

GABRIELA DE AGUIAR PIRASSOL DE OLIVEIRA

**SECAGEM DE CENOURAS
EM TAMBOR ROTATIVO A VÁCUO**

Florianópolis / SC
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Oliveira, Gabriela de Aguiar Pirassol de
Secagem de cenouras em tambor rotativo a vácuo /
Gabriela de Aguiar Pirassol de Oliveira ;
orientador, João Borges Laurindo, 2018.
111 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis,
2018.

Inclui referências.

1. Engenharia de Alimentos. 2. Secagem a vácuo.
3. Cenouras desidratadas. 4. Secador rotativo a
vácuo. I. Laurindo, João Borges . II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Alimentos. III. Título.

GABRIELA DE AGUIAR PIRASSOL DE OLIVEIRA

**SECAGEM DE CENOURAS
EM TAMBOR ROTATIVO A VÁCUO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Alimentos.
Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

Florianópolis / SC
2018

Gabriela de Aguiar Pirassol de Oliveira

**SECAGEM DE CENOURAS
EM TAMBOR ROTATIVO A VÁCUO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Alimentos**, área de Concentração de **Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 28 de setembro de 2018.

Prof.^a Dra. Sandra Regina Salvador Ferreira
Coordenador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Borges Laurindo
Orientador

Prof. Dr. Alan Ambrosi
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Ricardo Lemos Monteiro
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, Jesus Cristo, meus guias e mestres pelo amparo e fortalecimento nos momentos de dúvida e sofrimento.

Gratidão aos meus pais, irmãos e sobrinhas pelo imenso amor dedicado a mim, por estarem sempre perto nos momentos de dificuldade e por acreditarem no meu sucesso.

Ao Ricardo, meu amor e amigo, pelos anos de amizade, paciência, amor, companheirismo e apoio.

Aos meus “filhos de quatro patas” – Steak, Raiska, Mike e Romeo pelo amor desmedido, por me alegrarem nos momentos difíceis e por me impulsionarem ao autoconhecimento.

Ao Luiz e Ellusa, por me mostrarem um belo caminho de autoconhecimento com amor.

Ao meu orientador João Borges Laurindo, por aceitar o desafio de me orientar e por compartilhar do seu sábio conhecimento deste processo tão surpreendente e encantador que é a secagem.

À CAPES, UFSC, PPGEAL e PROFI por viabilizarem a realização de um sonho, com recursos financeiro e instalações de qualidade.

Ao NUMA pela construção do equipamento, pela atenção e paciência ao longo deste processo.

Aos ICs Ana Lúcia e Guilherme pelo auxílio direto na realização deste trabalho, paciência, boa amizade e por me ensinarem tanto.

Ao Marco Guzman, sempre disposto a compartilhar seus conhecimentos, muito coerentes, com muita simplicidade e disposição, enquanto estive no Brasil e mesmo depois, ao retornar para sua terra natal.

Ao Luciano V. Gonzaga pelos conselhos e por compartilhar seu vasto e precioso conhecimento na área de análise química de alimentos.

Ao Ricardo, Jade e Jaqueline, pelo auxílio com seus conhecimento e experiência no laboratório.

À Laura, Paulinha, Fernanda, Thayla e Suelen pela boa amizade e por sempre e por estarem dispostas a meu auxiliar, com tanta amorosidade e simplicidade.

Aos colegas do PROFI que eu não citei, mas que foram igualmente importantes neste processo de aprendizagem e boa convivência.

RESUMO

A cenoura (*Daucus carota L.*) é uma hortaliça amplamente consumida devido ao seu sabor, alto valor nutricional, com destaque para seu alto teor de carotenoides. A cenoura é consumida *in natura*, na forma de conservas e desidratada. Na indústria, a secagem convectiva com ar quente é o processo de desidratação mais utilizado. As temperaturas elevadas degradam parte dos carotenoides e causam mudanças de cor e influenciam na capacidade de reidratação dos produtos. Este estudo teve como objetivo o desenvolvimento de secador rotativo a vácuo para a produção de hortaliças desidratadas por agricultura familiar ou indústria de pequeno porte. Um secador tubular rotativo, com aquecimento condutivo, foi desenvolvido para esse fim. O aquecimento se deu por meio de um banho termostático aquecido a 90 °C. Fatias de cenouras (*Daucus carota L.*) de 5 mm de espessura foram branqueadas e inseridas no tambor de secagem a vácuo. O secador foi operado sob vácuo (VD), com um pulso de vácuo, seguido de secagem a vácuo (KMFD-VD) ou com aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (KMFD), em temperaturas de 60-70 °C. As curvas de secagem mostraram que o processo ocorre com taxa decrescente. Dentre os modelos ajustados, o de Midilli apresentou melhores R² e RMSE em todos os processos avaliados. O processo KMFD-VD-70 apresentou menor tempo de secagem, para produto com umidade final de 0,05 g g⁻¹ (base seca) e a_w < 0,5. As micrografias mostraram amostras compactadas pelo processo de secagem, o que foi confirmado pelas massas específicas aparentes e porosidades. As curvas de reidratação foram bem ajustadas pelo modelo de Peleg. Quanto à textura, as amostras reidratadas a 25 °C apresentaram textura próxima às observadas nas amostras branqueadas. As amostras apresentaram pouca perda dos pigmentos em relação à amostra *in natura*. Em vista do exposto, o secador rotativo a vácuo se mostrou eficiente na desidratação de cenouras, com tempos de secagem adequados, resultando em cenouras desidratadas com manutenção da cor e com boa capacidade de reidratação.

Palavra-chave: Cenoura. Secagem a vácuo. Carotenoides.

ABSTRACT

Carrot (*Daucus carota L.*) is a vegetable widely consumed due to its taste, high nutritional value, especially its high content of carotenoids. Carrot is usually consumed *in natura*, preserved and dehydrated forms. In industry, convective drying with hot air is the most commonly process used. High temperatures degrade part of the carotenoids and cause color changes, affecting the rehydration capacity of the dehydrated products. This study aimed to develop a vacuum rotary dryer for the production of dehydrated vegetables by families farm or small industries. A rotary tubular drier with conductive heating was developed for this purpose. Heating was carried out by a thermostatic bath heated to 90 ° C. Slices of carrots (*Daucus carota L.*) 5 mm thickness were blanched and inserted into the vacuum drying drum. The dryer can be operated under vacuum (VD) with a vacuum pulse, followed by vacuum drying (KMFD-VD) or with multiple cycles of vacuum-pulse heating (KMFD) at temperatures of 60-70 ° C. The drying curves showed that the process occurs with decreasing rate. Among the adjusted models, Midilli showed better R² and RMSE in all evaluated processes. The KMFD-VD-70 process presented a lower drying time, for product with final humidity of 0,05 g g⁻¹ (dry basis) and a_w < 0,5. The micrographs showed compacted samples by the drying process, which were confirmed by the apparent specific masses and porosities. The rehydration curves were better adjusted by Peleg model. In texture analyse, the samples rehydrated at 25 °C showed texture close as observed in blanched samples. The samples showed little loss of the pigments compared to *in natura* samples. Therefore, the rotary vacuum dryer was efficient in dehydrating carrots, with suitable drying times, resulting in dehydrated carrots with color maintenance and good rehydration capacity.

Keywords: Carrot. Vacuum drying. Carotenoids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração diagramática da estrutura anatômica de tecidos da cenoura (<i>Daucus carota L.</i>), em seção transversal.....	29
Figura 2. Representação esquemática da morfologia da cenoura (<i>Daucus carota L.</i>).....	30
Figura 3. Estrutura química do β -caroteno.....	32
Figura 4. Curvas típicas de secagem e temperatura do produto.....	35
Figura 5. Diagrama esquemático do dispositivo experimental utilizado para a secagem de fatias de cenouras por KMFD, KMFD-VD, VD.....	44
Figura 6. Aparato experimental utilizado para secagem das amostras....	45
Figura 7. Fluxograma operacional utilizado para a técnica de secagem por <i>Conductive multi-flash drying</i> (KMFD), por <i>Conductive multi-flash drying</i> seguido por um período de secagem a vácuo (KMFD-VD) e secagem a vácuo (VD).....	46
Figura 8. Balança analítica, com gancho acoplado para medições em solventes.....	51
Figura 9. Diagrama esquemático de um picnômetro de ar comprimido.	52
Figura 10. Ilustração da localização das perfurações realizadas nas amostras <i>in natura</i> , branqueada e nas amostras desidratadas pelos processos KMFD, KMFD-VD e VD após serem submetidas a reidratação nas temperaturas de 25 °C e 80 °C.....	56
Figura 11. Escala de cor CIELAB.....	57
Figura 12. Variação morfológica encontrada em amostras de cenoura (<i>Daucus carota L.</i>) <i>in natura</i>	59
Figura 13. Evolução temporal da temperatura (°C) e pressão (mbar) das amostras de cenoura desidratadas pelo processo KMFD-60.....	60
Figura 14. Evolução temporal da temperatura (°C) e pressão (mbar) das amostras de cenoura desidratadas pelo processo KMFD-VD-60.....	61
Figura 15. Evolução temporal da temperatura (°C) e pressão (mbar) das amostras de cenoura desidratadas pelo processo VD.....	62
Figura 16. Evolução temporal da triplicata da umidade em base seca (Xbs) das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo KMFD-60.....	62
Figura 17. Evolução temporal da triplicata da umidade em base seca (Xbs) das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo KMFD-VD-60.....	63
Figura 18. Evolução temporal da triplicata da umidade em base seca (Xbs) das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo VD.....	63

Figura 19. Evolução temporal da média da umidade em base seca das amostras de cenouras branqueadas desidratadas durante os processos de secagem KMFD-60 (□), KMFD-70 (×), KMFD-VD-60 (◆), KMFD-VD-70 (▲) e VD (+).....	64
Figura 20. Evolução temporal da umidade adimensional das amostras de cenouras branqueadas desidratadas durante os processos de secagem KMFD-60 (□), KMFD-70 (×), KMFD-VD-60 (◆), KMFD-VD-70 (▲) e VD (+).....	64
Figura 21. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem KMFD-60. Experimental (◇), Midilli (—)	65
Figura 22. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem KMFD-VD-60. Experimental (◇), Midilli (—)	65
Figura 23. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem VD. Experimental (◇), Midilli (—)	66
Figura 24. Evolução temporal da taxa de secagem adimensional, $d(X/X_0)/dt$ das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo KMFD-60	68
Figura 25. Evolução temporal da taxa de secagem adimensional, $d(X/X_0)/dt$ das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo KMFD-VD-60	68
Figura 26. Evolução temporal da taxa de secagem adimensional, $d(X/X_0)/dt$ das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo VD	69
Figura 27. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem KMFD-60. Experimental (◇), Midilli (—)	70
Figura 28. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem KMFD-VD-60. Experimental (◇), Midilli (—)	70
Figura 29. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem VD. Experimental (◇), Midilli (—)	71
Figura 30. Imagem MEV, com ampliação de 100 vezes, da fratura do xilema (1) e floema (2) das amostras desidratadas pelos processos KMFD-60 (a), KMFD-70 (b), KMFD-VD-60 (c), KMFD-VD-70 (d) e VD (e)	77
Figura 31. Imagem MEV, com ampliação de 100 vezes, da superfície do xilema secundário das amostras desidratadas pelos processos KMFD-60 (a), KMFD-70 (b), KMFD-VD-60 (c), KMFD-VD-70 (d) e VD (e)	78
Figura 32. Razão de reidratação a 25 °C das amostras de cenouras desidratadas em função do tempo. Dados experimentais: KMFD-60 (+); KMFD-70 (□); KMFD-VD-60 (◇); KMFD-VD-70 (Δ) e VD (o). O modelo de Peleg ajustado às curvas está representado pela linha contínua	81

