,33
CV%		2,52	1,08	0,86	0,56	0,08	0,28	0,12	3,0	6,73	5,50	5,02

Médias seguidas das mesmas letras na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

<sup>1</sup>Aw Atividade de água, <sup>2</sup>AT Açúcar Total, <sup>3</sup>AR Açúcar Redutor, <sup>4</sup>ANR Açúcar Não-Redutor, DMS – diferença mínima significativa, L\* Luminosidade, a\* Transição da cor verde para cor vermelha, b\* Transição da cor azul para cor amarela.

Para atividade de água percebe-se que todas as amostras estão na faixa de valores considerados microbiologicamente estável, de acordo com Ordóñez (2005); Souza Neto e Sousa (2008); Franco e Landgraf (2008). Pode-se afirmar que as amostras submetidas à desidratação osmótica em soluções com menores concentrações obtiveram resultados de atividade de água melhores. O valor médio da atividade de água nas amostras desidratadas nas soluções osmóticas com concentrações de 25, 45 e 65 °Brix foi de 0,44; 0,57 e 0,56. Fenômeno similar foi referenciado por Amaral (2011), que ao desidratar fatias de coco em soluções com 25, 35 e 45 °Brix, obteve os seguintes valores médios de atividade de água: 0,55; 0,57 e 0,65, respectivamente. Desta forma percebe-se a existência de uma correlação entre a atividade de água e a temperatura; sendo que para amostras pré-tratadas em soluções osmóticas com mesmo °Brix quanto maior for a temperatura menos a atividade de água. Enquanto que para amostras pré-tratadas em soluções osmóticas com °Brix diferentes o menor valor para atividade de água foi obtida pela amostra que foi submetida a desidratação osmótica em solução com menor concentração.

Em relação ao potencial hidrogeniônico na Tabela 4.42, observa-se que o aumento da temperatura de secagem e com o aumento da solução de sacarose na solução osmótica acarreta um aumento do pH. Enquanto que para a acidez, verifica-se o processo contrário, ou seja, a acidez diminui com o aumento da temperatura de secagem e com o aumento da concentração da solução osmótica à qual o melão foi submetido no pré-tratamento.

No que concerne aos quantitativos de açúcares totais percebe-se acréscimo com o aumento da temperatura de secagem e também com o aumento da concentração do desidratante. Este comportamento decorre do fato de que quanto maior o °Brix da solução maior a quantidade de açúcar a ser impregnada a amostras e no que se refere à temperatura de secagem quanto maior for esta variável maior a quantidade de água retirada do produto acarretando um maior valor percentual ao açúcar presente no melão.

Os teores de açúcares redutores (glicose e frutose) sofrem aumento quando, para uma mesma concentração da solução osmótica, a secagem é feita em temperatura mais elevada. Dias et al. (2011) ao estudar a influência da temperatura sobre as alterações físicas, físico-químicas e químicas de geléia da casca de banana (*musa spp.*) durante o armazenamento verificou comportamento similar sendo que o fenômeno está relacionado a inversão da sacarose (açúcar não redutor em açúcar redutor). A inversão de sacarose e a caramelização são importantes reações que ocorrem durante a cocção a pressão ambiente. Este comportamento pode ser verificado através dos dados expressos, por exemplo, para amostras

pré-tratadas em solução osmótica na concentração de 25 °Brix, em que se obteve 24,17; 31,68 e 35,41 % de açúcares redutores para temperaturas de secagem 50, 60 e 70 °C, respectivamente.

Ainda sobre a quantidade de açúcares redutores percebeu-se que ao comparar os percentuais em amostras submetidas a pré-tratamento em soluções osmóticas com diferentes concentrações e mesma temperatura de secagem quanto maior a quantidade de sólidos solúveis totais na solução osmótica menor a quantidade destes açúcares. Fato este ocasionado pela maior lixiviação destes componentes em virtude da maior pressão osmótica à que a amostra esta submetida.

Para os teores de açúcares não-redutores (sacarose) ocorre o aumento dos percentuais na proporção que aumentou a concentração das soluções osmóticas. Os valores dos açúcares não-redutores também mostraram dependências no que se refere a temperatura de secagem, quanto maior a temperatura de secagem maior a quantidade percentual destas estruturas. O fenômeno deve-se ao fato de que as amostras submetidas à soluções com mesma concentração e temperatura diferente terá maior percentual de açúcar quanto maior for a quantidade de água perdida, o que esta diretamente ligada a temperatura de secagem. Por este motivo, por exemplo, as amostras submetidas à solução com concentração de sacarose de 25 °Brix obtiveram valores percentuais de açúcares não-redutores 27,06; 35,94 e 37,04 para temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, respectivamente. E as amostras submetidas a secagem em temperaturas iguais e solução osmótica em concentração diferentes obtiveram percentuais de açúcares não-redutores maiores quanto maior foi a concentração da solução, uma vez que para a mesma temperatura espera-se que a mesma quantidade de água seja subtraída do material, sendo que o material submetido a solução osmótica com maior concentração absorverá maior quantidade de açúcares não-redutor (sacarose). Por este motivo, por exemplo, as amostras tratadas a 50 °C obtiveram, para teores de sacarose, 27,06; 30,03 e 49,30, respectivamente, para as concentrações de 24, 45 e 65 °Brix.

Em relação ao teor de minerais verificou-se que todas as amostras pré-tratadas em solução osmótica de mesma concentração obtiveram valores para este parâmetro estatisticamente iguais de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Desta forma percebeu-se uma dependência entre a quantidade de sólidos solúveis no meio osmótico e a quantidade de minerais na amostra, sendo que, como era de se esperar, este parâmetro apresenta-se independente da temperatura de secagem. As amostras desidratadas em 65 °Brix apresentaram quantitativos menores de minerais que às desidratadas a 45 °Brix, e estes

apresentaram valores menores que às aquelas desidratadas a 25 °Brix. Fenômeno similar foi verificado por Mundada et al. (2010) ao trabalhar com otimização de variáveis de processamento na desidratação osmótica de romã em soluções osmóticas de sacarose em diferentes concentrações e temperatura e com proporção de 1:4 (amostra/solução). O fato do teor de minerais diminuir na proporção que se aumenta a concentração da solução reside no fato que o aumento da concentração acarreta acréscimo na pressão osmótica e deste modo uma maior quantidade de sólidos presentes na amostra são arrastados juntamente com a água proveniente da amostra para dentro da solução osmótica.

De acordo com os dados fornecidos na Tabela 4.18 para o parâmetro  $L^*$  podemos verificar que todas as amostras submetidas a desidratação osmótica em soluções nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C apresentaram valores para claridade menores que aqueles apresentados por amostras *in natura* e daquelas apenas desidratadas, demonstrando tendência para o preto, enquanto que para o parâmetro  $a^*$  ocorreu aumento, demonstrando tendência deste parâmetro para a cor vermelha, assim como notou-se um aumento no parâmetro  $b^*$ , demonstrando uma tendência deste parâmetro para a cor vermelha em detrimento da cor verde. Phisut et al. (2013) ao realizar experimentos de secagem de melão Cantaloupe submetidos à pré-tratamento osmótico em soluções osmóticas de sacarose nas concentrações 30, 40 e 50 °Brix verificou que a diminuição nos valores do parâmetro  $L^*$  e aumento dos parâmetros  $a^*$  e  $b^*$ , demonstram aumento da concentração de carotenóides causado pela perda de água. Da mesma forma, Heredia et al. (2009) relataram que a perda de água ocasionou o aumento de betacaroteno e licopeno em tomates cereja. Já Falade et al. (2007) observaram uma cor mais escura na polpa de melancia submetida a osmose em virtude do incremento percentual de pigmentos durante o processo de desidratação osmótica e secagem. Comportamento similar, tanto para o parâmetro  $a^*$  como para o parâmetro  $b^*$ , é reportado por Silva et al. (2016) ao submeter fatias de melões ao desidratação osmótica e posterior secagem.

Além disso, uma diminuição no valor de  $L^*$  e um aumento em valores de  $a^*$  e  $b^*$  podem ser resultado de reações de escurecimento que ocorrem durante a secagem com ar quente. A reação de Maillard é a principal responsável pelo desenvolvimento de escurecimento em melões durante o processo de secagem. A reação de Maillard começa com uma condensação entre um grupo amino livre (de um aminoácido ou na proteína, mas também os grupos amino- $\alpha$  de aminoácidos terminais) e um grupo hidroxil-carbonil  $\alpha$  de um açúcar redutor em alimentos (PHISUT et al., 2013).

#### 4.4 Avaliação instrumental de textura

O efeito do processo de desidratação osmótica na dureza do melão pré-tratado em soluções osmóticas nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e submetido a secagem em estufa nas temperaturas de 25, 45 e 65 °C encontram-se na Figura 4.13.

Verificou-se que as maiores durezas foram para amostras desidratadas em 65, 45 e 25 °Brix, respectivamente. Segundo Phisut et al. (2013) uma possível justificativa para este ocorrido reside no fato de que como aumento das concentrações dos agentes osmóticos aumentou-se, também, a pressão osmótica, o que favoreceu a plasmólise da célula vegetal, como consequência houve a redução das dimensões das amostras e incrementando a resistência à deformação. Fenômeno semelhante foi relatado por Amaral (2011) sendo atribuído a resistência oferecida à compressão pelos sólidos presentes em maior quantidade nestas amostras, os quais provavelmente ocupam os espaços intercelulares, diminuindo a porosidade.

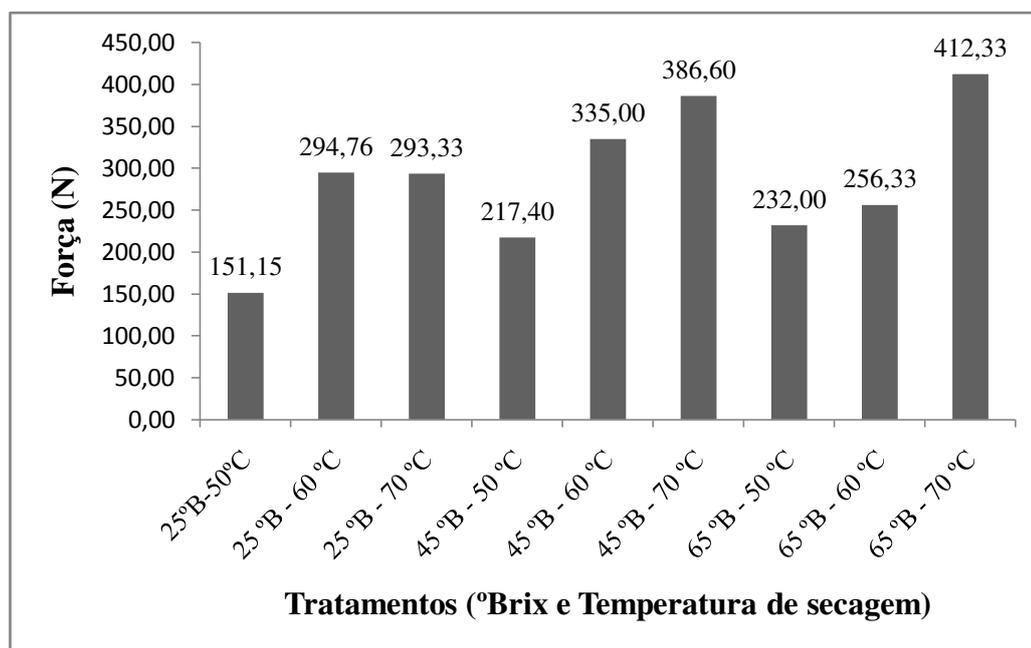


Figura 4.44 – Valores obtidos para a análise de firmeza do melão pré-tratado em soluções osmóticas nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e submetido a secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Outro comportamento verificado foi que dentre as amostras pré-tratadas em soluções

osmóticas com mesma concentração as que foram submetidas a secagem nas maiores temperaturas foram as que apresentaram maior dureza, fato esse que está relacionado a menor quantidade de água presente na amostra devido a maior temperatura de secagem. O único experimento em que não se evidenciou este comportamento foi para amostras tratadas em solução osmótica de 25 °Brix e temperaturas de 60 e 70 °C. Para estas condições obtiveram-se valores de 294,76 e 293,33 N, respectivamente. Uma explicação plausível para este comportamento, aparentemente anômalo reside no fato de que esta amostra submetida às condições de 25 °Brix e 60 °C tenha sido retirada do epicarpo, camada mais externa e mais dura do melão.

### 4.5 Análise sensorial

Os cubos de melões com arestas de 1,0 cm desidratados em solução osmótica de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C foram submetidos a análise sensorial. A seguir, na Tabela 4.43, são apresentados os dados referentes as médias das notas atribuídas pelos 40 provadores.

A partir da análise dos dados contidos na Tabela 4.43 para o atributo sabor verifica-se que as amostra desidratadas em soluções de maiores concentrações receberam melhores médias e para as três concentrações àquelas amostras tratadas nas menores temperaturas também foram as preferidas quando da análise. Percebe-se que neste atributo os provadores deram preferências as amostras com um dos maiores teores de água (12,04g/100g), uma vez que foram secas a menores temperaturas e as amostras que possuíam uma das maiores quantidade de açúcares (80,25g/100g), fato este demonstrado através da análise físico-química.

Com relação ao atributo aroma percebe-se que as amostras desidratadas a 25 °Brix obtiveram as menores médias, enquanto que as amostras desidratadas a 45 e 65 °Brix obtiveram valores mais elevados e não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Sendo que, para este atributo os maiores valores foram atribuídos a amostra pré-tratada em solução osmótica com concentração de 65 °Brix e submetida a secagem em estufa a temperatura de 50 °C.

Tabela 4.43: Médias dos fatores °Brix e temperatura de secagem para os parâmetros: sabor, aroma, aparência, cor e intenção de compra das amostras de melão, com arestas de 1,0 cm, desidratados em soluções osmóticas nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

°Brix	Temperatura (°C)	ATRIBUTOS				
		Sabor	Aroma	Aparência	Cor	Intenção de compra
25	50	2,90 cd	2,92 bc	2,52b	2,62 c	2,30cde
	60	2,50 de	3,08 bc	2,53b	2,75 bc	2,10de
	70	1,98 e	2,70c	2,03b	2,12 c	2,09 de
45	50	3,27 bc	3,47 ab	3,63 a	3,65 a	3,20 ab
	60	3,17 bcd	3,33 abc	3,23 a	3,47 a	2,87 bcd
	70	3,20 bcd	3,50 ab	3,27 a	3,47 a	3,00 bc
65	50	4,10 a	3,88 a	3,50 a	3,73 a	4,00 a
	60	3,25 ab	3,55 ab	3,50 a	3,50 a	3,50 ab
	70	3,17 bc	3,32 abc	3,27 a	3,32 ab	3,07 bc

Médias seguidas das mesmas letras na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, à 5 % de probabilidade.

Para o atributo aparência não notou-se um comportamento padrão nas notas atribuídas pelos provadores em se tratando de amostras submetidas a pré-tratamento em mesma solução. Todavia quando se compara as notas atribuídas às amostras tratadas em soluções com teores diferentes de sólidos solúveis fica evidente a preferência por aquelas que apresentam mais açúcares. Talvez a avaliação deste atributo tenha sido levada em consideração muito mais que a forma a cor das amostras.

Para o atributo cor percebeu-se a mesma tendência, em que as amostras desidratadas em soluções com menores quantidades de sólidos solúveis totais obtiveram menos valores de médias em detrimento daquelas desidratadas em soluções com maiores quantidade de sólidos solúveis totais.

No que concerne a intenção de compra percebe-se que a amostra que recebeu maiores notas foi aquela desidratada em solução osmótica na concentração mais elevada, 60 °Brix e temperatura de secagem mais baixa, 50 °C. A esta amostra, para este quesito foi atribuído nota 4,00 que na escala hedônica refere-se a provavelmente compraria. Antagonicamente, a

amostra que apresentou menores valores médios para a intenção de compra foi aquela pré-tratada em solução com a menor quantidade de sólidos solúveis totais e nas temperaturas de secagem mais elevadas.

Certamente esta tendência expressa nos valores das médias esta ligada ao fato de que as amostra desidratadas em soluções com maiores °Brix perderam quantidade menores de água, apresentaram valores de pH mais próximos do neutro e acidez com o menor valor dentre as amostras.

Com base na análise dos dados apresentados na Tabela 4.43 e discutidos acima verificou-se que a melhor condição de tratamento, considerando as notas atribuídas para todos os atributos (sabor, aroma, aparência, cor e intenção de compra) foi para amostras desidratada em 65 °Brix e submetida a secagem em estufa na temperatura de 50 °C. Sendo que para os atributos aroma, aparência e cor, ambas apresentaram valores que não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões com relação às pesquisas realizadas neste trabalho. Serão apresentadas, também, sugestões de temas para trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

De acordo com os resultados obtidos nos experimentos e análises, bem como através das ferramentas desenvolvidas, é possível apresentar as conclusões, enumeradas a seguir.

- Apesar do processo ser relativamente longo, a maior taxa de ganho de sacarose ocorre nas primeiras horas do experimento e tendem a zero nos instantes finais de operação, mostrando um comportamento típico da osmodesidratação de frutas;
- Pode-se verificar que a desidratação em solução osmótica nas maiores concentrações apresentaram diminuição do teor de água em menor tempo;
- Amostras desidratadas em soluções com maiores concentrações de sacarose apresentam maiores ganhos de açúcares para o mesmo tempo de desidratação, sendo verificado comportamento inverso no que concerne ao teor de água;

- Os parâmetros determinados para os experimentos de desidratação osmótica de melão mostraram-se condizentes com dados reportados na literatura;
- O teor de água de equilíbrio apresentado para todas as amostras após a desidratação osmótica estão acima dos valores máximos recomendados pela ANVISA, fato que corrobora com a necessidade de submeter o produto a um tratamento posterior;
- Os indicadores estatísticos apresentados pelos dois algoritmos, para desidratação osmótica, mostraram boa conformidade dos modelos com os dados experimentais, entretanto o algoritmo que utiliza a condição de contorno de terceiro tipo apresentou resultados melhores, indicando que esta condição é a que melhor representa o experimento;
- A cinética de desidratação osmótica foi realizada com sucesso. A solução da equação de difusão utilizando a condição de contorno de terceiro tipo permitiu a predição dos teores de água e de sacarose em quaisquer instantes de tempo, sendo que a distribuição foi apresentada;
- A difusividade efetiva da água (considerando a condição de contorno de primeiro tipo) variou entre  $4,875 \times 10^{-9}$  e  $7,705 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , respectivamente para amostra submetidas a solução na concentração de 25 e 65 °Brix, respectivamente, quando utilizada a condição de contorno de primeiro tipo e variação da difusividade efetiva da água entre  $0,546 \times 10^{-8}$  e  $1,521 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , para condição de contorno de terceiro tipo;
- A difusividade efetiva da sacarose (considerando a condição de contorno de primeiro tipo) variou entre  $7,254 \times 10^{-9}$  e  $10,486 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  para amostras desidratadas em soluções com concentração de 25 e 65 °Brix, respectivamente, quando utilizada a condição de contorno de primeiro tipo e variação da difusividade efetiva da água entre  $0,879 \times 10^{-8}$  e  $1,775 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ , para condição de contorno de terceiro tipo;

- Mantida a concentração da solução osmodesidratante para maiores temperaturas obteve-se maiores valores de difusividade efetiva de água e para o coeficiente de transferência convectiva de massa durante a secagem complementar;
- A perda de água é maior e mais acelerada à medida que também aumenta-se a temperatura de secagem;
- Os maiores valores para difusividade foram apresentados pelas amostras tratadas com secagem posterior na temperatura de 70 °C seguidas por 60 e 50 °C, respectivamente, para todas as amostras previamente osmodesidratadas;
- Amostras pré-tratadas em soluções com maiores quantidades de teores de sólidos solúveis apresentaram curvas de secagem mais acentuadas, mostrando ser o teor de sólidos na solução osmodesidratante consideravelmente importante no auxílio da remoção de água, também durante a secagem em estufa;
- Quando considerado a condição de contorno de primeiro tipo as amostras com maiores arestas apresentaram menores valores para difusividade efetiva de água durante a secagem em estufa;
- Todas as amostras, após a secagem, apresentaram teores de água de equilíbrio abaixo do recomendado pela ANVISA;
- Os resultados verificados para os indicadores estatísticos,  $\chi^2$  e  $R^2$ , durante a secagem posterior em estufa, mostram boa conformidade de ambos os modelos com os dados experimentais; entretanto, ao utilizar a condição de contorno de terceiro tipo os resultados obtidos foram consideravelmente melhores;
- Os valores obtidos para número de Biot ficaram entre 1,750 e 12,50 para amostras pré-tratadas em solução osmótica de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e submetidos a secagem posterior nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, corroborando com a afirmação anterior de que a melhor condição de contorno para os experimentos realizados é aquela que considera, como regente do processo de transferência de massa

não apenas a difusividade efetiva mas, também o coeficiente de transferência convectiva de massa;

- Para amostras desidratadas em solução osmótica de mesma concentração, quanto maior for a temperatura de secagem na estufa menor o tempo necessário para que se atinja o teor de água de equilíbrio, consequência do aumento da difusividade efetiva e do coeficiente de transferência convectiva de massa de água;
- Concernente aos valores obtidos para a difusividade efetiva as amostras que obtiveram os maiores valores foram aquelas osmodesidratadas em solução com concentração de 65 °Brix, seguida pelas amostras tratadas em 45 e 25 °Brix, respectivamente, isto quando se utilizou a condição de contorno de primeiro tipo;
- Os valores obtidos para o coeficiente de transferência convectiva indicam que a condição de contorno de terceiro tipo é mais apropriada pra descrição do processo de osmodesidratação realizado neste trabalho. Neste sentido, as resistências aos fluxos mássicos de água e de sacarose na superfície dos cubos de melão não podem ser desprezados;
- Os algoritmos desenvolvidos, apresentaram-se como ferramentas aptas para o estudo da desidratação osmótica e secagem complementar de frutas, assim como para análise de outros problemas difusivos por meio de soluções analíticas da equação de difusão, em formato de cubo, com geometria tridimensional e condições de contorno de primeiro e terceiro tipos;
- Com relação aos indicadores estatísticos, para secagem em estufa, houve boa conformidade de ambos os modelos com os dados experimentais, entretanto ao utilizar a condição de contorno de terceiro tipo os resultados foram, consideravelmente, melhores;
- Para atividade de água percebe-se que todas as amostras estão na faixa de valores considerados microbiologicamente estável quando submetidos a secagem posterior;

- Com relação ao pH todas as amostras apresentaram valores maiores de 4,5 sendo considerados alimentos de baixa acidez;
- No que concerne aos quantitativos de açúcares totais percebe-se acréscimo com o aumento da temperatura de secagem e também com o aumento da concentração do desidratante;
- Verificou-se, para teor de minerais, que todas as amostras pré-tratadas em solução osmótica de mesma concentração obtiveram valores para este parâmetro estatisticamente iguais;
- Com relação as análises de cor nota-se que as amostras que apresentaram maior escurecimento foram aquelas pré-tratadas em solução com menores concentração, isto para um mesma temperatura de secagem;
- Dentre as amostras pré-tratadas em soluções osmóticas com mesma concentração as que foram submetidas a secagem nas maiores temperaturas foram as que apresentaram maior dureza, fato esse que está relacionado a menor quantidade de água presente na amostra devido a maior temperatura de secagem;
- As amostras que apresentaram maior aceitação e intenção de compra para os atributos sabor, aroma, aparência e cor foram as desidratadas em solução osmótica na maior concentração (65 °Brix) e submetidas a secagem posterior na menor temperatura (50 °C).