Figura 33. Razão de reidratação a 80 °C das amostras de cenouras desidratadas em função do tempo. Dados experimentais: KMFD-60 (+); KMFD-70 (□); KMFD-VD-60 (◇); KMFD-VD-70 (Δ) e VD (o). O modelo de Peleg ajustado às curvas está representado pela linha contínua 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição centesimal de 100 g de cenoura crua (<i>Daucus carota L.</i>)	30
Tabela 2. Pressão absoluta (kPa) que pode ser atingida na câmara de secagem, permitindo ebulição da água contida no alimento a diferentes temperaturas de secagem	37
Tabela 3. Valores da média \pm desvio padrão das umidades em base seca (X_{bs}) das amostras de cenoura (<i>Daucus carota L.</i>) <i>in natura</i> e branqueadas.	58
Tabela 4. Teor da média da umidade em base seca ($X_{bs_{final}}$), atividade de água (a_w), tempo de secagem (t_f) e números de ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo (KMFD) para as diferentes condições de secagem avaliadas	67
Tabela 5. Parâmetros e desempenho dos modelos de Lewis, Page, Page Modificado I e Midilli ajustados aos dados experimentais da secagem pelos processos KMFD, KMFD-VD, VD	73
Tabela 6. Valores da média \pm desvio padrão de densidade aparente (ρ_{ap}) e porosidade (ϵ) das amostras de cenoura <i>in natura</i> , branqueada e desidratadas	80
Tabela 7. Parâmetros do Modelo Exponencial ajustados aos dados experimentais da razão de reidratação das amostras de cenouras desidratadas por diferentes processos	83
Tabela 8. Parâmetros do Modelo de Peleg ajustados aos dados experimentais da razão de reidratação das amostras de cenouras desidratadas por diferentes processos	84
Tabela 9. Parâmetros do Modelo de Weibull ajustados aos dados experimentais da razão de reidratação das amostras de cenouras desidratadas por diferentes processos	85
Tabela 10. Média \pm desvio padrão da força máxima aplicada (N) nos ensaios de perfuração para as amostras <i>in natura</i> , branqueada e nas amostras desidratadas pelos processos KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD após serem submetidas a reidratação na temperatura de 25 °C, durante 7 horas	88
Tabela 11. Média \pm desvio padrão da força máxima aplicada (N) nos ensaios de perfuração para as amostras <i>in natura</i> , branqueada e nas amostras desidratadas pelos processos KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD após serem submetidas a reidratação na temperatura de 80 °C, durante 5 horas	88

Tabela 12. Concentração de carotenoides totais ($\mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca) das amostras *in natura*, branqueada e desidratadas pelos processos KMFD-70, KMFD-VD-70 e VD90

Tabela 13. Valores da média \pm desvio padrão das medidas dos parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) e variação de cor em relação à amostra *in natura* (ΔE^*) das amostras de cenoura branqueada, desidratadas pelos diferentes processos, reidratadas em diferentes temperaturas (25 °C e 80 °C)93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Sigla	Descrição
AOAC	<i>Association of Official Analytical Chemists</i>
ANOVA	Análise de variância
CAPV	Ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
KMFD	<i>Conductive-multi-flash drying</i>
KMFD-VD	<i>Conductive multi-flash drying</i> seguido de um período de secagem a vácuo
LCME	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
MWMFD	<i>Microwave multi-flash drying</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PID	Proporcional-integral-derivativo
VD	<i>Vacuum drying</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
ΔE^*	Varição total da cor	-
ΔT	Redução da temperatura do material	$^{\circ}\text{C}$
ΔH_v	Varição de entalpia específica de vaporização da água	kJ kg^{-1}
A, B, C	Parâmetros da equação de Antoine	-
A^*	Parâmetros da equação de Midilli	-
B^*	Parâmetros da equação de Midilli	s^{-1}
Abs	Máxima absorbância medida	-
a_w	Atividade de água	-
a^*	Tonalidade vermelha/verde	-
a_0	Tonalidade vermelha/verde da amostra <i>in natura</i>	-
$A_{1\text{ cm}}^{1\%}$	Absortividade para o carotenoide predominante em éter de petróleo	-
α	Parâmetro de forma do modelo de Weibull (adimensional)	-
b^*	Tonalidade amarela/azul	-
b_0	Tonalidade amarela/azul da amostra <i>in natura</i>	-
β	Parâmetro de escala do modelo de Weibull	min
b.s.	Base seca	g g^{-1}
c	Calor específico médio	$\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$
c^*	Intensidade ou saturação da cor	-
CAR	Carotenoides totais	$\mu\text{g g}^{-1}$
d_{ar}	Densidade do ar	g cm^{-3}
d_{obj}	Densidade do objeto	g cm^{-3}
d_{massas}	Densidade da massa padrão	g cm^{-3}
dX/dt	Taxa de secagem	$\text{g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$
E	Taxa de expansão	-
ϵ	Porosidade	-
H	Tonalidade vermelha/amarela/verde/azul	-
k	Constante cinética da equação exponencial	min^{-1}
κ_1	Parâmetros do modelo de Peleg	min^{-1}
κ_2	Parâmetros do modelo de Peleg	-1

k_L	Constante de secagem de Lewis	s^{-1}
k_M	Constante de secagem de Midilli	-
k_P	Constante de secagem de Page	s^{-n}
k_{PM}	Constante de secagem de Page Modificado I	s
L^*	Luminosidade entre o preto e branco	-
L_0	Luminosidade entre o preto e branco da amostra <i>in natura</i>	-
m	Massa da amostra	g
m_0	Massa de amostra no início da secagem	g
$m_{c,ce}$	Massa do cesto com a amostra	g
m_c	Massa do cesto vazio	g
$m_{c,ce,h}$	Massa do cesto com a amostra de cenoura imersa em <i>n</i> -heptano	g
$m_{c,h}$	Massa do cesto vazio imerso em <i>n</i> -heptano	g
m_d	Massa da amostra desidratada	g
m_i	Massa de amostra após o experimento	kg
m_p	Massa inicial do produto	kg
m_r	Massa da amostra reidratada	g
m_{w0}	Massa de água da amostra inicial	g
Δm_w	Perda de massa	kg
n	Parâmetro do modelo de Page, Page Modificado I, Midilli	-
P	Pressão	mbar, kPa
P_1	Massa corrigida do objeto	g
P_2	Massa dos padrões	g
ρ_{ap}	Massa específica aparente	$g\ cm^{-3}$
ρ_r	Massa específica real	$g\ cm^{-3}$
ρ_s	Massa específica do solvente <i>n</i> -heptano	$g\ cm^{-3}$
ρ_v	Massa específica do vapor na temperatura após a descompressão do sistema	$g\ cm^{-3}$
RR	Razão de reidratação	-
RR_e	Razão de reidratação na saturação	-
R^2	Coefficiente de determinação	-
$RMSE$	Raiz quadrada do erro quadrático médio	-
t	Tempo de processo	s, min, h
T	Temperatura	$^{\circ}C$
t_f	Tempo final de secagem	min, h

UR	Umidade Relativa	%
V_a	Volume da câmara da amostra	m^3
V_{ap}	Volume aparente da amostra	m^3
V_e	Volume da câmara de expansão	m^3
V_r	Volume real da amostra	m^3
V_s	Volume do sólido	m^3
ΔV	Varição do volume do sistema por unidade de massa	-
X_0	Umidade inicial	$g\ g^{-1}$
X_{bs}	Umidade em base seca	$g\ g^{-1}$
X_{eq}	Umidade de equilíbrio	$g\ g^{-1}$
\bar{X}_t	Conteúdo de umidade média	$g\ g^{-1}$

SUMÁRIO

DIAGRAMA CONCEITUAL	25
1 INTRODUÇÃO.....	27
1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 CENOURA	29
2.2 CAROTENOIDES.....	31
2.3 SECAGEM	32
2.3.1 Cinética de secagem.....	33
2.3.2 Secagem convectiva	35
2.3.3 Secagem condutiva	36
2.3.4 Secagem a vácuo	36
2.3.5 Secagem com múltiplos ciclos de aquecimento- pulso de vácuo (KMFD)	37
2.4 EFEITOS DA SECAGEM NOS ALIMENTOS.....	39
2.4.1 Propriedades físicas.....	39
2.4.2 Aspectos químicos, microbiológicos e nutricionais	40
2.5 SECAGEM DE RAÍZES E TUBÉRCULOS	41
2.5.1 Secagem de cenouras.....	42
3 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 SELEÇÃO E PREPARO DA MATÉRIA-PRIMA	43
3.2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	44
3.3 EXPERIMENTO DE SECAGEM.....	46
3.4 CINÉTICAS DE SECAGEM	47
3.4.1 Conductive multi-flash drying (KMFD).....	47
3.4.2 Conductive multi-flash drying seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD-VD)	48
3.4.3 Secagem a vácuo (VD).....	48
3.5 AJUSTE POR MODELOS MATEMÁTICOS.....	48

3.6	CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO DESIDRATADO	49
3.6.1	Determinação do teor de umidade e atividade de água	49
3.6.2	Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	50
3.6.3	Determinação das propriedades físicas	50
3.6.4	Determinação da capacidade de reidratação	54
3.6.5	Determinação das propriedades mecânicas de textura	55
3.6.6	Determinação do teor de carotenoides totais (CAR)	56
3.6.7	Determinação da medida instrumental de cor	57
3.6.8	Análise estatística	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	58
4.2	CINÉTICA DE SECAGEM	59
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DESIDRATADAS	75
4.3.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	75
4.3.2	Massa específica aparente e porosidade	79
4.3.3	Capacidade de reidratação	80
4.3.4	Ensaio mecânico de textura	87
4.3.5	Carotenoides totais	89
4.3.6	Análise instrumental de cor	91
5	CONCLUSÃO	95
6	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A	105
	APÊNDICE B	106
	APÊNDICE C	108
	APÊNDICE D	110

DIAGRAMA CONCEITUAL

SECAGEM DE CENOURAS EM TAMBOR ROTATIVO A VÁCUO

Motivação

- Desenvolvimento de equipamento para secagem de hortaliças em pequena escala, que permita a preservação sensorial e nutricional dos alimentos desidratados.
- Redução do desperdício e desenvolvimento de novos produtos a partir de hortaliças, com possibilidade de agregação de valor a produtos da agricultura familiar.
- Desenvolvimento de cenouras desidratadas, produto pouco disponível no mercado.

O que já foi feito

- Fatias de cenouras desidratadas têm sido obtidas por diversas técnicas de secagem, como secagem convectiva, secagem a vácuo, secagem por micro-ondas e liofilização.
- A aplicação de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo tem sido estudada pelo Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos, do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos – UFSC, para desidratar frutas e hortaliças.

Hipóteses

- A secagem com pulsos de vácuo permite produção de fatias de cenouras desidratadas, com preservação da maior parte dos carotenoides totais presentes no produto fresco.
- É possível realizar esse processo em tambor rotativo, adaptado para pequenas escalas de produção.

Respostas esperadas

- Condições de secagem adequadas e os tempos de secagem resultantes.
- Características visuais, físicas e físico-químicas das cenouras desidratadas: umidade, atividade de água, porosidade, assas específicas real e aparente, cor, carotenoides totais, textura, microestrutura e capacidade de reidratação.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*), aproximadamente um terço de toda produção mundial de alimentos é perdida ou desperdiçada ao longo de toda a cadeia produtiva. Estima-se que em países em desenvolvimento - como o Brasil -, aproximadamente 54% dos alimentos produzidos são desperdiçados durante as etapas da produção, manipulação pós-colheita e armazenamento (FAO, 2017). Diante desse cenário, a indústria de alimentos passa a ter papel fundamental na geração de tecnologias que visem o aumento da estabilidade dos produtos, reduzindo as perdas pós-colheita.

A água presente nos alimentos favorece as perdas no pós-colheita de frutas e hortaliças, uma vez que atividades de água (a_w) elevadas criam condições para o crescimento microbiano, favorecendo a deterioração em alimentos perecíveis (FELLOWS, 2006). Sendo assim, operações que visam reduzir a a_w em alimentos perecíveis auxiliam na redução da proliferação microbiana e do escurecimento enzimático dos alimentos, reduzindo as perdas (FELLOWS, 2006; SPOTO, 2006; EVANGELISTA, 2008; MUJUMDAR, 2011). Portanto, a secagem de alimentos compreende alternativa para a conservação de alimentos.