### 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Aplicar as ferramentas desenvolvidas na descrição da secagem de outros produtos considerando a variação das dimensões das amostras durante os processos;
- Realizar experimentos recolhendo uma quantidade maior de valores experimentais o que certamente trará resultados ainda mais precisos;

- Aplicar as ferramentas desenvolvidas em outros processos tais como resfriamento, aquecimento e pasteurização de produtos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, B. S.; GHAVAMI, M.; TONDRO, H. Correction of moisture and sucrose effective diffusivities for shrinkage during osmotic dehydration of apple in sucrose solution. **Food and Bioproducts Processing**, v. 92, p. 1 – 8, 2014.

ABF - **Anuário Brasileiro da Fruticultura 2016**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2016. 92p.

ABRAÃO, A. S.; LEMOS, A. M.; VILELA, A.; SOUSA, J. M.; NUNES, F. M. Influence of osmotic dehydration process parameters on the quality of candied pumpkins. **Food and Bio Products Processing**, v. 91, p. 481 – 494, 2013.

AIRES, J. E. F. 2015. **Uso de soluções numéricas da equação de difusão em coordenadas cartesianas na descrição da desidratação osmótica de frutas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – Paraíba.

AIRES, J. E. F.; SILVA, W. P.; AIRES, K. L. C. A. F.; SILVA JUNIOR, A. F.; CASTRO, D. S.; SILVA, C. M. D. P. S. Guava osmotic dehydration: description by two-dimensional diffusion models considering shrinkage and variations in process parameters. **International Journal of Food Engineering**, v. 12, p. 100, 2016.

AIRES, K. L. C. A. F. 2016. **Estudo da desidratação osmótica de maçã cortada em uma configuração cúbica usando uma solução numérica tridimensional da equação de difusão**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – Paraíba.

AKPINAR E. K.; BICER Y. Mathematical modeling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. **Energy Conversion and Management**, v. 49, p 1367 – 1375, 2008.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, v. 59, p. 99 – 104, 2003.

ALAM, M. M.; ISLAM, M. N. Effect of process parameters on the effectiveness of osmotic dehydration of summer onion. **International Food Research Journal**, v. 20, p. 391 – 396, 2013.

AMAMI, E; VOROBIEV E.; KECHAOU N. Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apple tissue pre-treated by pulsed electric field. **Food Science and Technology**, v. 39, p. 1014 – 1021, 2006.

AMARAL, D. S. **Técnicas para obtenção de coco da bahia desidratado**. 2011. 145f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola), Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – Paraíba.

AMINZADEH, R.; SARGOLZAEI, J.; ABARZANI, M. Preserving melons by osmotic dehydration in a ternary system followed by air-drying. **Food Bioprocess Technology**, v. 5, p. 1305 – 1316, 2012.

ANDRADE, S.A.; METRI, J.C.; BARROS NETO, B. Desidratação osmótica do jenipapo (*Genipa americana* L.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, p.276 – 281, 2003.

APEX-BRASIL (Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos), **Perfil Exportador de Melões Brasileiros**, Brasília-DF, 2014.

ARAÚJO, J. P. **Cultura do melão**. Petrolina: EMBRAPA, Centro de Pesquisa Agropecuária para o Trópico Semi-árido, 1980. 40 p.

ARGANDOÑA, E. J. S. A.; NISHIYAMA, C.; HUBINGER, M. D., Qualidade final de melão osmoticamente desidratado em soluções de sacarose com adição de ácidos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 37, p. 1803 – 1810. 2002.

ASHURMETOV, O. A. On morphology and taxonomy of the genera *Cucumis* L. and *Melo* Mill. **Feddes Repertorium**, v. 106 , p. 155 – 159, 1995.

ASSIS, F. R., MORAIS, R. M. S. C., MORAIS, A. M. M. B. Mathematical modeling of osmotic dehydration kinetics of apple cubes. **Journal of Food Processing and Preservation**, DOI:10.1111/jfpp.12895, 2016.

ATEEQUE, M., UDAYRAJ, MISHRA, R. K., CHANDRAMOHAN, V. P., TALUKDAR, P. Numerical modeling of convective drying of food with spatially dependent transfer coefficient in a turbulent flow field. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 78, p. 145 – 157, 2014.

AYALA-APONTE, A.; SERNA-COCK, L.; LIBREROS-TRIANA, J.; PRIETO, C.; DI SCALA, K. Influence of osmotic pre-treatment on convective drying of yellow pitahaya. **DYNA**, v. 81, p. 145 – 151, 2014 .

AZEREDO, H. M. C.; PINTO, G. A. S.; BRITO, E. S.; AZEREDO, R. M. C. Alterações microbiológicas durante a estocagem. In: AZEREDO, H. M. C. **Fundamentos de estabilidade de alimentos**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, Cap.1, p.19 – 35, 2004.

AZOUBEL, P. M.; MURR, F. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomatoes. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 291 – 296, 2004.

AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. **Journal of Food Engineering**, v.55, p.323 – 330, 2002.

BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v.65, p.449 – 458, 2004.

BAINI, R., LANGRISH, T.A.G. An assessment of the mechanisms for diffusion in the drying of bananas. **Journal of Food Engineering**, v. 85, p. 201 – 214, 2008.

BARATI, E.; ESFAHANI, J. A. Mathematical simulation of convective drying: Spatially distributed temperature and moisture in carrot slab. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 56, p. 86 – 94, 2014.

BARBOSA, J. L.; MANCINI, M. C.; HUBINGER, M. D. Mass transfer kinetics and mathematical modelling of the osmotic dehydration of Orange-fleshed honeydew melon in corn syrup and sucrose solutions. **Food Science and Technology**, v. 48, p. 2463 – 2473, 2013.

BASUNIA, M. A.; ABE, T. Moisture desorption isotherms of medium-grain rough rice. **Journal of Stored Products Research**, v.37, p. 205 – 219, 2001.

BATES, R.; ROBSON, W.R. Evaluation of restriction fragment length polymorphisms in *Cucumis melo*. **Theoretical Applied Genetics**, v. 83, p. 379 – 384, 1995.

BCHIR, B.; BESBES, S.; KAROUI, R.; PAQUOT, M.; ATTIA, H.; BLECKER, C. Osmotic dehydration of pomegranate seeds using date juice as an immersion solution base. **Food Bioprocess Technology**, v. 10, p. 442 – 445, 2010.

BOERI, C.; SILVA, F.N. Predicting the drying kinetics of salted codfish: semi-empirical, diffusive and neural network models. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 46, p. 509 – 515, 2011.

BÓRQUEZ, R.M.; CANALES, E.R.; REDON, J.P. Osmotic dehydration of raspberries with vacuum pretreatment followed by microwave-vacuum drying. **Journal of Food Engineering**, v. 99, p. 121 – 127, 2010.

BOTHA, G. E.; OLIVEIRA, J. C.; AHRNÉ, L. Quality optimization of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission. **Food and Bio Products Processing**, v. 90, p. 171 – 179, 2012.

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

BROOKER, D.B.; BAKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**, New York: AVI Book, , 1999. 450p.

CARMO, J.E.F.; LIMA, A.G.B. Drying of lentil including shrinkage: a numerical simulation. **Drying Technology**, v. 23, p. 1977 – 1992, 2005.

CONCEIÇÃO, M. A.; CORRÊA, J. L. G.; SILVA, Z. E. Application of inverse methods in the osmotic dehydration of acerola, **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, p. 2477 – 2484, 2010.

CONTRERAS, J. E.; SMRYL, T. G. An evaluation of osmotic concentration of apple rings using corn syrup solids solutions. **Food Science and Technology**, v.14, p.310 – 314. 1981.

CORRÊA, J. L. G.; PEREIRA, L. M.; VIEIRA, G. S.; HUBINGER, M.D. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. **Journal of Food Engineering**, v. 96, p. 498 – 504, 2010.

COSTA, C. P.; PINTO, C. A. B. P. **Melhoramento de hortaliças**. Piracicaba, SP: ESALQ, p. 164 -175, 1977.

COSTA, N. D.; SILVA, H. R. **Melão: produção, aspectos técnicos**. Brasília: EMPRAPA, p. 29-34, 2003.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**, Oxford: Clarendon Press, 1992, 414 p.

DANTAS, D. J.; MENDONÇA, V.; NUNES, G. H. S.; GUIMARÃES, I. P.; DANTAS, D. J. Avaliação da vida útil pós-colheita de frutos de híbridos de melão cantaloupe. **Revista verde**, v.6, p. 226 – 234, 2011.

DARVISHI, H.; KHODAEI, J.; AZADBAKHT, M. The Parameters of Mass Transfer of Convective Drying in Sliced Melon. **Philipp Agric. Scientist**, v. 98, 360 – 372, 2015.

DAUDIN, J. D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides, **Sciences des Aliments**, v. 3, pg. 1 – 36, 1983.

DEVIC, E.; GUYOT, S.; DAUDIN, J. D.; BONAZZI, C. Effect of Temperature and Cultivar on Polyphenol Retention and Mass Transfer during Osmotic Dehydration of Apples. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, p. 606 – 614, 2010.

DIAMANTE, L.M.; YAMAGUCHI, Y. Response surface methodology optimization of dried apple-blackcurrant cubes. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 37, p. 1084 – 1093, 2013.

DIAS, C. S.; BORGES, S. V.; QUEIROZ, F.; PEREIRA, P. A. P. Influência da temperatura sobre as alterações físicas, físico-químicas e químicas de geleia da casca de banana (*Musa spp.*) Cv. Prata durante o armazenamento. **Revista Instituto Adolfo Lutz**, v. 70, p. 28 – 34, 2011.

DOYMAZ, I. Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. **Heat and Mass Transfer**, doi:10.1007/s00231-016-1791-8, 2016.

DOYMAZ, I. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki L.*). **Energy Conversion Manage**, v. 56, p. 199 – 205, 2012.

ELER, F. M.; SILVA, T. C.; SOUZA, B. M.; MANCINI, M. C., Estudo da desidratação osmótica de fatias de maçã verde em batelada. **VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, Uberlândia, Minas Gerais, 2009.

EL-SEBAIL, A. A.; SHALABY, S. M. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 109 – 116, 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema de Produção de Melão.** Versão eletrônica. 2012. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Melao/SistemaProducaoMelao/index.html>>. Acesso: 04 de abril de 2014.