A cenoura (*Daucus carota L.*) consiste em importante raiz empregada na alimentação humana devido ao seu alto valor nutritivo. Essa hortaliça contém altas concentrações de vitaminas do complexo B, minerais e carotenoides (compostos que conferem sua cor característica), possuem atividade antioxidante e são precursores da vitamina A. A preservação de compostos com alto valor nutritivo em alimentos processados é importante para a obtenção de produtos com alto valor nutricional e que sejam atrativos aos consumidores.

De maneira geral, para a secagem de hortaliças, a indústria utiliza ar quente como meio de secagem. Para reduzir os longos tempos de secagem, é comum o uso de temperaturas elevadas, responsáveis pela degradação nutricional e sensorial, com destaque para baixa qualidade na textura resultante.

Ainda que a liofilização seja considerada uma técnica de secagem capaz de evitar os danos causados pelo emprego de temperaturas elevadas, trata-se de um processo dispendioso, competitivo para desidratação de alimentos com alto valor agregado. A secagem a vácuo também é um método capaz de manter a qualidade de alimentos desidratados termo sensíveis, além de reduzir as reações de oxidação. No

entanto, não reduz significante as mudanças indesejáveis na textura, nem aumenta significativamente a capacidade de reidratação dos produtos resultantes.

O presente estudo tem como objetivo geral o desenvolvimento de um secador rotativo a vácuo, para a desidratação de hortaliças, visando a manutenção sensorial e nutricional dos compostos presentes no alimento.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

– Desenvolver um secador rotativo a vácuo para secagem de fatias de cenouras. O secador deve realizar a secagem a vácuo (VD), a aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (KMFD), a combinação de um pulso de vácuo com a secagem a vácuo (KMFD-VD);

– Determinar a cinética de secagem dos produtos pelos diferentes processos citados, em diferentes temperaturas (60 °C e 70 °C);

– Caracterizar as amostras obtidas pelos diferentes processos quanto à umidade, atividade de água, propriedades mecânicas, porosidade, cor, teor de carotenoides totais, microestrutura e razão de reidratação;

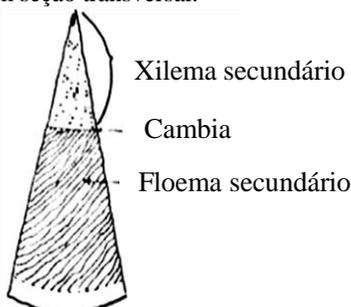
– Avaliar o desempenho dos diferentes métodos de secagem por meio das características dos produtos desidratados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CENOURA

A cenoura (*Daucus carota* L.) compreende uma hortaliça pertencente à família *Apiacea*, do grupo das raízes tuberosas, cuja parte comestível é a raiz (EMBRAPA, 1999). Anatomicamente, essa raiz é composta por diferentes partes (Figura 1) - o xilema e o floema secundários e o cambia - que tem como característica o fato de ser órgão de armazenamento de substratos, principalmente o amido. É considerada pouco perecível, por apresentar baixa atividade respiratória. Além disso, seu crescimento continua após a colheita e pode ser armazenada por período relativamente longo (CHITARRA; CHITARRA, 2005).

Figura 1. Ilustração diagramática da estrutura anatômica de tecidos da cenoura (*Daucus carota* L.), em seção transversal.



Fonte: Adaptado de Damodaran; Parkin; Fennema (2010).

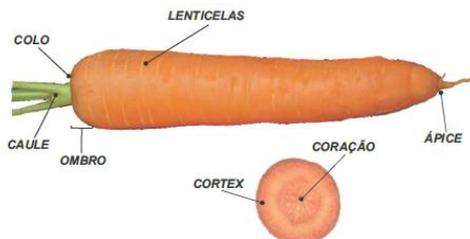
Morfologicamente, conforme demonstrado na Figura 2, a cenoura é dividida em caule, colo, ombro, lenticelas e ápice; sua parte interior inclui o córtex (floema secundário) e coração (xilema secundário). Em relação ao tamanho, as cenouras podem ser classificadas como curtas (até 12 cm de comprimento), médias (12-18 cm de comprimento), ou compridas (maior que 18 cm de comprimento) (MURAYAMA, 1973).

Nutricionalmente, a cenoura constitui fonte de carboidrato e minerais, como potássio, cálcio, fósforo e magnésio, como demonstrado na

Tabela 1. Em seu estudo de revisão sobre a composição química, propriedades funcionais e processamento de cenouras, Sharma et al. (2012) relatam que em relação ao conteúdo de carboidratos ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$), os carboidratos solúveis são encontrados em maior concentração (6% –

7%), sendo que sua maior porção composta de açúcares redutores (1,7% - 3,4%), como sacarose glicose, xilose e frutose, e açúcares não redutores (2,7% - 4,5%). Variações na concentração nutricional decorrem da diferença de cultivares, clima, composição do solo (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

Figura 2. Representação esquemática da morfologia da cenoura (*Daucus carota L.*).



Fonte: Araújo (2010).

Devido à sua versatilidade, a cenoura é comumente comercializada nas formas *in natura*, em conservas (doces ou salgadas), como sucos, picles, em pó e desidratada (SHARMA et al., 2012; LIMA et al., 2004).

Tabela 1. Composição centesimal de 100 g de cenoura crua (*Daucus carota L.*).

Componentes	g/100 g
Calorias (kcal)	34,0
Proteína (g)	1,3
Lipídeos (g)	0,2
Carboidrato (g)	7,7
Fibra alimentar (g)	3,2
Cálcio (mg)	23,0
Magnésio (mg)	11,0
Manganês (mg)	0,1
Fósforo (mg)	28,0
Ferro (mg)	0,2
Sódio (mg)	3,0
Potássio (mg)	315,0
Cobre (mg)	0,1
Zinco (mg)	0,2
RE (µg)	1326,0
Vitamina C (mg)	5,1

Fonte: Taco (2011).

2.2 CAROTENOIDES

Quimicamente, os carotenoides são compostos tetraterpenoides contendo oito unidades de isoprenoides. Seu esqueleto básico e simétrico pode sofrer reações de ciclização, hidrogenação, desidrogenação, encurtamento ou extensão da cadeia, rearranjo, isomerização e, ainda, introdução de oxigênio na molécula, permitindo ampla gama de compostos (RODRIGUEZ-AMAYA, 2001). No que diz respeito às suas propriedades químicas, são compostos lipofílicos, com moderada estabilidade ao calor e sujeitos a perdas por oxidação; além disso, podem ser isomerados, para a forma *cis* ou *trans*, na presença de calor, ácido e luz. Sua faixa de cor varia do amarelo ao vermelho, com comprimentos de onda entre 430 e 480 nm. Estruturalmente, esses pigmentos podem ser divididos em dois grandes grupos: os carotenos hidrocarbonetos e as xantofilas oxigenadas (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

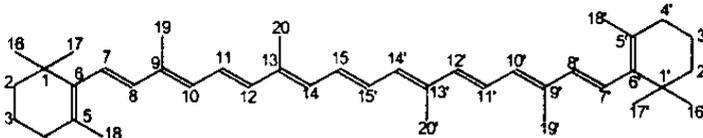
Nos vegetais, os carotenoides se localizam nos cromoplastos e também nos cloroplastos, associados à clorofila. Atuam na proteção da clorofila e do aparelho fotossintético contra a fotodegradação e, também, por absorverem luz em comprimento de onda diferente da clorofila, aumentam o potencial energético do sistema (CHITARRA; CHITARRA, 2005; DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010). O papel de fotoproteção dos carotenoides decorre da sua capacidade de desativação ou inativação de espécies reativas de oxigênio, formadas pela exposição à luz e ao oxigênio. Além disso, os carotenoides específicos presentes nas raízes e nas folhas agem como precursores do ácido abscísico, que funciona como um mensageiro químico e regulador do crescimento em vegetais (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

Na dieta dos seres humanos e outros animais, o principal papel dos carotenos decorre da sua capacidade de atuarem como precursores da vitamina A, devido a existência da estrutura retinoide (com o anel β -ionona) dos carotenoides, somente alguns carotenoides possuem atividade de vitamina A. Diversos estudos têm chamado a atenção para o impacto do consumo destes pigmentos na saúde humana (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

Estruturalmente, a vitamina A (retinol) é composta pela metade da molécula de β -caroteno com adição de uma molécula de água no final da cadeia lateral. Dessa forma, o β -caroteno é um potente composto provitamina A que pode ser 100% assimilado pelo organismo vivo. Além disso, existem outras funções biológicas atribuída aos carotenoides que são independentes da atividade da provitamina A (RODRIGUEZ-AMAYA, 2001).

O β -caroteno (Figura 3) é o carotenoide mais comum encontrado nos tecidos vegetais sendo, também, utilizado como corante em alimentos. O teor desses compostos em alimentos varia de acordo com a maturidade do vegetal, o grau de exposição à luz, o clima, utilização de pesticidas e adubos e o tipo de solo (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

Figura 3. Estrutura química do β -caroteno.



Fonte: Rodriguez-Amaya (2001).

2.3 SECAGEM

A secagem de alimentos é considerada um dos métodos mais antigos e utilizados para sua conservação. A remoção da umidade de um alimento úmido reduz sua atividade de água, reduzindo as atividades enzimática e microbiana, limitando a velocidade de deterioração do produto. Além da conservação do alimento, a secagem permite reduções no peso, transporte e embalagem do produto. Outra consequência desejável, é que a retirada de água de um alimento favorece etapas, como a moagem e mistura em outros produtos, permitindo aumentar a oferta de produtos no mercado consumidor. Adicionalmente, a oferta de alimentos desidratados é uma forma de oferecer alimentos convenientes e de fácil consumo (RATTI, 2009).

O princípio da secagem consiste na evaporação ou sublimação – sob condições controladas – da água de um material imerso em um meio com menor pressão parcial de vapor de água, que será desidratado até que o equilíbrio seja atingido (RATTI, 2009). É uma operação em que ocorre transferência simultânea de calor e de massa, sendo que o calor transferido para o material promove a evaporação da água, que é transferida para um agente carreador, normalmente o ar de secagem (FELOWS, 2006; RATTI, 2009; MUJUMDAR, 2011).

A transferência de calor pode ocorrer por convecção (secagem direta); por condução (secagem indireta ou por contato); radiação térmica; ou volumetricamente, pela exposição do material úmido a um campo eletromagnético de micro-ondas ou rádio frequência. Todos os métodos

de secagem, exceto o dielétrico (micro-ondas e rádio frequência), fornecem calor para a superfície do material submetido à secagem. Os gradientes de temperatura resultantes causam a difusão do calor para o interior do material. A água líquida é evaporada da superfície do material e no seu interior e transportada pelo ar de secagem (ou por aplicação de vácuo, no caso de secadores não convectivos) (MUJUMDAR, 2011).

A transferência de massa, por sua vez, depende tanto do movimento da umidade dentro do sólido quanto da transferência do vapor de água da superfície sólida para o meio gasoso. Em qualquer processo de secagem, a estrutura do material a ser seco deve ser considerada, uma vez que influencia a transferência da água no seu interior (RATTI, 2009). No caso de alimentos porosos, a transferência da água pode ocorrer principalmente por: i) difusão líquida; ii) difusão de vapores, que tem como força motriz o gradiente de pressão de vapor; iii) escoamento de líquido e vapor, devido a gradientes de pressão total; iv) capilaridade (PARK et al., 2007; MUJUMDAR, 2011).

Em qualquer processo de secagem, um ou mais mecanismos podem estar acontecendo e suas importância relativas podem ser alteradas durante a secagem. Os mecanismos de transferência de água no interior do material dependem da temperatura de secagem e do tamanho dos pedaços a serem secos, sendo pouco afetados pela umidade relativa (UR) e pela velocidade do ar (FELLOWS, 2006). Devido à complexidade desse comportamento, estudos experimentais de cinética são realizados para se conhecer o comportamento do material durante a secagem (ARÉVALO-PINEDO; MURR, 2005).

2.3.1 Cinética de secagem

O conhecimento da cinética de secagem é importante quando se deseja construir um secador ou estabelecer as condições de secagem para determinado alimento, pois fornece informações sobre o seu comportamento sob determinadas condições de secagem (RATTI, 2009).

A Figura 4 representa, qualitativamente, o comportamento de um material submetido à secagem convectiva sob condições (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar) constantes. É possível observar a evolução temporal da umidade em base seca (X_{bs}), da taxa de secagem (dX/dt) e da temperatura do produto (T) ao longo do processo (t).

A curva de secagem representa a umidade do produto em função do tempo. A velocidade (taxa) de secagem é obtida pela diferenciação da curva de secagem. Por fim, a evolução da temperatura do produto é obtida pela medição da temperatura ao longo do processo, que permite a

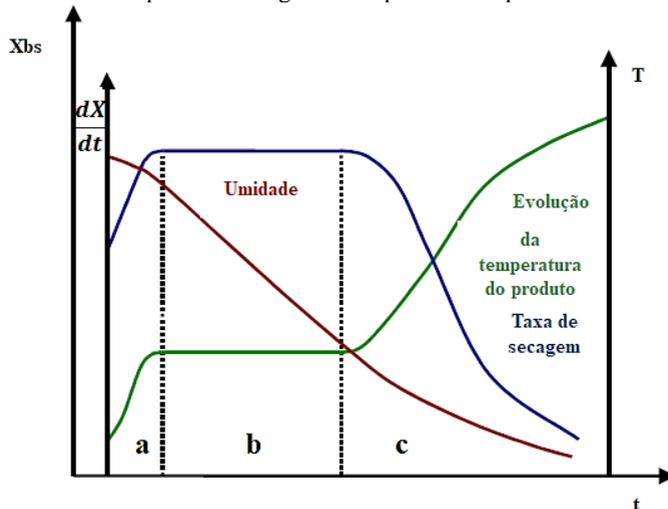
observação de três períodos de secagem (GEANKOPLIS, 1993; PARK et al., 2007; RATTI, 2009; MUJUMDAR, 2011):

- a) *Período de acomodação*: consiste em um período curto e insignificante em relação do tempo total de secagem. A temperatura do produto aumenta até a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem (para produtos com alto teor de umidade inicial). Durante o aquecimento, a pressão parcial de vapor da água na superfície do alimento é baixa, resultando em baixa taxa de secagem;
- b) *Período de secagem à taxa constante*: a superfície do produto está saturada de água e a taxa de secagem é limitada pela taxa à qual o calor é transferido do ar para o produto. Devido à equalização da pressão de vapor da água na superfície do alimento em relação à água pura, a temperatura do produto se torna constante e igual à temperatura de bulbo úmido do ar. A velocidade de secagem é determinada pelas condições do ar de secagem. O período finaliza quando a taxa de migração de umidade do interior do alimento para a superfície não suprir a taxa de secagem. Alguns produtos alimentícios não possuem o período de secagem à taxa constante (RATTI, 2009);
- c) *Período de secagem à taxa decrescente*: o ponto no qual o período de taxa constante termina e inicia o período de taxa decrescente é denominado de umidade crítica. Neste período, observa-se redução na taxa de secagem, devido à insaturação da superfície do produto. Como a transferência de calor, do ar para a superfície do alimento, não é mais compensada pela evaporação da água, observa-se o aumento na temperatura do produto. O fim do processo de secagem ocorre quando o produto atinge a umidade de equilíbrio com o ar de secagem. Segundo Fellows (2006), a maioria dos danos térmicos no alimento ocorre durante esse período.

Na secagem de alimentos sólidos, existe uma vasta opção de secadores, projetados para atender diferentes tipos de alimentos. É possível encontrar secadores convectivos (túnel, bandejas, leito fixo, leito fluidizado), secadores condutivos (tambor, cast-tape drying), secadores a vácuo, secadores com aquecimento usando infravermelho, secadores com

aquecimento dielétrico (micro-ondas e radio-freqüência) e secadores por liofilização.

Figura 4. Curvas típicas de secagem e temperatura do produto.



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

2.3.2 Secagem convectiva

A secagem convectiva é a mais empregada industrialmente para secagem de alimentos. Nesse método, a transferência de calor do ar de secagem para o material ocorre por convecção e o ar também cumpre a função de carregar a água evaporada (PARK et al., 2007). A transferência de calor depende das temperaturas do ar de secagem e do produto a ser seco, da velocidade do ar e da área superficial do alimento, além da sua composição, estrutura e teor de umidade (RATTI, 2009).

Segundo Berk (2018), dentre os fatores que afetam a velocidade da secagem, devem ser considerados os fatores internos, que são aqueles relacionados ao alimento (tamanho, forma, estrutura, porosidade, umidade, pressão de vapor d'água) e os fatores externos, relacionados às condições de secagem (temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem).

2.3.3 Secagem condutiva

Na secagem por condução o calor é fornecido para o alimento através de superfícies aquecidas, que podem ser bandejas, placas, cilindros ou paredes. Para Fellows (2006), a maior resistência à transferência de calor nesse método está associada à condutividade térmica do alimento, sendo importante considerar o conhecimento das suas características reológicas, para determinação da sua espessura ou da forma de disposição do produto a ser desidratado sobre a superfície aquecida. Embora não seja exclusivo, este método é empregado para desidratação de alimentos líquidos ou em pasta (BERK, 2018), mas também, pode ser apropriado para produtos sólidos com alta umidade e pequena espessura (PARK et al., 2007).

A secagem condutiva possui algumas vantagens em relação à secagem convectiva, uma vez que não há necessidade de aquecer grandes volumes de ar, garantindo alta eficiência térmica. Além disso, a secagem pode ocorrer a vácuo, permitindo menores períodos de secagem e menores danos aos alimentos, já que permite maior preservação de compostos oxidáveis e termos sensíveis (FELLOWS, 2006).

2.3.4 Secagem a vácuo

A secagem a vácuo consiste em um método de secagem no qual um alimento úmido é desidratado sob baixa pressão no interior da câmara de secagem, favorecendo a ebulição da água contida no alimento em temperaturas inferiores à ebulição da água em condições atmosféricas (1 atm, 100 °C), conforme demonstrado na Tabela 2. Em geral, esse tipo de secagem é aplicado para alimentos que possuem componentes facilmente oxidáveis, altamente higroscópicos ou que contenham componentes degradáveis pelo emprego do calor (MULET et al., 1983; REIS, 2014). O emprego do vácuo na secagem de frutas e hortaliças tem sido uma alternativa viável, uma vez que o vácuo permite obter produtos de melhor qualidade com relação à cor, textura e sabor (YONGSAWATDIGUL; GUNASEKARAN, 1996).

Tabela 2. Pressão absoluta (kPa) que pode ser atingida na câmara de secagem, permitindo ebulição da água contida no alimento a diferentes temperaturas de secagem.

Temperatura de ebulição da água (°C)	Pressão absoluta (kPa)
20	2,4
30	4,2
40	7,4
50	12,4
60	19,9
70	31,2
80	47,4
90	70,1

Fonte: Reis (2014).

2.3.5 Secagem com múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (KMFD)

Em 2011, Laurindo, Porciuncula e Zotarelli desenvolveram um processo de secagem baseado em múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, representado pela patente PI 1107173-7. Nesse processo, a amostra é aquecida – à pressão atmosférica – até atingir a temperatura desejada, seguido de descompressão instantânea do sistema, favorecendo a obtenção de alimentos desidratados e crocantes com baixas atividade de água e umidade.

Segundo Wang e Sun (2001), a maioria dos alimentos possui dois principais componentes: água e matéria sólida. Quando alimentos úmidos e porosos são submetidos ao vácuo, parte da água contida no alimento evapora a uma temperatura próxima à temperatura de saturação da água em dada pressão aplicada, provocando o resfriamento do alimento.

No processo chamado de *Multi-flash drying* (KMFD), o aquecimento das amostras pode ocorrer por condução, convecção, radiação térmica ou por micro-ondas (LAURINDO; PORCIUNCULA; ZOTARELLI, 2011). Em 2012, Zotarelli, Porciuncula e Laurindo avaliaram a secagem de amostras de frutas utilizando ar quente como meio de aquecimento, empregando a técnica CMFD, processo denominado de *Convective multi-flash drying*. No momento que as amostras atingiam a temperatura de 60 °C, um pulso de vácuo era aplicado mantendo as amostras na condição de vácuo (1,5 kPa) durante 5 minutos; após esse período, a pressão atmosférica era reestabelecida, até as amostras atingirem – novamente – a temperatura desejada. Após 4

horas de processo, as amostras apresentaram conteúdo de umidade, atividade de água e propriedades mecânicas semelhantes às amostras desidratadas por liofilização.

Em 2016, Porciuncula, Segura e Laurindo investigaram a desidratação de amostras de banana empregando o aquecimento das amostras por condução, com aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo. O processo, denominado de *Conductive-multi-flash drying* (KMFD), foi capaz de desidratar as amostras em 5 horas, que apresentaram ao final do processo alta porosidade e crocância – características desejáveis em frutas desidratadas. Monteiro, Carciofi e Laurindo (2016) também avaliaram a desidratação de amostras de banana, utilizando a energia das micro-ondas para o aquecimento do produto (*Microwave multi-flash drying* – MWMFD). A técnica permitiu a obtenção de bananas desidratadas, resultando em atividade de água e propriedades físicas e mecânicas similares às obtidas por liofilização, em intervalos de tempo muito inferiores (0,5 h) à liofilização (15 h).

A perda de massa do produto, que representa a quantidade de água evaporada quando ocorre o resfriamento do produto devido à aplicação do pulso de vácuo está representada pela Equação 1 (ZOTARELLI; PORCIUNCULA; LAURINDO, 2012),

$$\Delta m_v = \frac{c \cdot m_p \cdot \Delta T}{\Delta H_v} \quad (1)$$

onde em que Δm_w representa a perda de massa (kg); c o calor específico médio do produto no intervalo de temperaturas de trabalho ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); m_p é a massa inicial do produto (kg); ΔT representa a redução da temperatura do material durante a aplicação do vácuo ($^\circ\text{C}$) e ΔH_v representa a variação de entalpia específica de vaporização da água na pressão final de trabalho (kJ kg^{-1}).

A equação de Antoine (Equação 2) prediz a temperatura de saturação da água, na pressão final (P) atingida pela câmara de secagem,

$$\log_{10} P = A - \frac{B}{T + C} \quad (2)$$

em que T representa a temperatura ($^\circ\text{C}$); P representa a pressão (kPa) e A, B e C são parâmetros tabelados para cada substância.

2.4 EFEITOS DA SECAGEM NOS ALIMENTOS

Segundo Jangam, Law e Mujumdar (2010), os atributos de qualidade atribuídos ao produto seco são classificados em físicos, químicos, biológicos e nutricionais. Um processo de desidratação adequado é caracterizado pela manutenção da maior parte desses parâmetros de qualidade. De uma forma geral, todos os alimentos sofrem alterações durante a secagem e estocagem, sendo que o objetivo das tecnologias de processamento de alimentos é minimizar essas alterações, fazendo uso de processos adequados e eficientes. Em um produto seco, são passíveis de ocorrerem alterações na textura, modificações indesejáveis no sabor e aroma, alterações de cor e valor nutricional (FELLOWS, 2006).

2.4.1 Propriedades físicas

De acordo com Kokrida e Maroulis (1997), a qualidade de um produto pode ser caracterizada pela coloração, textura, sabor, porosidade, densidade e volume específico. Segundo esses autores, durante a evaporação da água, mudanças na estrutura física do alimento têm como consequência o encolhimento dos produtos, com alterações nas suas propriedades estruturais.