ERDOGDU, F. A review on simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient. **Journal of Food Engineering**, v. 86, p. 453 – 459, 2008.

FALADE, K. O.; ADELAKUN, T. A., Effect of pre-freezing and solutes on mass transfer during osmotic dehydration and colour of oven-dried African star apple during storage. **International Journal of Food Science and Technology**, v.42, p. 394 – 402, 2007.

FALADE, K. O.; IGBEKA, J. C.; AYANWUYI, F. A., Kinetics of mass transfer and colour changes during osmotic dehydration of watermelon. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 979 – 985. 2007.

FARIAS, V. S. O. **Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas.** 2011. 265 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

FARKAS, D.; LAZAR, M.G. Osmotic dehydration of apple pieces. **Food Technology**, v. 23, p. 688 – 690, 1969.

FERNANDES, F. A. N.; GALLÃO, M. I.; RODRIGUES, S., Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. **Lebensmittel Wissenschaftund Technologie**, v.41, p. 604 – 610, 2008.

FERRARI, C. C.; **Estudo da transferência de massa e qualidade do melão desidratado osmoticamente em soluções de sacarose e maltose.** 2005. 98f. Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Universidade Estadual de Campinas. Campinas – SP.

FERRARI, C. C.; RODRIGUES, L. K.; TONON, R. V.; HUBINGER, M. D., Cinética de transferência de massa de melão desidratado osmoticamente em soluções de sacarose e maltose. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, p. 564 – 570, 2005.

FORTES, M.; OKOS, M. R. – Non-equilibrium thermodynamics approach to heat and mass transfer in corn kernel. **Transactions of ASAE**, v. 22, p. 761 – 769, 1981.

FRANCO, M. B. D. G.; LANDGRAF, M.; **Microbiologia dos alimentos.** São Paulo: Editora Atheneu, 2008.182 p.

GANJLOO, A.; RAHMAN, R. A.; BAKAR, J.; OSMAN, A.; BIMAKR, M. Optimization of Osmotic Dehydration of Seedless Guava (*Psidiumguajava* L.) in Sucrose Solution using Response Surface Methodology. **International Journal of Food Engineering**, v. 10, p. 307 – 316, 2014.

GARCÍA, M.; DÍAZ, R.; MARTÍNEZ, Y.; CASARIEGO, A. Effects of chitosan coating on mass transfer during osmotic dehydration of papaya. **Food Research International**, v. 43, p. 1656 – 1660, 2010.

GARCIA-NOGUERA, J.; OLIVEIRA, F. I. P.; WELLER, C. L.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Effect of ultrasonic and osmotic dehydration pre-treatments on the colour of freeze dried strawberries. **Journal Food Science Technology**, v. 51, p. 2222 – 2227, 2012.

GHAZANFARI, A.; EMAMI, S.; TABIL, L. G.; PANIGRAHI, S. Thin-layer drying of flax fiber: i. analysis of modeling using fick's second law of diffusions. **Drying Technology**, v. 24, p. 1631 – 635, 2006.

GOLMOHAMMADI, M.; ASSAR, M.; RAJABI-HAMANEH, M.; HASHEMI. S.J. Energy efficiency investigation of intermittent paddy rice dryer: modeling and experimental study, **Food and Bioproducts Processing**, v. 94, p. 275 – 283, 2015.

GONDIM, J. A. M.; MOURA, M. F. V.; DANTAS, A. S.; MEDEIROS, R. L.S.; SANTOS, K.M. Composição centesimal e de minerais em cascas de frutas. **Ciências e Tecnologia de Alimentos**, v.25, p. 825 – 827, 2005.

GOULA, A. M.; LAZARIDES, H. N. Modeling of mass and heat transfer during combined processes of osmotic dehydration and freezing (osmo-dehydro-freezing). **Chemical Engineering Science**, v. 82, p. 52 – 61, 2012.

HACIHAFIZOGLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K.; LIMA, A. G. B. A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice. **European Food Research and Technology**, v. 226, n. 4, p. 787-793, 2008.

HAGHI, A. K., AMANIFARD, N. Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products. **Brazilian Journal Chemistry Engineering**, v. 25, p. 495 – 501, 2008.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, v. 17, p. 1167 – 1172, 1974.

HEREDIA, A.; PEINADO, I.; BARRERA, C.; ANDE, A., Influence of process variables on colour changes, carotenoids retention and cellular tissue alteration of cherry tomato during osmotic dehydration. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 22, p. 285 – 294, 2009.

HII, C. L.; LAW, C. L.; CLOKE, M.; SUZANNAH, S. Thin layer drying kinetics of cocoa and dried product quality. **Bio systems Engineering**, v. 102, p. 153 – 161, 2009.

HOLOWATY, S. A.; RAMALLO, L. A; SCHMALKO, M. E. Intermittent drying simulation in a deep bed dryer of yerba mate. **Journal of Food Engineering**, v. 111, p. 110 – 114, 2012.

IAL – INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 4.ed. Normas analíticas do instituto Adolfo Lutz. São Paulo. v.1, 2008. 1020p.

IHNS, R.; DIAMANTE, L. M.; SAVAGE, G. P.; VANHANEN, L. Effect of temperature on the drying characteristics, colour, antioxidant and beta-carotene contents of two apricot varieties. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 46, p. 275 – 283, 2011.

JOHANN, G.; MENEZES, M. L.; PEREIRA, N. C.; SILVA, E. A. Comparing models to Neumann and Dirichlet conditions in grape seed drying. **Applied Thermal Engineering**, v. 93, p. 865 – 871, 2016.

JURENDIC T. Determination of the controlling resistance to moisture transfer during drying. **Croat Journal Food Sciences Technology**, v. 4, p.34 – 45, 2012.

KAJIYAMA, T.; PARK, K. J. Influence of feed initial moisture content on spray drying time. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, p. 1 – 8, 2008.

KALETA, A; GÓRNICKI, K. Some remarks on evaluation of drying models of red beet particles. **Energy Convers Manage**, v. 51, p. 2967 – 78, 2010.

KAYMAK-ERTEKIN, F. Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. **Journal of Food Science**, v.67, p.168 – 175, 2002.

KETATA, M.; DESJARDINS, Y.; RATTI, C. Effect of liquid nitrogen pretreatments on osmotic dehydration of blueberries. **Journal of Food Engineering**, v. 116, p. 202 – 212, 2013.

KHAN, M. R., Osmotic dehydration technique for fruits preservation-A review. **Pakistan Journal of Food Sciences**, v. 22 p. 71 – 85, 2012.

KHIN, M. M.; ZHOU, W.; PERERA, C. O. A study of the mass transfer in osmotic dehydration of coated potato cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 77, p. 84 – 95, 2006.

KHIN, M. M.; ZHOU, W.; PERERA, C. O. Impact of process conditions and coatings on the dehydration efficiency and cellular structure of apple tissue during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, p. 817 – 827, 2007.

KHOYI, M. R.; HESARI, J. Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 1355 – 1360, 2007.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). **Journal of Food Engineering**, v. 61, p.173 – 179, 2004.

LEE, J. S.; LIM, L. S. Osmo-dehydration pretreatment for drying of pumpkin slice. **International Food Research Journal**, v. 18, p. 1223 – 1230 2011.

LEMUS-MONDACA, R.; ZAMBRA, C. E.; VEGA-GÁLVEZ, A.; MORAGA, N. O. Coupled 3D heat and mass transfer model for numerical analysis of drying process in papaya slices. **Journal of Food Engineering**, v.116, p. 109 – 117, 2013.

LENART, A. Mathematical modelling of osmotic dehydration of apple and carrot. **Polish Journal of Food Nutrition Science**. v. 1, p. 1 – 33, 1992.

LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. **Drying Technology**, v.14, p.391 – 413, 1996.

LENART, A.; PIOTROWSKI, D. Drying characteristics of osmotically dehydrated fruits coated with semipermeable edible films. **Drying Technology**, v.19, p. 849 – 877, 2001.

LI, H.; ZHAO, C.; GOU, Y.; AN, K.; DING, S.; WANG, Z. Mass transfer evaluation of ultrasonic osmotic dehydration of cherry tomatoes in sucrose and salt solutions. **Food Science and Technology**, v. 47, p. 954 – 960, 2012.

LIMA, A. S.; FIGUEIREDO, R. W.; MAIA, G. A.; LIMA, J. R.; SOUZA NETO, M. A.; SOUZA, A. C. R. Estudo das variáveis de processo sobre a cinética de desidratação osmótica de melão. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.24, p. 282 – 286, 2004.

LINS, M. A. A. **Determinação de parâmetros termo físicos em produtos pastosos durante processos de transferência de calor**. 2013. 262p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.

LIU, X.; QIU, Z.; WANG, L.; CHENG, Y.; QU, H.; CHEN Y. Mathematical modeling for thin layer vacuum belt drying of Panaxnotoginseng extract. **Energy Convers Manage**, v. 50, p. 928 – 32, 2009.

LUIKOV, A. V. **Analytical heat diffusion theory**, London: Academic Press, 1968. 685 p.

LUIKOV, A.V.; MIKHAYLOV, Y. A. **Theory of energy and mass transfer**, Oxford: Pergamon press, 1965. 392 p.

MABELLINI, A.; OHACO, E.; MÁRQUEZ, C.; LOZANO, J. E.; MICHELIS, A. Calculation of the Effective Diffusion Coefficients in Drying of Chemical and Mechanical Pretreated Rosehip Fruits (*Rosa eglanteria* L.) with Selected Mass Transfer Models. **International Journal of Food Engineering**, v. 9, p. 481 – 486, 2013.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 2004. 453 p.

MALLICK, M.F.R.; MASSUI, M. Origin, distribution and taxonomy of melons. **Scientia horticulture**, v. 28, p. 251 – 261, 1986.

MARKOWSKI, M.; BIALOBRZEWSKI, I.; CIERACH, M.; PAULO, A. Determination of thermal diffusivity of lyoner type sausages during water bath cooking and cooling. **Journal of Food Engineering**, v. 65 p. 591 – 598, 2004.

MAVROUDISE, N. E.; GIDLEYD, M. J.; SJÖHOLMC, I. Osmotic processing: Effects of osmotic medium composition on the kinetics and texture of apple tissue. **Food Research International**, v. 48, p. 839 – 847, 2012.

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.

MEGÍAS-PÉREZ, R.; GAMBOA-SANTOS, J.; SORIA, A.C.; VILLAMIEL, M.; MONTILLA, A. Survey of quality indicators in commercial dehydrated fruits. **Food Chemistry**, v. 150, p. 41–48, 2014.

MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de pinus**. 2007. 155p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Florianópolis, Paraná.

MENNOUCHE, D.; BOUCHEKIMA, B.; BOUBEKRI, A.; BOUGHALI, S.; BOUGUETTAIA, H.; BECHKI, D., Valorization of rehydrated degket-nour by an

experimental investigation of solar drying processing method. **Journal of Food Engineering**, v. 84, p. 481 – 487, 2014.

MERCALI, G. D.; KECHINSKI, C. P.; COELHO, J. A.; TESSARO, I. C.; MARCZAK, L. D. F. Estudo da transferência de massa durante a desidratação osmótica de mirtilo. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.13, p. 91 – 97, 2010a.

MERCALI, G.D.; TESSARO, I.C.; NORENA, C.P.Z.; MARCZAK, L.D.F., Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, *shum*). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, p. 2281 – 2289, 2010b.