A cor é considerada um importante parâmetro de qualidade em alimentos, pois determina o nível de aceitação do produto pelos consumidores (RATTI, 2009; JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010). Durante a secagem, a cor do produto pode ser alterada devido às reações químicas e bioquímicas que podem ocorrer, que depende – por sua vez - do tipo de alimento a ser desidratado. A oxidação enzimática, reações de *Maillard*, caramelização e escurecimento pela degradação do ácido ascórbico são algumas das principais reações que podem ocorrer durante a secagem e armazenamento de produtos secos (RATTI, 2009). Estudos de deterioração de cor em alimentos de alto valor nutricional são importantes, pois o aspecto visual é fundamental na aceitação dos produtos. Além disso, existe uma relação da atividade antioxidante e do teor de vitaminas com a coloração dos alimentos (RATTI, 2001). Em frutas e hortaliças, os pigmentos carotenoides e clorofilas são alterados devido ao efeito do calor e da oxidação durante a secagem. A atividade residual da enzima polifenoloxidase promove o escurecimento durante a estocagem, que pode ser evitado pelo branqueamento ou tratamento com ácido ascórbico ou dióxido de enxofre (FELLOWS, 2006).

A retirada de água de um produto alimentício resulta em um colapso na estrutura do alimento (RATTI, 2009; JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010), causado pelo desequilíbrio entre as pressões interna e externa do alimento, que promove contração e condicionam o encolhimento do material. Geralmente, o encolhimento aumenta de forma proporcional à quantidade de água retirada do produto durante a secagem (JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010). As principais consequências são as alterações de tamanho e formato do produto, perda da capacidade de reidratação, rachaduras na superfície e endurecimento do produto seco (RATTI, 2009).

A capacidade de reidratação de alimentos desidratados, é uma medida do grau de injúria causada ao material durante o processo de desidratação. Após a secagem, a água que foi removida do alimento não consegue ser repostada da mesma forma quando o alimento é reidratado. Essas alterações irreversíveis ocorrem devido à perda da pressão osmótica das células, alterações na permeabilidade da membrana, migração de solutos, cristalização de polissacarídeos e coagulação de proteínas. Quando o alimento é desidratado em condições ótimas, sofre menos danos, resultando em uma reidratação mais rápida e completa. De fato, produtos secos em condições adequadas tendem ser mais facilmente reidratados (RATTI, 2001; FELLOWS, 2006).

2.4.2 Aspectos químicos, microbiológicos e nutricionais

Segundo Ratti (2009), alimentos desidratados possuem um aumento de vida de prateleira, quando comparado ao alimento *in natura*, porque o processo pode reduzir a atividade de água (a_w) do produto a níveis onde a atividade microbiológica, assim como a velocidade das reações químicas e bioquímicas de deterioração são mínimas. Em relação à atividade microbiana, existe um consenso que a redução da atividade de água abaixo de 0,6 inibe a deterioração microbiana (JAY, 1992; FRANCO; LANDGRAF, 2008; JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010). A maioria das reações oxidativas e reações enzimáticas são inibidas nessa a_w . Em hortaliças, alterações de sabor causadas pela ação de enzimas hidrolíticas ou oxidativas podem ser reduzidas pelo branqueamento (FELLOWS, 2006). No entanto, a auto-oxidação dos lipídios pode ocorrer em baixos valores de a_w ($< 0,2$) (RATTI, 2009).

A velocidade das reações de escurecimento não enzimático, como a reação de *Maillard* ou caramelização, é atingida em valores intermediários de atividade de água (entre 0,4 e 0,6); que resultam na perda de nutrientes, como aminoácidos, além de favorecerem a formação

de coloração escura, assim como *off-flavors*. Alternativamente, as reações de escurecimento podem ser reduzidas por meio da sulfitação, redução do pH e da atividade de água. Como forma de reduzir a oxidação lipídica, tratamentos térmicos prévios, como branqueamento ou emprego de antioxidantes podem ser utilizados (RATTI, 2009)

Durante a secagem, o calor promove a vaporização de elementos voláteis, reduzindo os aromas presentes no produto (FELLOWS, 2006; SPOTO, 2006). O grau de perda dos voláteis depende da temperatura e teor de umidade do alimento durante a secagem e da pressão de vapor e solubilidade no vapor d'água dos compostos voláteis. A segunda causa de perda de aroma ocorre quando o oxigênio acessa a estrutura porosa do alimento, promovendo a oxidação de voláteis, vitaminas e lipídios durante a estocagem (FELLOWS, 2006).

Frutas e hortaliças possuem compostos que contribuem para a manutenção da saúde e redução de doenças, como compostos antioxidantes (carotenoides e compostos fenólicos), vitaminas, ácidos graxos essenciais, fibras e minerais. O processo de secagem deve considerar a preservação desses compostos. No caso das vitaminas, perdas ocorrem devido à diferença de solubilidade em água, oxidações enzimáticas, catálise metálica e sensibilidade ao calor e oxigênio (FELLOWS, 2006; RATTI, 2009). Quanto às proteínas, seu valor biológico e digestibilidade não são alterados pelo processo de desidratação (FELLOWS, 2006).

2.5 SECAGEM DE RAÍZES E TUBÉRCULOS

Genericamente, as raízes são amplamente consumidas e empregadas como matéria-prima na indústria alimentícia e farmacêutica. Embora menos perecíveis que outras hortaliças, como as folhosas, as raízes também degradam mais rapidamente com o aumento de temperatura, sendo a secagem um dos métodos utilizados para aumentar a vida de prateleira desse tipo de produto. Por serem mais espessas que outros alimentos - como sementes, flores e folhas – a secagem de raízes e tubérculos demanda maiores tempos de secagem. Industrialmente, são utilizados diversos métodos de secagem de raízes, dentre eles a secagem convectiva, secagem solar, secagem a vácuo, liofilização, por infravermelho e por micro-ondas (JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010).

O fluxograma de secagem de raízes consiste de várias etapas, dentre elas: i) lavagem, para retirada das sujidades mais grosseiras; ii) seleção; iii) descascamento e retirada das partes não comestíveis; iv)

fatiamento, no formato e dimensões desejadas; v) tratamento térmico e vi) desidratação (JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010).

As etapas de descascamento e fatiamento são responsáveis pelo aumento da taxa respiratória do vegetal, produção de etileno e compostos fenólicos, que promovem a perda de açúcares e compostos solúveis. Essas mudanças causam alteração de cor, textura e sabor do alimento, resultado da síntese e polimerização de compostos fenólicos. Assim, a minimização dessas reações metabólicas se faz necessária para melhoria nas características finais do produto vegetal (LEWICKI, 1998).

Antes da etapa de secagem, o tecido vegetal costuma ser submetido a alguns pré tratamentos, visando a redução das alterações metabólicas adversas que podem ocorrer durante a desidratação e armazenamento. No caso das raízes, o processo de branqueamento, imersão em meio alcalino, sulfitação, congelamento, tratamento com micro-ondas, campo elétrico de alta densidade ou tratamentos a alta pressão são empregados para minimizar essas alterações adversas e melhorar as características da secagem. No caso de cenouras e batatas, por exemplo, é comum realizar o branqueamento em água quente, para inativar enzimas, aumentando a estabilidade do produto desidratado, além de reduzir o tempo de secagem e produzir alimentos com cor e sabor atrativos para o consumidor. O branqueamento favorece a ruptura das paredes celulares, desnaturação proteica perda de turgor e firmeza (JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010). No caso das cenouras, quando submetidas ao branqueamento, além da perda de turgência, alterações complexas ocorrem na matriz de polissacarídeos, afetando as fibras de celulose. O tratamento térmico nesse tipo de processo provoca a separação celular ao longo da lamela média; reduzindo a coesão na matriz de polissacarídeos e adesão intercelular, melhorando as características de absorção e reconstituição da hortaliça (LEWICKI, 1998).

2.5.1 Secagem de cenouras

Nos últimos anos, a atividade antioxidante atribuída aos carotenoides da cenoura tem sido destacada. Com o objetivo de manter o valor nutricional das cenouras, a indústria de alimentos tem utilizado diferentes processos e técnicas de conservação (EMBRAPA, 1999; ARÉVALO-PINEDO; MURR, 2005; HIRANVARACHAT; SUVARNAKUTA; DEVAHASTIN, 2008).

Muitas técnicas de secagem têm sido utilizadas para desidratação de cenouras, dentre elas a secagem solar (TEDERRA; ABERA; WORKU, 2015; SONMETE et al., 2017); secagem com ar quente

(SRIKIATDEN et al., 2003; DOYMAZ, 2017); desidratação osmótica (GHOSH et al., 2004; SUTAR; PRASAD; GUPTA, 2007); secagem com ar quente por convecção natural (GÓRNICKI; KALETA, 2007); secagem com micro-ondas (LIN; DURANCE; SCAMAN; 1998; BAYSAL et al., 2003; CUI; SHI-YING; SUN, 2004); secagem a vácuo (LITVIN; MANNHEIM; MILTZ, 1998).

No caso de cenouras, muitos métodos de secagem têm sido estudados, visando a manutenção da aparência e valor nutricional. Mulet et al. (1983) variaram a temperatura e frações de preenchimento do equipamento, para avaliar o desempenho de secagem de fatias de cenouras com ar quente. Lin, Durance, Scaman (1998) submeteram fatias de cenouras a três métodos de secagem diferentes - micro-ondas a vácuo, secagem convectiva e liofilização – e avaliaram os três métodos com base no seu potencial de reidratação, cor, densidade, valor nutricional e textura. Prakash, Jha e Datta (2004) reportaram a secagem de cenouras utilizando secagem solar em cabine, em leite fluidizado e por micro-ondas. Eles avaliaram o comportamento durante a secagem e a qualidade do produto desidratado após 120 dias de armazenamento. Suvarnakuta, Devahastin e Mujumdar (2005) avaliaram o efeito de vapor superaquecido à baixa pressão, secagem convectiva e a vácuo na cinética de degradação do β -caroteno em cenouras desidratadas. Em 2008, Hiranvarachat, Suvarnakuta e Devahastin avaliaram a secagem de cenoura em três técnicas diferentes – convectiva, a vácuo e com vapor superaquecido – para avaliar a relação dos diferentes isômeros do β -caroteno e suas atividades antioxidantes durante o processo de secagem. Béttega et al. (2014) estudaram o efeito da secagem de cenouras utilizando micro-ondas, com e sem o uso de vácuo, para avaliar o encolhimento do produto. Segundo Nahimana e Zhang (2011), a relação entre o córtex e o xilema é indicativo do estágio de desenvolvimento das cenouras, uma vez que a fração do xilema reduz ao longo do processo de desenvolvimento da raiz, ao passo que aumenta a do córtex, sendo que a heterogeneidade desses sistemas responde diferentemente aos processos de secagem.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 SELEÇÃO E PREPARO DA MATÉRIA-PRIMA

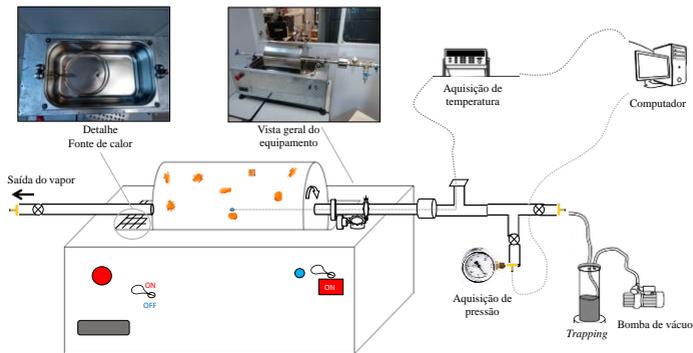
Amostras de cenoura (*Daucus carota L.*) foram adquiridas no comércio local (Florianópolis, SC, Brasil). A seleção das amostras foi realizada visualmente, pela seleção de amostras com coloração laranja característica, desprovidas de anormalidades, sem pontos escuros e sem

coloração roxa nas extremidades. Amostras com diâmetros de $28,0 \pm 3,0$ mm foram lavadas em água potável, descascadas manualmente e fatiadas no sentido transversal, resultando em fatias com espessura de $5,0 \pm 0,5$ mm. As fatias foram submetidas à etapa de branqueamento em água destilada (proporção 1:3) a $87,0 \pm 2,0$ °C, durante 4 minutos, e resfriadas a $10,0 \pm 3,0$ °C, durante 4 minutos. Para retirada da água aderida nas superfícies das amostras, utilizou-se papel filtro.

3.2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Apresenta-se na Figura 5 um diagrama esquemático do dispositivo experimental utilizado nos processos de secagem: *Conductive multi-flash drying* (KMFD), *Conductive multi-flash drying* seguida por um período de secagem a vácuo (KMFD-VD) e secagem com vácuo contínuo (VD).

Figura 5. Diagrama esquemático do dispositivo experimental utilizado para a secagem de fatias de cenouras por KMFD, KMFD-VD, VD.



Fonte: O autor.

O aparato experimental (Figura 6) é composto por um secador de tambor rotativo, conectado a um sistema de vácuo. O tambor é aquecido externamente por contato com um banho de água quente com temperatura regulável ($90,0$ °C \pm $3,0$ °C). O tambor de aço inoxidável 304 tem volume de 12,5 L, com 0,3 m de comprimento, 0,2 m de diâmetro interno e 0,03 m de espessura de parede. Os detalhes do sistema são apresentados a seguir.

O tambor foi conectado a uma bomba de vácuo com capacidade de bombeamento de 350 m³h⁻¹ (LC305-DVP Vacuum Technology, Itália). Um sistema de condensação (*trapping*) foi instalado na linha (entre o

tambor e a bomba de vácuo), visando a retenção dos vapores produzidos ao longo do processo. Um sistema rotativo, baseado em engrenagens, manteve o tambor em rotação de 8 rpm, velocidade suficiente para a movimentação das amostras no seu interior.

Figura 6. Aparato experimental utilizado para secagem das amostras.



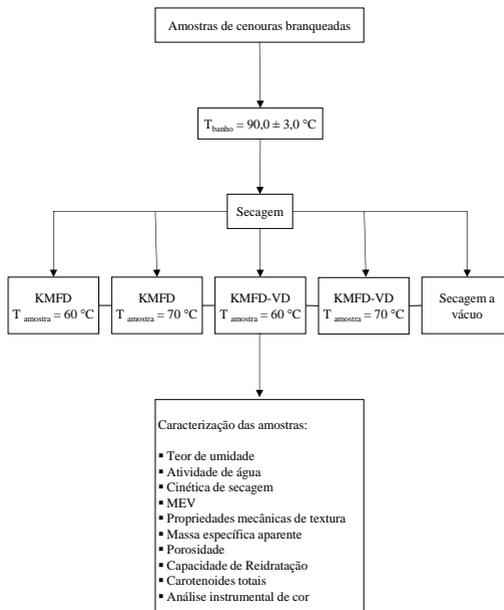
Fonte: O autor.

Um eixo fixo, acoplado em uma das extremidades do tambor, munido de um retentor, permitiu a saída do vapor de dentro da câmara e a entrada do ar atmosférico no sistema, na outra extremidade, quando desejado. Para manutenção da temperatura desejada na câmara de secagem, o banho termostático manteve a água aquecida à temperatura de $90,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, controlada por meio de uma resistência elétrica, com controle de temperatura ON/OFF (Full Gauge, modelo TIC 17R6T, Brasil). A pressão no interior do sistema foi mantida pelo fechamento das válvulas localizadas nas extremidades do tambor, sendo monitorada durante a secagem por meio de um manômetro digital (IT-MN-DG, Velki, Itu-SP, Brasil), conectado a um sistema de aquisição de dados. A variação tempo-temperatura das amostras foi monitorada utilizando termopar do tipo T (Iope, modelo A-TX-TF-TF-R30AWG, Brasil), inserido no centro de uma amostra dentro do secador, sendo conectado a um sistema de aquisição de dados (34970A, Agilent Technologies, EUA).

3.3 EXPERIMENTO DE SECAGEM

Diferentes procedimentos de secagem das fatias de cenouras branqueadas no tambor rotativo foram investigados: i) aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (KMFD); ii) aquecimento e aplicação de um pulso de vácuo, seguido por secagem a vácuo (KMFD-VD); iii) e secagem a vácuo (VD). Na Figura 7 estão apresentadas as alternativas avaliadas após a etapa de preparação das amostras. As amostras de cenouras branqueadas foram inseridas no interior do tambor, que foi fechado e colocado sobre o banho termostático aquecido ($90,0 \pm 3,0 \text{ }^\circ\text{C}$). Para monitoramento da temperatura das amostras, foi inserido um termopar no centro de uma amostra. Uma massa de $918,0 \pm 2,0 \text{ g}$ de amostra foi utilizada para determinar as curvas de secagem.

Figura 7. Fluxograma operacional utilizado para a técnica de secagem por *Conductive multi-flash drying* (KMFD), por *Conductive multi-flash drying* seguido por um período de secagem a vácuo (KMFD-VD) e secagem a vácuo (VD).



Fonte: O autor.

3.4 CINÉTICAS DE SECAGEM

As cinéticas de secagem das fatias de cenoura foram realizadas através da pesagem da câmara de secagem contendo as amostras. Em intervalos de tempo previamente definidos, o tambor era acomodado sobre um suporte de madeira posicionado sobre uma balança analítica (Knwaagen, KNCD60/1, Brasil), com capacidade de 60 kg e resolução de 0,001 kg. O conjunto tambor-amostra-suporte foi pesado durante o processo de secagem, até que sua massa se tornasse constante, configurando o fim do processo de secagem. Devido à alta temperatura do sistema tambor-amostra, no momento da pesagem, que provocou um erro de pesagem devido ao empuxo, uma correção na pesagem foi realizada, conforme Equação 3 (SKOOG; WEST; HOLLER, 1994), em que foi considerada a massa do tambor enquanto estava aquecido para os cálculos da cinética. Ao final do processo, a umidade final (b.s.) e a atividade de água eram determinados. As cinéticas de secagem, assim como a determinação da atividade de água foram realizadas em triplicata.

$$P_1 = P_2 + P_2 \left(\frac{d_{ar}}{d_{obj}} - \frac{d_{ar}}{d_{massas}} \right) \quad (3)$$

em que P_1 representa a massa corrigida do objeto (g), P_2 é a massa dos padrões (g), d_{obj} é a densidade do objeto (g cm^{-3}), d_{massas} representa a densidade das massas padrão (g cm^{-3}) e d_{ar} representa a densidade do ar deslocado por eles ($0,0012 \text{ g cm}^{-3}$).

3.4.1 Conductive multi-flash drying (KMFD)

No momento em que a amostra atingia a temperatura desejada, de 60 °C (KMFD-60) ou 70 °C (KMFD-70), o sistema era rapidamente evacuado pela aplicação de um pulso de vácuo, por um período de cinco minutos, atingindo a pressão final de 35 - 45 mbar. Após esse período, a pressão atmosférica do sistema era restabelecida, com reaquecimento da amostra na temperatura desejada, para assim aplicar novamente um pulso de vácuo.

3.4.2 Conductive multi-flash drying seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD-VD)

No momento que a amostra atingia a temperatura desejada, de 60 °C (KMFD-VD-60) ou 70 °C (KMFD-VD-70), o sistema era evacuado pela aplicação de um pulso de vácuo. O vácuo era mantido até o final do processo de secagem, atingindo a pressão final de 35 - 45 mbar.

3.4.3 Secagem a vácuo (VD)

Após o fechamento do tambor, no início da secagem, o sistema foi despressurizado, dando início à secagem a vácuo (VD), em que a pressão era mantida próxima a 35 - 45 mbar.

3.5 AJUSTE POR MODELOS MATEMÁTICOS

Com o objetivo de verificar os períodos de secagem das curvas de umidade (X_{bs}) adimensionalizadas, a partir dos dados obtidos nos processos avaliados neste trabalho, realizou-se o ajuste matemático por meio de modelos empíricos, empregados na simulação das curvas de secagem. Foram utilizados o modelo de Lewis, de Page, Page Modificado I, e o modelo de Midilli. A partir dos resultados obtidos do melhor modelo, determinou-se a taxa de secagem pela derivação dos valores de umidade obtida nos ajustes.

O modelo de Lewis é dado pela Equação 4:

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

onde \bar{X}_t representa o conteúdo de umidade média (g g^{-1}) para determinado tempo t , X_{eq} representa a umidade de equilíbrio (g g^{-1}), X_0 representa a umidade inicial (g g^{-1}), k_L é a constante de secagem do modelo de Lewis e t representa o tempo de secagem.

O modelo de Page é dado pela Equação 5:

$$\frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k_p t^n) \quad (5)$$

em que k_p é a constante de secagem de Page e n é o parâmetro do modelo.

O modelo de Page Modificado I é dado pela Equação 6:

$$\frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp \left[- \left(\frac{t}{k_{PM}} \right)^n \right] \quad (6)$$

em que k_{PM} representa a constante de secagem de Page Modificado I
O modelo de Midilli é dado pela Equação 7:

$$\frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = A * \exp(-k_M t^n) + B * t \quad (7) \quad (16)$$

em que A *, B *, k_M representam constantes do modelo.

As amostras desidratadas apresentaram valores da umidade de equilíbrio próximo à zero, sendo este parâmetro desconsiderado no momento dos cálculos.

Visando avaliar o desempenho dos ajustes dos modelos para as curvas de secagem, com o auxílio do *software* OriginPro (8.5.0, OriginLab Corporation), foi selecionado o modelo que apresentou os maiores valores de coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

3.6 CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO DESIDRATADO

Ao final do processo de secagem, a caracterização das amostras foi realizada por meio de análises físico-químicas (atividade de água, umidade, volume aparente e real, massa específica aparente, porosidade, cor e textura), análise química (carotenoides totais) e análise micro estrutural (microscopia eletrônica de varredura).

3.6.1 Determinação do teor de umidade e atividade de água

O conteúdo de umidade das amostras foi determinado por meio de método gravimétrico (Shimadzu, Modelo - AY220, Filipinas), em estufa a vácuo (TECNAL, TE-395, Brasil), a 70 °C por 24 horas, segundo a metodologia modificada da AOAC (2005).

A atividade de água (a_w) foi determinada em hidrômetro Aqualab (Aqualab Model Series 3, Decagon Devices Inc., Pullman, EUA), previamente calibrado com água destilada ($a_w = 1,000 \pm 0,003$), a 25 °C. Ambas as análises foram realizadas em triplicata.

3.6.2 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Análise da estrutura das fraturas e superfícies das amostras de cenouras desidratadas, pelos diferentes processos e em diferentes temperaturas, foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC (LCME-UFSC). Foram realizadas imagens MEV (Modelo - JEOL JSM 6390LV, Japão), sob baixo vácuo e voltagem de 10 kV, com aumento de 100 vezes, das fraturas e superfícies, após recobrimento com ouro, usando um metalizador (LEICA, Modelo - EM SCD500).

3.6.3 Determinação das propriedades físicas

3.6.3.1 Densidade aparente (ρ_{ap})

A medida indireta dos volumes aparentes (V_{ap}), das amostras *in natura* e branqueadas, foi realizada, em triplicata, por meio da medida da força de empuxo da amostra imersa em *n*-heptano (LOZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1980). Conforme mostrado na Figura 9, um suporte metálico foi suspenso na parte inferior da balança analítica (Shimadzu, Modelo-AY220, Filipinas), permitindo a acomodação da amostra para realização da análise; viabilizando as medidas das massas do suporte metálico no ar (m_c) e imersa no *n*-heptano ($m_{c,h}$). Em diferentes momentos, amostras de cenoura (*in natura* e branqueada) foram pesadas dentro do suporte metálico e suas medidas de massa foram determinadas, com as diferentes amostras pesadas no ar ($m_{c,ce}$) e imersas em *n*-heptano ($m_{c,ce,h}$). A partir dessas medidas foi possível calcular o volume aparente das amostras, de acordo com a Equação 8. Para efeito de cálculo, considerou-se a massa específica do reagente *n*-heptano igual a 0,68 g cm⁻³ (25 °C).

$$V_{ap} = \frac{(m_{c,ce} - m_c) - (m_{c,ce,h} - m_{c,h})}{\rho_s} \quad (8)$$

onde $m_{c,ce}$ é a massa do cesto contendo a amostra de cenoura; m_c corresponde à massa do cesto vazio; $m_{c,ce,h}$ corresponde à massa do cesto contendo a amostra de cenoura, ambos imersos em *n*-heptano; $m_{c,h}$ corresponde à massa do cesto vazio imerso em *n*-heptano; por fim, ρ_s corresponde à massa específica do *n*-heptano. A massa específica aparente (ρ_{ap}) das amostras foi determinada pelo cálculo da razão entre a

massa da amostra (m_{ce}) e o volume aparente (Equação 9). A análise foi realizada em triplicata

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ce}}{V_{ap}} \quad (9)$$

Figura 8. Balança analítica, com gancho acoplado para medições em solventes.