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*). **Food Science and Technology**, v. 44, p. 82 – 91, 2011.

MINIM, V. P. R. **Análise sensorial: estudo com consumidores** - Viçosa: Ed. UFV, 2006. 225p.

MIRANDA, D. S. A. 2014. 193p. **Obtenção da polpa em pó de biribá (Rollinia mucosa) pelo processo de secagem em camada de espuma e por liofilização: Estudos dos parâmetros físicos, químicos e físico-química**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 513 – 518, 2005.

MONDHE, D. S.; KUMAR, G. S.; TARSEM, C.; SHARMA, S. R., Effect of osmotic solution and drying temperature on organoleptic evaluation of papaya cubes. **Journal of Research**, v. 50, p. 48 – 51, 2013.

MONNERAT, S.M.; PIZZI, T. R. M.; MAURO, M. A.; MENEGALLI, F.C. Osmotic dehydration of apples in sugar/salt solutions: concentration profiles and effective diffusion coefficients. **Journal of Food Engineering**, v. 100, p. 604 – 612, 2010.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; CHAGURI, L.; VÁSQUEZ, G. Air drying and colour characteristics of chestnuts pre-submitted to osmotic dehydration with sodium chloride. **Food and Bioproducts Processing**, v. 89, p. 109 – 115, 2011.

MORENO, J.; SIMPSON, R.; PIZARRO, N.; PAVEZ, C.; DORVIL, F.; PETZOLD, G.; BUGUEÑO, G. Influence of ohmic heating/osmotic dehydration treatments on polyphenoloxidase inactivation, physical properties and microbial stability of apples (cv.

Granny Smith). **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 20, p. 198 – 207, 2013.

MRKIC, V., UKRAINCZYK, M., TRIPALO, B. Applicability of moisture transfer Bi-Di correlation for convective frying of broccoli. **Journal Food Engineering**, v. 79, p. 640 – 646, 2007.

MUNDADA, M.; SINGH, B.; MASKE, S., Optimization of processing variables affecting the osmotic dehydration of pomegranate arils. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, p. 1732 – 1738, 2010.

NADIAN, M. H.; RAFIEE, N.; AGHBASHLO, M.; HOSSEINPOUR, S.; MOHTASEBI, L. Continuous real-time monitoring and neural network modeling of apple slices color changes during hot air drying. **Food and Bio Products Processing**, v. 94, p. 263 – 274, 2014.

NAGAI, L. Y., SANTOS, A. B., FARIA, F. A., BOSCOLO, M., MAURO, M. A. osmotic dehydration of mango with ascorbic acid impregnation: influence of process variables. **Journal of Food Processing and Preservation**, DOI:10.1111/jfpp.12243, 2014.

NAGAI, L. Y.; **Desidratação osmótica de manga cv. palmer em solução de sacarose com e sem adição de ácido ascórbico**. 2012. 112p. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos), Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto – SP.

NAHIMANA, H.; ZHANGA, M.; MUJUMDARB, A.S.; DINGA, Z. Mass Transfer Modeling and Shrinkage Consideration during Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables. **Food Reviews International**, v.27, p. 331 – 356, 2011.

NASCIMENTO, J. J. S.; MEDEROS, B. J. T.; BELO, F. A.; LIMA, A. G. B. Transporte de matéria com redução de volumen em El interior de sólidos paralelepípedos, **Información Tecnológica**, v. 16, p. 35-41, 2005.

NICOLETI, J. F., **Secagem de caqui em condições controladas: Efeito sobre a qualidade do produto e consumo energético**. 2005. 125p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, FEA/UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil.

NIETO, A. B.; VICENTE, S.; HODARA, K.; CASTRO, M. A.; ALZAMORA, S. M. Osmotic dehydration of apple: Influence of sugar and water activity on tissue structure, rheological properties and water mobility. **Journal of Food Engineering**, v. 119, p. 104 – 114, 2013.

NIKBAKHT, A. M.; MOTEVALI, A.; MINAEI, S. Energy and exergy investigation of microwave assisted thin-layer drying of pomegranate arils using artificial neural networks and response surface methodology. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 13, p. 81 – 91, 2014.

NIMMANPIPUG, N.; THERDTHAI, N., Effect of osmotic dehydration time on hot air drying and microwave vacuum drying of papaya. **Food and Applied Bioscience Journal**, v. 1, p. 1 – 10, 2013.

NOWACKA, M.; TYLEWICZ, U.; LAGHI, L.; ROSA, M. D.; RAJCHERT, D. W. Effect of ultrasound treatment on the water in kiwifruit during osmotic dehydration. **Food Chemistry**, v. 144, p. 18 – 25, 2014.

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*), **Food Science and Technology**, v. 52, p. 151 – 156, 2013.

NUSSENZVEIG, H. M., **Curso de Física Básica**, Vol. 2, 4ª Edição revisada, São Paulo: Editora Blucher, 2002. 375p.

OLIVEIRA, F. M. N. **Secagem e armazenamento da polpa de pitanga**. 2006. 197p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

ORDÓÑEZ, J. A. **Tecnología de alimentos: componentes dos alimentos e processos**. ed. v.1. Porto Alegre: Artmed, 2005. 294p.

OSÓRIO, C.; FRANCO, M. S.; CASTAÑO, M. P.; GONZÁLEZ-MIRET, M. L.; HEREDIA, F. J.; MORALES, A. L. Colour and flavour changes during osmotic dehydration of fruits. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 8, p. 353 – 359, 2007.

OZDEMIR, M. The thin layer drier characteristics of hazelnut during roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 42, p. 225 – 233, 1999.

PAN, YK.; LJ. ZHAO, Y.; ZHANG, G.; CHEN, A.; MUJUMDAR, A.S. Osmotic dehydration pretreatment in drying of fruits and vegetables. **Drying Technology**, v. 21, p. 1101 – 1114. 2003.

PANADÉS, G.; FITO, P.; AGUIAR, Y.; VILLAVICENCIO, M. N.; ACOSTA, V. Osmotic dehydration of guava: Influence of operating parameters on process kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 72, p. 383 – 389, 2006.

PANARESE, V.; LAGHI, L.; PISI, A.; TYLEWICZ, U.; ROSA, M. D.; ROCCULI, P. Effect of osmotic dehydration on actinidia deliciosa kiwifruit: A combined NMR and ultra structural study. **Journal of Food Engineering**, v. 132, p. 1706 – 1712, 2012.

PANAS, A. J., SYPEK, J. Validation of the thermal diffusivity from modified monotonic heating regime procedure. **International Journal of Thermophysics**, v. 27, p. 1844 – 1858, 2006.

PARK, K. J. B.; **Construção de um software de simulação e seleção de equipamentos para processos de secagem**. 2008. 211p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil.

PARK, K. J.; ARDITO, T. H.; ITO, A. P. K.; PARK, J. B.; OLIVEIRA, R. A; CHIORATO, M. Effective Diffusivity Determination Considering Shrinkage by Means of Explicit Finite Difference Method. **Drying Technology**, v. 25, p. 1313 – 1319, 2007.

PARK, K. J; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para pêra Bartlett (*pyrussp.*) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, campinas, v.19, p.326 – 332, 2001.

PATIL, V.; CHAUHAN, A. K.; SINGH, R. P. Optimization of the spray-drying process for developing guava powder using surface methodology. **Powder Technology**, v. 253, p. 230 – 236, 2014.

PERUSSELLO, C. A.; KUMAR, C.; CASTILHOS, F.; KARIM, M. A. Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). **Applied Thermal Engineering**, v.63, p. 23 – 32, 2014.

PHISUT, N.; RATTANAWEDDEE, M.; AEKKASAK, K., Effect of osmotic dehydration process on the physical, chemical and sensory properties of osmo-dried cantaloupe. **International Food Research Journal**, v.20, p. 189 – 196, 2013.

PIEDADE, L. H. **Plano de manejo de polinizadores do meloeiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2015.

PONTING, J. D. Osmotic dehydration of fruits—recent modifications and applications. **Process Biochemical**, v. 8, p. 18 – 20, 1973.

PONTING, J. D.; WATTERS, G. G.; FORREY, R. R.; JACKSON, R.; STANLEY, W. L. Osmotic dehydration of fruits. **Food Technology**, v. 20, p.125 – 128, 1966.

PORCIUNCULA, B. D. A.; ZOTARELLI, M. F.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (Prata variety) during osmotic dehydration and its use in predictive models. **Journal of Food Engineering**, v. 119, p. 490 – 496, 2013.

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, p. 48 – 59, 2002.

RATHORE, N.S.; PANWAR, N. L. Design and development of energy efficient solar tunnel dryer for industrial drying. **Clean Technology Environment Policy**, v. 13, p. 125 – 132, 2011.

REVASKAR, V.A.; PISALKAR, P. S.; PATHARE, P. B.; SHARMA, G. P. Dehydration kinetics of onion slices in osmotic and air convective drying process. **Research in Agricultural Engineering**, v. 60, p. 92 – 99. 2014.

RHIM, J. W.; LEE, J. H. Drying kinetics of whole and sliced shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*). **Food Sciences Biotechnology**, v. 20, p. 419 – 427, 2011.

RIBEIRO, S. C. A.; RIBEIRO, C. de F. A.; PARK, K. J.; ARAUJO, E. A. F.; TOBINAGA, S. Alteração da cor da carne de mapará (*Hypophthalmus Edentatus*) desidratada osmoticamente e seca. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.9, p. 125 – 135, 2007.

RIBEIRO, S. C.; AGUIAR-OLIVEIRA, E.; MALDONADO, R.R. Optimization of osmotic dehydration of pear followed by conventional drying and their sensory quality, **Food Science and Technology**, doi: 10.1016/j.lwt.2016.04.062, 2016.

ROBINSON, R. W.; DECKER-WALTERS, D. S. **Cucurbits**. New York: CAB International, 1997, 226 p.

RODRIGUES, R. C., 2013. 167p. **Estudo da cinética de desidratação osmótica de abacaxi e utilização da solução residual para produção de bio inseticida**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil.

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.

ROMERO-PEÑA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G. Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 06, p. 69 – 76, 2003.

ROSAS-MENDOZA, M. E.; FERNÁNDEZ-MUÑOZB, J. L.; ARJONA-ROMÁNA, J. L. Glass transition changes during osmotic dehydration. **Procedia Food Science**, v. 1, p. 814 – 821, 2011.

RUIZ LÓPEZ, I.I.; RUIZ-ESPINOSA, H.; HERMAN-LARA E.; ZARATE-CASTILLO G. Modeling of kinetics, equilibrium and distribution data of osmotically dehydrated carambola (*Averrhoa carambola* L.) in sugar solutions. **Journal of Food Engineering**, v. 104, p. 218 – 226, 2011.

SALLAM, Y. I.; ALY, M. H.; MOHAMED, E. A. Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. **Journal of Advanced Research**, v. 6, p. 171 – 178, 2015.

SANDER, A.; SKANSI, D.; BOLF, N. Heat and mass transfer models in convection drying of clay slabs. **Ceramics International**, v. 29, p. 641 – 653, 2003.

SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J.; NISHIYAMA, C.; HUBINGER, M. D. Qualidade Final de Melão Osmoticamente Desidratado em Soluções de Sacarose com Adição de Ácidos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p. 1803 – 1810, 2002.

SÉRGIO, A. G., IRIGOYEN, R. M. T., CICUTTIN, S., FIORENTINI, C. The variable nature of Biot numbers in food drying. **Journal Food Engineering**, v. 101, p. 214 – 222, 2010.

SEVIK, S. Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products. **Solar Energy**, v. 105, p. 190 – 205, 2014.

SHAHHOSEINI, R.; GHORBANI, H.; KARIMI, S. R.; ESTAJI, A.; MOGHADDAM, M. Qualitative and quantitative changes in the essential oil of lemon verbena (*Lippiacitriodora*) as affected by drying condition. **Dry Technology**, v. 31, p. 1020 – 1028, 2013.

SILVA, C. K. F., 2010. 125p. **Estimação de parâmetros de secagem de alimentos – Formulação de Luikov e uso da transformada integral generalizada**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. A. New Version of the assistat-statistical assistance software. In: **WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE**, 4., Orlando Anais: **American Society of Agricultural Engineers**, 2010.

SILVA, F. A. S.; DUARTE, M. E.; CAVALCANTI-MATA, M. E. R. M. Nova metodologia para interpretação de dados de análise sensorial de alimentos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, p.967 – 973, 2011.

SILVA, L. M. M.; FIGUEIREDO, R. M. F.; SOUSA, F. C.; SOUSA, E. P.; LIMA, A.K.V.O. Physical parameters and physical and chemical three varieties of melon. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, p. 242 – 246, 2011.

SILVA, M. A. C.; DA SILVA, Z. E.; MARIANI, V. C.; DARCHE, S. Mass transfer during the osmotic dehydration of West Indian cherry. **Food Science and Technology**, v. 45, p. 246 – 252, 2012a.

SILVA, K. S.; FERNANDES, M. A.; MAURO, M. A. Effect of calcium on the osmotic dehydration kinetics and quality of pineapple. **Journal of Food Engineering**, v. 134, p. 37 – 44, 2014b.

SILVA, V.; FIGUEIREDO, A. R.; COSTA, J. J.; GUINÉ, R. P. F. Experimental and mathematical study of the discontinuous drying kinetics of pears. **Journal of Food Engineering**, v. 134, p. 30 – 36, 2014f.

SILVA, W. P., SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, D. D. P. S.; SILVA, C. D. P. S. Numerical simulation of the water diffusion in cylindrical solids. **International Journal of Food Engineering**, v. 4, p. 6, 2008.

SILVA, W. P.; PRECKER, J. W.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, D. D. P. S. Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea. **Journal of Food Engineering**, v. 95, p. 298 – 304, 2009.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. “**Prescribed**” software (2009a), online, disponível no endereço eletrônico <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Prescribed.htm>, e acessado em Julho de 2015.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. “**Convective**” software (2009b), online, disponível no endereço eletrônico: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Convective.htm> data de acesso: julho de 2015.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Lab Fit Curve Fitting Software**. v.7.2.46 (2009c); online, disponível em : [www.labfit.net](http://www.labfit.net), data de acesso: fevereiro 2016.

SILVA, W. P., “**Contour plots**” software. 2010. online, disponível no seguinte endereço eletrônico <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Contour.zip>, data de acesso: julho/2016.

SILVA, W. P.; PRECKER, J. W.; SILVA, C. M. D. P. S.; GOMES, J. P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, v. 98, p. 302 – 308, 2010.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SOUSA, J. A. R.; FARIAS, V. S. O. Empirical and diffusion models to describe water transport into chickpea (*Cicer arietinum* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, doi:10.1111/j.1365-2621.2012.03183.x, 2012b.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; GOMES, J. P. Comparison of boundary conditions to describe drying of turmeric (*Curcuma longa*) rhizomes using diffusion models. **Journal Food Science Technology**, v. 51, p. 3181 – 3189, 2012c.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; GAMA, F. J. A. An improved technique for determining transport parameters in cooling processes. **Journal of Food Engineering**, v. 111, p. 394–402, 2012d.

SILVA, W. P.; FARIAS, V. S. O.; NEVES, G. A.; LIMA, A. G. B. Modeling of water transport in roof tiles by removal of moisture at isothermal conditions. **Heat and Mass Transfer**, v. 48, p. 809 – 821, 2012e.

SILVA, W. P.; AMARAL, D. S.; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; SILVA, C. M. D. P. S.; PINHEIRO, R. M. M.; PESSOA, T. Description of the osmotic dehydration and convective drying of coconut (*Cocos nucifera* L.) pieces: A three dimensional approach. **Journal of Food Engineering**, v. 115, p. 293 – 302, 2013a.

SILVA, W. P.; SILVA, C.M.D.P.S.; DA SILVA, L.D.; FARIAS, V.S.O. Drying of clay slabs: experimental determination and prediction by two-dimensional diffusion models. **Ceramics International**, v. 39, p. 7911-7919, 2013b.

SILVA, W. P.; DA SILVA, L.D.; FARIAS, V.S.O; SILVA, C.M.D.P.S. Water migration in clay slabs during drying: a three-dimensional numerical approach. **Ceramics International**, v. 39, p. 4017 - 4030, 2013c.

SILVA, W. P.; SILVA, C.M.D.P.S.; AIRES, J.E.F.; SILVA JR., A.F. Osmotic dehydration and convective drying of coconut slices: Experimental determination and description using one-dimensional diffusion model. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2013.05.002>, 2013d.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; AIRES, J. E. F.; SILVA, A. F., Osmotic dehydration and convective drying of coconut slices: Experimental determination and description using one-dimensional diffusion model. **Journal of The Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 13, p. 162 – 168, 2014a.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; GAMA, F. J. A.; GOMES, J. P. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 13, p. 67 – 74, 2014c.

SILVA, W. P.; HAMAWAND, I.; SILVA, C. M. D. P. S. A liquid diffusion model to describe drying of whole bananas using boundary-fitted coordinates. **Journal of Food Engineering**, v. 137, p. 32 – 38, 2014d.

SILVA, W. P. ; SILVA, C. M. D. P. S.; LINS, M. A. A.; COSTA, W. S. Optimal removal of experimental points to determine apparent thermal diffusivity of canned products. **International Journal of Food Engineering**, v. 10, p. 223 – 231, 2014e.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA JUNIOR, A. F.; QUEIROZ, A. J. M. A Numerical approach to determine some properties of cylindrical pieces of bananas during drying. **International Journal Food Engineering**, v. 11, p. 335 – 347, 2015.

SILVA, G. D.; BARROS, Z. M. P.; MEDEIROS, R. A. B.; CARVALHO, C. B. O.; BRANDÃO, S. C. R.; AZOUBEL, P. M. Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. **Food Science and Technology**, v. 74, p. 114 – 119, 2016.

SIMAL, S.; DEYÁ E.; FRAU, M.; ROSSELK, C. Simple modeling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 33, p. 139 – 150, 1997.

SINGH, N. J.; PANDEY, R. K. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, p. 317 – 322, 2012.

SOLVAL, K. M.; SUNDARARAJAN, J.; ALFARO, L.; SATHIVEL, S. Development of cantaloupe (*Cucumis melo*) juice powders using spray drying Technology. **Food Science and Technology**, v. 46, p.287 – 293, 2012.

SOURAKI, B. A.; GHAVANI, M.; TONDRO, H., Correction of moisture and effective diffusivities for shrinkage during osmotic dehydration of apple in sucrose solution. **Food and Bio Products Processing**, v. 92, p. 1 – 8, 2014.

SOUZA NETO, M. A. S.; SOUSA, P. H. P. **Análises instrumentais para a segurança dos alimentos**. In: BASTOS, M. S.R., Ferramentas da ciência e tecnologia para a segurança dos alimentos. Fortaleza: Embrapa agroindústria tropical. Banco do Nordeste do Brasil, 2008. 438p.

SOUZA, K. S.; CAETANO, L.C.; GARCIA, C.C.; ROMERO, J.T.; SANTOS, A.B.; MAURO, M.A. Osmotic dehydration process for low temperature blanched pumpkin, **Journal of Food Engineering**, v. 105, p. 56 – 64, 2011.

SRINIVASAKANNAN, C.; BALASUBRAMANIAN, N. An investigation on drying of millet in fluidized beds. **Advanced Powder Technology**, v. 20, p. 298 – 302, 2009.

STEPANSKY, A.; KOVALSKI, I.; PERL-TREVES, R. Intra specific classification of melons (*Cucumis melo* L.) in view of their phenotypic and molecular variation. **Plant Systemic Evolution**, v. 217, p. 313 – 332, 1999.

SUNJKA, P. S.; RAGHAVAN, G. S. V. Assessment of pretreatment methods and osmotic dehydration for cranberries. **Canadian Biosystems Engineering**, v. 46, p.35 – 40, 2004.

TACO, **Tabela brasileira de composição de alimentos**. 4<sup>a</sup> ed. Campinas: NEPA/UNICAMP, 2011, 161p.

TAIWO, K. A.; ESHTIAGHI, M. N.; ADE- OMOWAYE, B. I. O.; KNORR, D. Osmotic dehydration of strawberry halves: influence of osmotic agents and pretreatment methods on mass transfer and product characteristics. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 38, p. 693 – 707, 2003.

THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; KUNWISAWA, J.; SOPONRONNARIT, S. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying, **Food Science and Technology**, v. 44, p. 1502 – 1510, 2011

TIPLER, P.; MOSCA, A.; GENE. **Física para cientistas e engenheiros**, v.1, São Paulo: Editora LTC, 2009. 824p.

TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. **Food Research International**, v. 26, p. 59 – 68, 1993.

TORRES, J. D.; TALENS, P.; CAROT, J. M.; CHIRALT, A.; ESCRICHE, I. Volatile profile of mango (*Mangifera indica* L.) as affected by osmotic dehydration. **Food Chemistry**, v. 101, p. 219 – 228, 2007.

TORREZ, R. M. I.; GOÑI, S. M.; GINER, S. A. Drying–toasting kinetics of presoaked soybean. A mathematical model considering variable diffusivity, shrinkage and coupled heat transfer. **Journal Food Engineering**, v. 142, p. 70 – 79, 2014.

TORTOE, C. A review of osmodehydration for food industry. **African Journal of Food Science**, v. 4, p. 303 – 324, 2010.

TOUIL, A.; PECZALSKI, R.; ZAGROUBA, F. Monitoring of theophylline dehydration in a vacuum contact dryer by near-infrared spectroscopy. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 91, p.1063 – 1070, 2013.

URIBE, E.; MIRANDA, M.; VEGA-GÁLVEZ, A.; QUISPE, I.; CLAVERÍA, R.; DI SCALA, K. Mass transfer modeling during osmotic dehydration of jumbo squid (*Dosidicus gigas*): influence of temperature on diffusion coefficients and kinetic parameters. **Food Bioprocess Technology**, v.4, p. 320 – 326, 2011.

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.

VASCONCELOS J. L. L. A.; ANDRADE, S. A. C.; MACIEL, M. I. S.; GUERRA, N. B.; VASCONCELOS, M. A. S. Osmotic dehydration of the Indian fig (*Opuntia ficus indica*) with binary and ternary solutions. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 47, p. 2359 – 2365, 2012.

VERMA, D.; KAUSHIK, N.; RAO, S. R. Application of High Hydrostatic Pressure as a Pretreatment for Osmotic Dehydration of Banana Slices (*Musa cavendishi*) Finish-Dried by Dehumidified Air Drying. **Food Bioprocess Technology**. v. 7, p. 1281 – 1297, 2013.