Fonte: O autor.

3.6.3.2 Volume real (V_r)

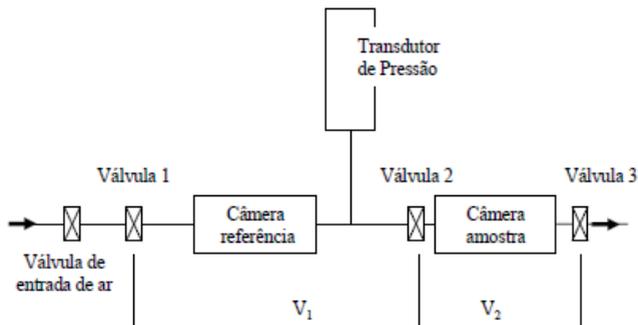
Para determinação do volume real (V_r) das amostras *in natura* e branqueada foi utilizado um picnômetro de ar comprimido, equipamento elaborado para aplicação em amostras sólidas – úmidas ou secas, de acordo com metodologia proposta por Sereno, Silva, Mayor (2007), conforme diagrama da Figura 10.

O equipamento consiste em um instrumento, no qual o fluido de preenchimento utilizado para preencher os espaços vazios é o ar comprimido. Desse modo, o dispositivo é capaz de aferir alterações de pressão no interior da câmara de análise, que ocorre por meio da medida da quantidade de gás comprimido que penetra na câmara de referência e que possui volume constante. O volume real do sólido, portanto, consiste na porção restante da amostra não penetrável pelo ar. Ao expandir na segunda câmara, onde está localizada a amostra, ocorrem alterações na pressão e temperatura do ar, (considerado ideal); possibilita a determinação do volume real da amostra, utilizando a Equação 10:

$$V_r = \frac{V_1 \left(\frac{P_1 \cdot T_2}{P_2 \cdot T_1} \right)}{\left(\frac{P_{atm} \cdot T_2}{P_2 \cdot T_{amb}} \right)} + V_2 \quad (10)$$

em que P_{atm} e T_{amb} constituem a pressão (mbar) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$), medidos com picnômetro vazio e a válvula 1 fechada. P_1 e T_1 consistem na pressão (mbar) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$), respectivamente, aferidas após o equilíbrio da compressão do ar na câmara de referência, com as válvulas 1, 2 e 3 mantidas fechadas. Por fim, P_2 e T_2 representam a pressão (mbar) e a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) medidos após a abertura da válvula 2, mantendo as válvulas 1 e 3 fechadas.

Figura 9. Diagrama esquemático de um picnômetro de ar comprimido.



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

Para as amostras desidratadas pelos diferentes processos avaliados (KMFD, KMFD-VD, VD) nas diferentes temperaturas (60°C e 70°C), o volume aparente (V_{ap}) foi determinado indiretamente, utilizando a técnica do leito de partículas empacotadas. As amostras desidratadas foram submetidas à moagem em um moinho de facas (TECNAL, TE 631/2, Brasil) por 120 segundos, na velocidade de 19440 rpm, sendo padronizadas por granulometria em peneiras consecutivas de 20 e 25 *mesh*. As amostras desidratadas em pó foram pesadas (5,0 g) em provetas com capacidade de 5 mL. De forma padronizada, as amostras foram compactadas, com leitura visual do volume final obtido, permitindo determinação da densidade aparente (g cm^{-3}). Para cada processo avaliado, realizou-se a determinação da medida em triplicata.

O volume real (V_r) das amostras desidratadas pelos diferentes processos foi determinado no Laboratório Termodinâmica e Extração Supercrítica (LATESC), por meio da técnica de picnometria em gás hélio, com o uso do equipamento Accu Pyc II 1340 da Micromeritics. A técnica determina o volume real da amostra, por meio da variação de pressão do gás no interior de uma câmara de volume conhecido e tem como princípio de deslocamento de fluido de Arquimedes para determinar o volume. O

fluido deslocado é um gás que pode penetrar nos poros mais finos para garantir a máxima precisão. O gás hélio é utilizado por possuir comportamento de gás ideal e pequena dimensão atômica, que garante a penetração do gás em pequenos poros (MICHAILIDIS et al., 2008). O equipamento de gás hélio é constituído por duas câmaras com volumes conhecidos: a câmara de expansão e a câmara onde se coloca a amostra, ambas unidas por uma válvula de expansão. A amostra colocada na câmara é desgaseificada, antes do início da análise, por meio de repetidas purgas com o gás até que sejam removidas as impurezas e umidade que possam estar presentes na amostra. Ao atingir a pressão atmosférica, ocorre o fechamento automático da válvula de expansão, mantendo a câmara de expansão isolada. A câmara que contém a amostra é pressurizada até a pressão P_1 e a válvula de expansão é aberta automaticamente, reduzindo a pressão (P_2). Dessa forma, o volume do sólido pode ser calculado a partir da Equação 11 (SMITH, 1996):

$$P_1 (V_a - V_s) = P_2 (V_a - V_s) V_e \quad (11)$$

onde P_1 é pressão (mbar) da câmara que contém a amostra, P_2 consiste na pressão (mbar) após a redução da pressão na câmara que contém a amostra V_a é o volume da câmara da amostra (m^3), V_s é o volume do sólido (m^3), V_e é o volume da câmara de expansão (m^3).

O equipamento fornece os valores da média \pm desvio padrão de dez medidas realizadas ao longo do experimento, fornecendo resultados de volume real e densidade real, para cada amostra analisada.

3.6.3.3 Determinação da porosidade (\mathcal{E})

Para as amostras *in natura* e branqueada a porosidade (\mathcal{E}) foi determinada utilizando os valores do volume real (V_r) e volume aparente (V_{ap}), utilizando a Equação 12:

$$\varepsilon [\%] = \left[1 - \frac{V_r}{V_{ap}} \right] \cdot 100 \quad (12)$$

Para as amostras desidratadas, a porosidade foi determinada no Laboratório Termodinâmica e Extração Supercrítica (LATESC), por meio da técnica de picnometria em gás hélio (equipamento Accu Pyc II 1340, Micromeritics). O equipamento realiza dez leituras de cada amostra, emitindo o resultado da média da porosidade.

3.6.4 Determinação da capacidade de reidratação

Amostras de cenoura desidratadas pelos diferentes processos e diferentes condições (KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD) foram avaliadas em relação à capacidade de reidratação. A determinação consistiu na imersão das amostras em água destilada na proporção 1:100 (razão de massa de amostra:massa de água destilada). Visando a avaliação da influência da temperatura da água nos parâmetros de reidratação da amostra, utilizou-se água em diferentes temperaturas (25 °C e 80 °C), com determinação da massa da amostra em diferentes intervalos de tempo de imersão, permitindo o cálculo da Razão de Reidratação (RR), conforme Equação 13, e construção da cinética de reidratação das amostras. Para a reidratação a 25 °C, a massa das amostras foi determinada nos intervalos de tempo de 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360 e 420 min; na temperatura de reidratação a 80 °C, a massa das amostras foi determinada nos intervalos de tempo de 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300 min. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

$$RR = \frac{m_r}{m_d} \quad (13)$$

em que RR representa a Razão de reidratação (adimensional), m_r a massa da amostra reidratada (g) e m_d a massa da amostra desidratada (g).

3.6.4.1 Ajuste matemático da curva de reidratação

Com a finalidade de representar matematicamente as curvas de reidratação das amostras de cenoura desidratadas, foram avaliados os modelos matemáticos Exponencial, de Peleg (PELEG, 1988) e de Weibull.

O modelo Exponencial (Equação 14) representa o modelo cinético de primeira ordem:

$$RR = RR_e - (RR_e - 1)exp(-kt) \quad (14)$$

em que qual RR representa a Razão de Reidratação (adimensional) no tempo t (min), RR_e representa a razão de reidratação na saturação (adimensional) e k é a constante cinética (min^{-1}).

O modelo proposto por Peleg (1988) consiste em uma equação não exponencial que possui três parâmetros (Equação 15):

$$RR = \left(RR_e - \frac{1}{k_2} \right) + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (15)$$

onde k_1 (min^{-1}) consiste em uma constante cinética, com dimensão de tempo e k_2 ($^{-1}$) representa um parâmetro adimensional, que possui relação com a máxima razão de reidratação.

Por fim, o modelo de Weibull, dado pela Equação 16, se escreve como:

$$RR = RR_e + (1 - RR_e) \exp \left[-\frac{t}{\beta} \right]^\alpha \quad (16)$$

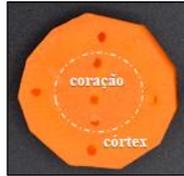
em que α representa o parâmetro de forma do modelo Weibull (adimensional) e β representa um parâmetro de escala, com dimensão de tempo (min).

Os ajustes dos modelos aos dados experimentais da razão de reidratação foram realizados com o *software* OriginPro (8.5.0, OriginLab Corporation). O coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE) foram usados para comparação das capacidades de ajuste dos modelos matemáticos.

3.6.5 Determinação das propriedades mecânicas de textura

As amostras *in natura*, branqueadas e desidratadas, que foram submetidas à reidratação em diferentes temperaturas (25 °C e 80 °C) foram submetidas ao teste de perfuração (*puncture test*), para determinação de propriedades mecânicas. Os testes foram realizados em texturômetro (Stable Micro System, Modelo – TA-XT2-Plus, Reino Unido) acoplado a uma célula de carga de 25 kg, com sonda (*probe*) cilíndrica de 2 mm de diâmetro. Os parâmetros do texturômetro foram ajustados para velocidade de teste de 3 mm s⁻¹ e penetração de 70% da espessura inicial das amostras. Para cada processo de secagem, foram utilizadas 6 amostras, sendo realizadas 7 perfurações em diferentes regiões da amostra (3 perfurações no xilema e 4 perfurações no floema), conforme mostrado na Figura 8. Em cada perfuração realizada, determinava-se a força máxima (N) empregada para perfurar a amostra. As análises foram realizadas em triplicata.

Figura 10. Ilustração da localização das perfurações realizadas nas amostras *in natura*, branqueada e nas amostras desidratadas pelos processos KMFD, KMFD-VD e VD após serem submetidas a reidratação nas temperaturas de 25 °C e 80 °C.



Fonte: O autor.

No caso das amostras desidratadas pelos diferentes processos abordados neste estudo, devido à sensibilidade do equipamento e à alta compactação das amostras desidratadas, não foi possível realizar os testes utilizando os mesmos parâmetros utilizados nas amostras *in natura*, branqueada e reidratadas.

3.6.6 Determinação do teor de carotenoides totais (CAR)

As amostras *in natura* e branqueada foram submetidas à liofilização para retirada da umidade, por um período de 36 horas a -60 °C, sob vácuo. Os teores de carotenoides totais presentes nas amostras de cenoura *in natura*, branqueada e desidratadas (KMFD-70, KMFD-VD-70, VD), foram determinados com metodologia descrita por Rodriguez-Amaya (2001). A metodologia consiste na extração exaustiva do analito com acetona, seguida de partição com éter de petróleo, diversas lavagens com água destilada e posterior diluição do analito em éter de petróleo, permitindo a leitura em espectrofotômetro (HITACHI, U2900, China), com comprimento de onda (λ) fixado em 450 nm. Éter de petróleo foi utilizado como branco. O conteúdo de carotenoides totais ($\mu\text{g g}^{-1}$), em base seca, foi calculado de acordo com a Equação 17:

$$CAR = \frac{Abs \cdot V \cdot 10^4}{A_{1\text{ cm}}^{1\%} \cdot m} \quad (17)$$

em que V representa o volume de diluição utilizado (mL), Abs representa a máxima absorvância medida, $A_{1\text{ cm}}^{1\%}$ representa a absorvância para o carotenoide predominante em éter de petróleo (β -caroteno, 2592) e m representa a massa da amostra (g). A análise foi realizada em triplicata, em três dias diferentes.