WANG, R.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S. Effect of osmotic dehydration on microwave freeze-drying characteristics and quality of potato chips, **Drying Technology**, v. 28, p. 798 – 806, 2010.

WHITAKER, T. W.; DAVIS, G. N. **Cucurbits, Botany, Cultivation and Utilization**. New York: Interscience, New York, 1962, 249p.

WHITAKER, T.; BARRE, H. J.; HAMDY, M. Y. – Theoretical and experimental studies of diffusion in spherical bodies with a variable diffusion coefficients. **Transactions of ASAE** 11, v. 12, p. 668 – 672, 1969.

YADAV, A. K.; SINGH, S. V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v.51, p. 1654 – 1673, 2012.

YAN, Z.; SOUSA-GALLAGHER, M. J.; OLIVEIRA, F. A. R. Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana. **Journal of Food Engineering**, v. 86, p. 342 – 348, 2008.

ZHAO, J. H.; HU, R.; XIAO, H. W.; YANG, Y.; LIU, F.; GAN, Z. L.; NI, Y. Osmotic dehydration pretreatment for improving the quality attributes of frozen mango: effects of different osmotic solutes and concentrations on the samples. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 49, p. 960 – 968, 2014.

ZHENG, X.; LIU, C.; SHI, J.; XUE, S.; LIN, Y. M. Z.; LIU, H. Analysis of volume expansion and dehydration rate of berry slab under microwave-vacuum puffing conditions. **Food Science and Technology**, v.52, p.39 – 48, 2013.

ZOU, K., TENG, J., HUANG, L., DAI, X., WEI., B. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. **Food Science and Technology**, v. 51, p. 253 – 259, 2013.

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 Bioprocess Technology**, v. 5, p. 2717–2727, 2011.

**APÊNDICE A**

(Dados de tempo, ganho de sólidos, quantidade de água e dimensões referentes a cinética de desidratação osmótica de cubos de melão com arestas de 1,0 cm)

Tabela A.1 - Tempo, em minutos e valores percentuais de sólidos do melão em forma de cubo com 1,0 centímetro de aresta, desidratado com tratamento preliminar em solução de sacarose a 25, 45 e 65 °Brix.

<b>Tempo (min)</b>	<b>25 °Brix</b>	<b>45 °Brix</b>	<b>65 °Brix</b>
0	100,000	100,000	100,000
15	128,574	124,487	147,549
30	137,230	140,075	203,269
60	141,450	170,773	321,396
90	160,320	230,889	376,668
120	179,043	257,178	400,707
150	190,300	314,562	446,542
210	199,040	342,804	480,473
330	212,550	369,196	519,234
420	222,250	380,638	534,543
690	232,855	402,316	553,644
870	236,890	425,698	565,441
1050	247,218	437,746	575,555
1230	249,671	445,786	590,683
1440	251,550	450,098	600,489

Tabela A.2 - Tempo, em minutos e valores percentuais de água do melão em forma de cubo com 1,0 centímetro de aresta, desidratado com tratamento preliminar em solução de sacarose a 25, 45 e 65 °Brix.

<b>Tempo (min)</b>	<b>25 °Brix</b>	<b>45 °Brix</b>	<b>65 °Brix</b>
0	100,000	100,000	100,000
15	98,301	98,873	99,445
30	97,672	96,828	95,986
60	96,873	90,412	83,954
90	94,711	87,341	79,972
120	94,003	85,900	77,800
150	93,014	84,283	75,555
210	92,203	82,945	73,689
330	91,501	81,301	71,102
420	90,733	79,838	68,946
690	90,434	79,185	68,140
870	89,522	77,536	66,952
1050	88,963	75,668	64,375
1230	87,981	75,018	62,455
1440	86,465	74,837	60,910

Tabela A.3 - Tempo, em minutos e dimensões, em centímetros, de melão em forma de cubo, com 1,0 centímetro de aresta, desidratado com tratamento preliminar em solução de sacarose a 25, 45 e 65 °Brix.

<b>Tempo (min)</b>	<b>25 °Brix</b>	<b>45 °Brix</b>	<b>65 °Brix</b>
0	1,03	1,01	1,00
15	1,03	0,99	0,98
30	0,99	0,96	0,97
60	0,98	0,95	0,91
90	0,98	0,92	0,89
120	0,96	0,88	0,86
150	0,95	0,86	0,85
210	0,92	0,84	0,83
330	0,91	0,85	0,83
420	0,91	0,88	0,83
690	0,95	0,90	0,84
870	0,95	0,86	0,85
1050	0,95	0,85	0,86
1230	0,96	0,85	0,85
1440	0,95	0,85	0,85

**APÊNDICE B**

(Dados de tempo, razão de água e dimensões referentes a cinética de secagem em cubos de melão com arestas de 1,0 cm)

Tabela B.1 - Tempo, em minutos e teor de água (adimensional), de melão em forma de cubo, com 1,0 centímetro de aresta, desidratado com tratamento preliminar em solução de sacarose a 25, 45 e 65 °Brix, seguido de secagem em estufa a temperatura de 50, 60 e 70 °C.

Tempo (min)	25 °Brix			45 °Brix			65 °Brix		
	50 °C	60 °C	70 °C	50 °C	60 °C	70 °C	50 °C	60 °C	70 °C
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
30	0,789	0,750	0,656	0,745	0,690	0,620	0,697	0,656	0,623
60	0,580	0,530	0,456	0,536	0,450	0,395	0,503	0,456	0,419
90	0,393	0,375	0,281	0,410	0,360	0,281	0,420	0,281	0,268
120	0,290	0,276	0,200	0,330	0,230	0,205	0,304	0,200	0,186
150	0,236	0,215	0,170	0,230	0,195	0,157	0,214	0,170	0,135
180	0,194	0,180	0,092	0,189	0,154	0,100	0,130	0,084	0,076
240	0,155	0,130	0,086	0,123	0,091	0,075	0,102	0,063	0,056
300	0,130	0,100	0,075	0,105	0,075	0,063	0,096	0,054	0,032
360	0,112	0,085	0,051	0,098	0,064	0,040	0,076	0,030	0,015
420	0,096	0,065	0,037	0,074	0,049	0,025	0,054	0,025	0,010
540	0,063	0,039	0,018	0,054	0,029	0,015	0,029	0,015	0,006
900	0,040	0,019	0,009	0,032	0,013	0,008	0,013	0,008	0,004
1260	0,015	0,010	0,006	0,012	0,007	0,005	0,007	0,005	0,002
1620	0,009	0,007	0,002	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001
1980	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela B.2 - Tempo, em minutos e dimensões, em centímetros, de melão em forma de cubo, com 1,0 centímetro de aresta, desidratado com tratamento preliminar em solução de sacarose a 25, 45 e 65 °Brix, seguido de secagem em estufa a temperatura de 50, 60 e 70 °C.

Tempo (min)	25 °Brix			45 °Brix			65 °Brix		
	50 °C	60 °C	70 °C	50 °C	60 °C	70 °C	50 °C	60 °C	70 °C
0	0,86	0,87	0,85	0,86	0,86	0,87	0,80	0,82	0,84
30	0,78	0,80	0,80	0,75	0,80	0,80	0,78	0,79	0,78
60	0,70	0,73	0,73	0,66	0,75	0,77	0,75	0,73	0,80
90	0,61	0,68	0,68	0,66	0,70	0,76	0,74	0,73	0,73
120	0,60	0,68	0,58	0,63	0,67	0,68	0,73	0,70	0,75
150	0,58	0,60	0,58	0,65	0,68	0,68	0,70	0,69	0,73
180	0,52	0,51	0,58	0,58	0,64	0,67	0,70	0,69	0,71
240	0,52	0,53	0,58	0,63	0,67	0,66	0,70	0,68	0,69
300	0,51	0,56	0,59	0,61	0,66	0,65	0,71	0,71	0,73
360	0,51	0,53	0,58	0,61	0,66	0,69	0,71	0,71	0,74
420	0,52	0,55	0,57	0,60	0,67	0,70	0,71	0,69	0,73
540	0,53	0,55	0,58	0,62	0,65	0,71	0,71	0,72	0,74
900	0,51	0,55	0,58	0,63	0,65	0,70	0,72	0,70	0,75
1260	0,50	0,54	0,59	0,64	0,65	0,70	0,72	0,70	0,75
1620	0,50	0,54	0,59	0,63	0,67	0,71	0,71	0,73	0,75
1980	0,54	0,55	0,59	0,65	0,65	0,70	0,70	0,70	0,75

**APÊNDICE C**

(Dados de tempo, ganho de sólidos e quantidade de água referentes a cinética de desidratação osmótica de cubos de melão com arestas de 1,5; 2,0 e 2,5 cm)

Tabela C.1 - Tempo, em minutos e valores percentuais de sólidos no melão em forma de cubo, com 1,5; 2,0 e 2,5 centímetros de aresta, desidratado com tratamento preliminar em solução de sacarose a 65 °Brix.

<b>Tempo (min)</b>	<b>1,5 cm</b>	<b>2,0 cm</b>	<b>2,5 cm</b>
0	100,00	100,00	100,00
15	105,61	110,38	114,08
30	108,90	120,38	127,88
60	135,81	137,68	147,52
90	164,51	163,51	150,09
120	174,49	167,62	168,41
150	196,99	185,29	174,24
180	203,07	177,97	169,72
210	211,62	191,85	196,87
270	238,43	214,73	193,19
330	261,86	223,85	209,78
420	250,08	257,71	212,83
510	271,67	260,02	212,39
690	289,84	263,00	259,57
870	356,28	293,82	255,59
1050	381,68	314,51	279,75
1230	403,34	334,29	299,82
1410	417,07	359,38	323,45
1590	442,68	372,30	342,41
1770	469,06	412,27	361,65
1950	467,09	437,23	394,41
2130	498,33	452,66	403,29
2370	532,36	485,73	421,40
2610	-	495,71	451,52
2850	-	481,38	470,73
3090	-	477,33	488,14
3330	-	498,35	488,25
3570	-	-	519,99
3810	-	-	514,86

Tabela C.2 - Tempo, em minutos e valores percentuais de água do melão em forma de cubo com 1,5; 2,0 e 2,5 centímetros de aresta, desidratado com tratamento preliminar em solução de sacarose a 65 °Brix.

<b>Tempo (min)</b>	<b>1,5 cm</b>	<b>2,0 cm</b>	<b>2,5 cm</b>
0	100,00	100,00	100,00
15	99,11	98,64	98,28
30	98,69	97,33	96,58
60	95,26	95,06	94,17
90	91,60	91,68	93,85
120	90,33	91,14	91,60
150	87,46	88,82	90,88
180	86,68	89,78	91,44
210	85,59	87,96	88,09
270	82,17	84,96	88,56
330	79,18	83,77	86,51
420	80,69	79,33	86,13
510	77,93	79,03	86,20
690	75,61	78,64	80,40
870	67,14	74,60	80,89
1050	63,90	71,89	77,92
1230	61,14	69,30	75,45
1410	59,39	66,01	72,55
1590	56,12	64,32	70,23
1770	52,76	59,08	67,86
1950	53,01	55,81	63,85
2130	49,03	53,79	62,74
2370	44,68	49,46	60,51
2610	-	48,15	56,80
2850	-	50,03	54,43
3090	-	50,56	52,30
3330	-	47,81	52,29
3570	-	-	49,03
3810	-	-	48,39

**APÊNDICE D**

(Dados referentes à análise de variância da caracterização físico-química do melão desidratado em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix)

Tabela D.1 – Análise de variância do teor de água no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	2	1902,14309	951,07154	6708,1849**
<b>Resíduo</b>	6	0,14178	0,14178	
<b>Total</b>	8	1902,99376		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ).

F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela D.2 – Análise de variância da atividade de água no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	2	0,01565	0,00783	1718,2195
<b>Resíduo</b>	6	0,00003	0,00000	
<b>Total</b>	8	0,01568		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela D.3 – Análise de variância do pH no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	2	0,18016	0,09008	245,6667**
<b>Resíduo</b>	6	0,00220	0,00037	
<b>Total</b>	8	0,18236		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela D.4 – Análise de variância da acidez no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	2	0,08029	0,04014	11.1858**
<b>Resíduo</b>	6	0,02153	0,00359	
<b>Total</b>	8	0,10182		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela D.5 – Análise de variância do açúcar total no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	2	947,96029	473,98014	138500,69**
<b>Resíduo</b>	6	0,02053	0,00342	
<b>Total</b>	8	947,98082		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela D.6 – Análise de variância do açúcar redutor no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	2	7,14549	3,57274	824,4795**
<b>Resíduo</b>	6	0,02600	0,00433	
<b>Total</b>	8	7,17149		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela D.7 – Análise de variância do açúcar não-redutor no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	2	1006,24482	503,12241	214601,98**
<b>Resíduo</b>	6	0,01407	0,00234	
<b>Total</b>	8	1006,25889		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela D.8 – Análise de variância de cinzas no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	2	0,14647	0,07323	15,0824**
<b>Resíduo</b>	6	0,02913	0,00486	
<b>Total</b>	8	0,17560		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela D.9 – Análise de variância de cor (parâmetro L) no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	2	178,11740	89,05870	397,8795**
<b>Resíduo</b>	6	1,34300	0,22383	
<b>Total</b>	8	179,46040		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela D.10 – Análise de variância de cor (parâmetro A) no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	2	8,75362	4,37681	1569,3745**
<b>Resíduo</b>	6	0,01673	0,00279	
<b>Total</b>	8	8,77036		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela D.11 – Análise de variância de cor (parâmetro B) no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	2	150,88469	75,44234	4199,0173*
<b>Resíduo</b>	6	0,10780	0,01797	
<b>Total</b>	8	150,99249		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

**APÊNDICE E**

(Dados referentes à análise de variância da caracterização físico-química do melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose nas concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C).

Tabela E.1 – Análise de variância do teor de água do melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	8	113,63253	14,20407	195,5386**
<b>Resíduo</b>	18	1,30753	0,07264	
<b>Total</b>	26	114,94007		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela E.2 – Análise de variância do teor de água do melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	8	0,11434	0,01429	432,6267**
<b>Resíduo</b>	18	0,00059	0,00003	
<b>Total</b>	26	0,11494		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela E.3 – Análise de variância do pH do melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	8	3,06314	0,38289	168,3730**
<b>Resíduo</b>	18	0,04093	0,00227	
<b>Total</b>	26	3,10407		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela E.4 – Análise de variância da acidez do melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	8	400,35545	50,04443	15711,6238**
<b>Resíduo</b>	18	0,05733	0,00319	
<b>Total</b>	26	400,41279		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela E.5 – Análise de variância do açúcar total do melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	8	4355,29601	544,41200	148027,43**
<b>Resíduo</b>	18	0,06620	0,00368	
<b>Total</b>	26	4355,36221		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela E.6 – Análise de variância do açúcar redutor do melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	8	1215,36147	151,92018	25148,6285**
<b>Resíduo</b>	18	0,07780	0,00432	
<b>Total</b>	26	1215,43927		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela E.7 – Análise de variância do açúcar não-redutor do melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	8	6073,36805	759,17101	252123,21**
<b>Resíduo</b>	18	0,05420	0,00301	
<b>Total</b>	26	6073,42225		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela E.8 – Análise de variância das cinzas do melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	8	12,35305	1,54413	385,3193**
<b>Resíduo</b>	18	0,07213	0,00401	
<b>Total</b>	26	12,42519		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela E.9 – Análise de variância de cor (parâmetro L) no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	8	4452,7705	556,5963	94,7098**
<b>Resíduo</b>	18	105,78353	5,8768	
<b>Total</b>	26	4558,5540		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela E.10 – Análise de variância de cor (parâmetro a) no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	8	334,0806	41,7600	77,7730**
<b>Resíduo</b>	18	9,6650	0,5369	
<b>Total</b>	26	343,7456		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

Tabela E.11 – Análise de variância de cor (parâmetro b) no melão submetido a desidratação em solução osmótica de sacarose em concentrações de 25, 45 e 65 °Brix e posterior secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

<b>F.V.</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F.</b>
<b>Tratamentos</b>	8	388,0963	48,512	21,1655**
<b>Resíduo</b>	18	41,2566	2,2920	
<b>Total</b>	26	429,3529		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ), \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ ), ns – não significativo ( $p \geq 0,05$ ). F.V. Fonte de Variação, G.L. Grau de liberdade, S.Q. Soma dos quadrado, Q.M. Quadrado mínimo.

**APÊNDICE F**

(Dados de tempo, ganho de sólidos, quantidade de água e dimensões referentes a cinética de desidratação osmótica de cubos de melão com arestas de 1,5, 2,0 e 2,5 cm).

Tabela F.1 – Tempo, em minutos e valores percentuais da perda de água do melão em forma de cubo, com 1,5; 2,0 e 2,5 centímetros de aresta, desidratado com tratamento preliminar em solução de sacarose a 65 °Brix.

<b>Tempo (min)</b>	<b>1,5 cm</b>	<b>2,0 cm</b>	<b>2,5 cm</b>
0	100,00	100,00	100,00
15	99,11	98,64	98,28
30	98,69	97,33	96,58
60	95,26	95,06	94,17
90	91,60	91,68	93,85
120	90,33	91,14	91,60
150	87,46	88,82	90,88
180	86,68	89,78	91,44
210	85,59	87,96	88,09
270	82,17	84,96	88,56
330	79,18	83,77	86,51
420	80,69	79,33	86,13
510	77,93	79,03	86,20
690	75,61	78,64	80,40
870	67,14	74,60	80,89
1050	63,90	71,89	77,92
1230	61,14	69,30	75,45
1410	59,39	66,01	72,55
1590	56,12	64,32	70,23
1770	52,76	59,08	67,86
1950	53,01	55,81	63,85
2130	49,03	53,79	62,74
2370	44,68	49,46	60,51
2610	-	48,15	56,80
2850	-	50,03	54,43
3090	-	50,56	52,30
3330	-	47,81	52,29
3570	-	-	48,39
3810	-	-	49,03

Tabela F.2 – Tempo, em minutos e dimensões, em centímetros, de melão em forma de cubo, com 1,5; 2,0 e 2,5 centímetros de aresta, desidratado com tratamento preliminar em solução de sacarose a 65 °Brix.

<b>Tempo (min)</b>	<b>1,5 cm</b>	<b>2,0 cm</b>	<b>2,5 cm</b>
0	1,50	2,00	2,50
15	1,47	1,96	2,47
30	1,47	1,93	2,46
60	1,43	1,89	2,44
90	1,39	1,87	2,41
120	1,36	1,83	2,38
150	1,32	1,79	2,33
180	1,29	1,74	2,29
210	1,27	1,72	2,29
270	1,25	1,67	2,24
330	1,21	1,67	2,19
420	1,17	1,60	2,17
510	1,15	1,59	2,12
690	1,13	1,54	2,11
870	1,08	1,48	2,07
1050	1,03	1,46	2,06
1230	1,01	1,39	2,02
1410	1,00	1,38	1,95
1590	1,01	1,37	1,90
1770	1,00	1,34	1,88
1950	1,00	1,32	1,82
2130	0,99	1,30	1,79
2370	1,01	1,29	1,73
2610	-	1,30	1,71
2850	-	1,31	1,71
3090	-	1,31	1,71
3330	-	1,29	1,70
3570	-	-	1,69
3810	-	-	1,68

**APÊNDICE G**

(Dados de tempo, razão de água e dimensões referentes a cinética de secagem em cubos de melão com arestas de 1,5, 2,0 e 2,5 cm).

Tabela G.1 – Tempo, em minutos e Razão de água (adimensional) de melão em forma de cubo, com 1,5, 2,0 e 2,5 centímetros de aresta, desidratado com tratamento preliminar em solução de sacarose a 65 °Brix, seguido de secagem em estufa a temperatura de 50 °C.

<b>Tempo (min)</b>	<b>1,5 cm</b>	<b>2,0 cm</b>	<b>2,5 cm</b>
0	1,000	1,000	1,000
30	0,901	0,917	0,910
60	0,809	0,851	0,836
90	0,741	0,793	0,779
120	0,652	0,720	0,715
150	0,593	0,673	0,669
180	0,545	0,629	0,628
240	0,461	0,553	0,558
300	0,374	0,470	0,484
360	0,322	0,409	0,435
420	0,283	0,363	0,392
480	0,252	0,325	0,356
540	0,232	0,299	0,331
600	0,213	0,272	0,306
720	0,184	0,233	0,261
840	0,163	0,205	0,230
960	0,160	0,192	0,205
1080	0,135	0,162	0,171
1260	0,118	0,140	0,143
1500	0,101	0,119	0,122
1740	0,087	0,102	0,104
2040	0,073	0,085	0,086
2340	0,059	0,068	0,070
2640	0,050	0,058	0,048
3000	0,039	0,046	0,055
3360	0,031	0,037	0,038
3720	0,021	0,026	0,026
4140	0,013	0,016	0,016
4560	0,006	0,008	0,008
4980	0,000	0,000	0,000

Tabela G.2 – Tempo, em minutos e dimensões, em centímetros, de melão em forma de cubo, com 1,5, 2,0 e 2,5 centímetros de aresta, desidratado com tratamento preliminar em solução de sacarose a 65 °Brix, seguido de secagem em estufa a temperatura de 50 °C.

<b>Tempo (min)</b>	<b>1,5 cm</b>	<b>2,0 cm</b>	<b>2,5 cm</b>
0	1,01	1,29	1,68
30	1,18	1,33	1,81
60	1,05	1,27	1,76
90	1,03	1,28	1,70
120	0,98	1,27	1,67
150	1,01	1,28	1,68
180	1,01	1,29	1,75
240	1,00	1,31	1,71
300	0,98	1,29	1,70
360	1,02	1,29	1,72
420	1,01	1,22	1,71
480	1,02	1,24	1,76
540	1,03	1,30	1,74
600	1,00	1,26	1,77
720	1,02	1,25	1,70
840	1,01	1,22	1,69
960	0,96	1,28	1,62
1080	1,03	1,29	1,67
1260	0,99	1,27	1,66
1500	1,09	1,28	1,71
1740	1,06	1,31	1,69
2040	1,03	1,28	1,68
2340	1,07	1,31	1,68
2640	1,08	1,31	1,73
3000	1,04	1,32	1,73
3360	1,02	1,26	1,71
3720	1,04	1,29	1,71
4140	1,03	1,28	1,69
4560	1,05	1,29	1,67
4980	1,02	1,30	1,65