3.6.7 Determinação da medida instrumental de cor

As medidas de cor das amostras de cenoura *in natura*, branqueada, desidratadas (KMFD, KMFD-VD, VD) e amostras desidratadas que foram reidratadas foram realizadas com uma câmera fotográfica (Nikon D5500, Nikon Corporation, Japão), usando aplicativo do *software* ImageJ 1.51j8 (*National Institute of Health*, EUA), para conversão dos dados para o sistema CIELAB. Nesse sistema, organizado em coordenadas cartesianas, conforme ilustrado na Figura 11, o eixo “L*” indica luminosidade e a tendência da amostra para o valor o preto (valores tendendo a 0) e branco (valores tendendo a 100); o eixo “a*” indica a tendência para verde (-a*) e vermelho (+a*); o eixo “b*” indica a tendência para amarelo (+b*) e azul (-b*). A leitura foi realizada sobre a superfície das amostras, sendo sete leituras realizadas em diferentes regiões de cada amostra, de oito amostras do mesmo lote. A análise foi realizada em duplicata.

Figura 11. Escala de cor CIELAB.



Fonte: Hunterlab (1996).

Os resultados referentes à alteração de cor total foram calculados com base no parâmetro ΔE^* , que tem como referência a amostra *in natura* (L_0 , a_0 , b_0), sendo determinado de acordo com a Equação 18:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (18)$$

3.6.8 Análise estatística

Os dados experimentais obtidos nas análises de umidade em base seca (X_{bs}) das amostras *in natura*, branqueada e desidratadas pelos diferentes processos; tempo de processo; atividade de água das amostras desidratadas; textura; massa específica aparente; porosidade;

carotenoides totais e cor foram analisados estatisticamente com o programa *Statistica 7.0* (StatSoft, Tulsa, Estados Unidos), por meio da análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey, com intervalo de confiança de 95 % ($p \leq 0,05$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

Os valores médios \pm desvio padrão das umidades (b.s.) das amostras *in natura* e branqueadas estão dadas nas Tabela 3. Observa-se que a umidade em base seca (Xbs) das amostras *in natura* variou de 8,1 g g⁻¹ a 10,2 g g⁻¹, enquanto a atividade de água foi de $0,995 \pm 0,001$. Hiranvarachat, Suvarnakuta e Devahastin (2008) utilizaram amostras de cenoura *in natura* cuja umidade variou de 9 a 11 g g⁻¹ (b.s.). Lozano, Rotstein e Urbicain (1980) ao avaliarem a umidade de amostras de cenouras *in natura*, encontraram umidade média (b.s.) de 7,6 g g⁻¹. Variações da umidade no mesmo lote de amostras e entre estudos diferentes são associadas à época da colheita e condições armazenamento e transporte.

Tabela 3. Valores da média \pm desvio padrão das umidades em base seca (Xbs) das amostras de cenoura (*Daucus carota L.*) *in natura* e branqueadas.

Secagem	Xbs (g g ⁻¹)	
	<i>In natura</i>	Branqueada
KMFD-60	9,628 \pm 0,101 ^b	11,973 \pm 1,261 ^b
KMFD-70	10,185 \pm 0,952 ^b	12,907 \pm 1,878 ^b
KMFD-VD-60	8,071 \pm 0,453 ^a	8,982 \pm 0,556 ^a
KMFD-VD-70	8,254 \pm 0,565 ^a	9,898 \pm 0,761 ^a
VD	8,875 \pm 0,449 ^a	9,466 \pm 0,819 ^a

Fonte: O autor.

^{a-d}: Médias na mesma coluna com diferentes letras representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$).

A Tabela 3 mostra que as amostras absorveram de 17 a 27% de água na etapa de branqueamento, aumentando a umidade e a atividade de água ($0,998 \pm 0,001$). A etapa de branqueamento, importante na desidratação de hortaliças, promove o amolecimento dos tecidos, favorecendo a saída do oxigênio e a entrada de água nos poros. Górnicki e Kaleta (2007) avaliaram diferentes métodos de branqueamento de cenouras em cubos, antes da secagem convectiva. Os autores reportaram

que o branqueamento causa alterações nas propriedades físicas de tecidos, como a destruição das membranas celulares, além de modificarem a porosidade do alimento, favorecendo a entrada e saída de água e vapor, favorecendo o processo de secagem. Variações na proporção de água absorvida pela amostra podem ocorrer devido aos diferentes estágios de desenvolvimento das amostras. Também foi observada diferença morfológica entre as amostras do mesmo lote, conforme ilustrado na Figura 12. Algumas amostras continham o diâmetro do “coração” (xilema secundário) maior que o diâmetro do córtex (floema secundário), que estão relacionados ao estágio de desenvolvimento das amostras e podem alterar a capacidade de absorção de água pelas amostras (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010; NAHIMANA; ZHANG, 2011).

Figura 12. Variação morfológica encontrada em amostras de cenoura (*Daucus carota L.*) *in natura*.



Fonte: O autor.

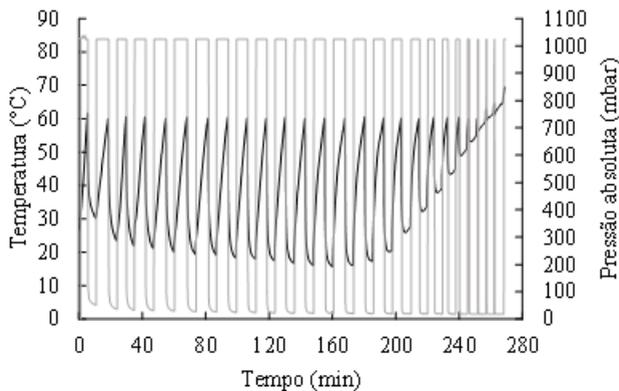
4.2 CINÉTICA DE SECAGEM

As Figuras 13, 14 e 15 apresentam as evoluções temporais (min) da temperatura (°C) das amostras e da pressão (mbar) no interior do tambor rotativo, durante a secagem de cenouras pelos processos KMFD-60 (Figura 13), KMFD-VD-60 (Figura 14), e VD (Figura 15), respectivamente. Tratam-se de figuras representativas dos processos de secagem. Perfis de temperatura e pressão dos processos KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD estão apresentados no Apêndice A. Nos processos KMFD e KMFD-VD, o pulso de vácuo reduz as temperaturas das amostras até a temperatura de saturação da água ($\approx 23\text{ }^{\circ}\text{C}$) na pressão final do pulso de vácuo ($\approx 35\text{ mbar}$). Isso ocorre devido ao alto teor de água livre das amostras branqueadas.

As pequenas oscilações de temperatura e de pressão observadas nas Figuras 14 e 15 são atribuídas à retirada do tambor para pesagem. Durante esse período ocorre entrada de ar no sistema, devido a imperfeições no sistema de vedação, reduzindo o vácuo no interior do tambor (leve aumento da pressão interna). Esse aumento de pressão impacta proporcionalmente as temperaturas das amostras.

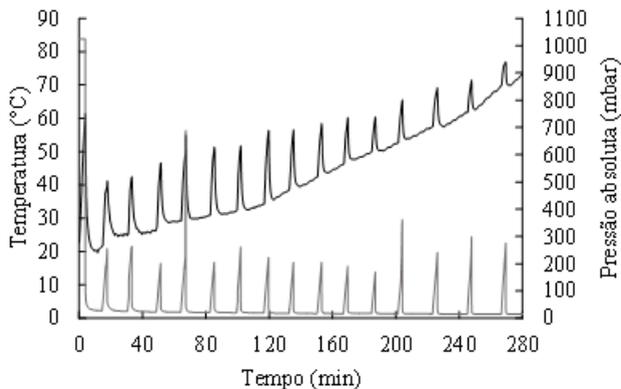
Ao longo do processo de secagem, com a redução das umidades das amostras, o efeito do pulso de vácuo diminuiu. Isso pode ser explicado pela redução da pressão de vapor da água remanescente no produto. Ao final do processo, a temperatura das amostras se aproxima da temperatura do banho termostático, que é aproximadamente 90 °C. Durante o processo de secagem, a pressão atingiu valores cada vez menores, devido à redução da umidade das amostras. No início do processo de secagem, devido ao alto conteúdo de água das amostras, a pressão de vapor no interior do sistema é maior, levando à uma maior evaporação. No KMFD a saída da umidade do alimento é favorecida pela formação de uma estrutura porosa mais aberta. O emprego de maior temperatura também favoreceu a evaporação da água.

Figura 13. Evolução temporal da temperatura (°C) e pressão (mbar) das amostras de cenoura desidratadas pelo processo KMFD-60.



Fonte: O autor.

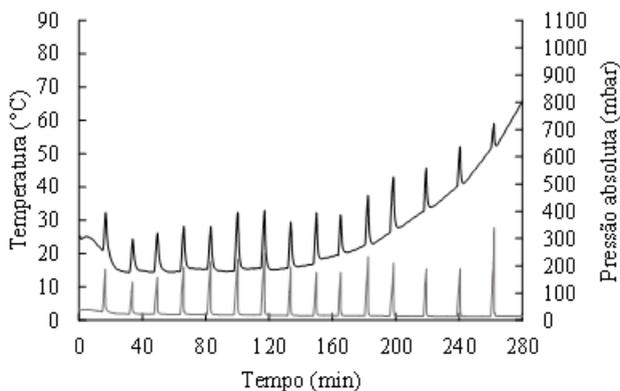
Figura 14. Evolução temporal da temperatura (°C) e pressão (mbar) das amostras de cenoura desidratadas pelo processo KMFD-VD-60.



Fonte: O autor.

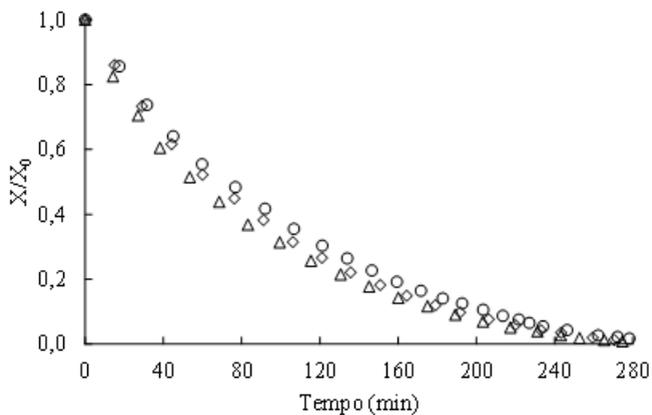
As Figuras 16, 17 e 18 apresentam triplicatas das curvas de secagem adimensionalizadas dos processos KMFD-60, KMFD-VD-60 e VD. Tratam-se de figuras representativas dos processos de secagem. Curvas de secagem relativas aos processos KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD estão apresentadas no Apêndice B. De acordo com as figuras, é possível observar que os processos apresentam boa reprodutibilidade das curvas de secagem adimensionalizadas.

Figura 15. Evolução temporal da temperatura (°C) e pressão (mbar) das amostras de cenoura desidratadas pelo processo VD.



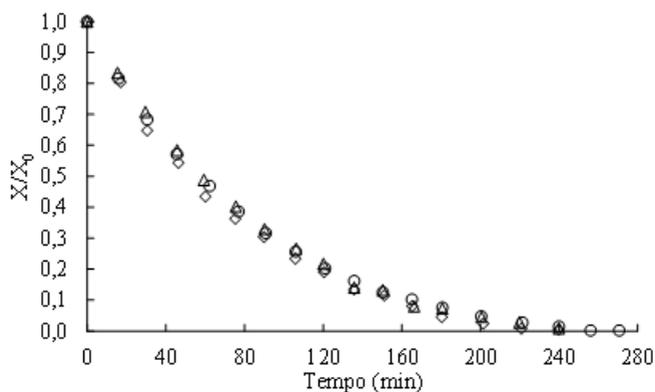
Fonte: O autor.

Figura 16. Evolução temporal da triplicata da umidade em base seca (X_b) das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo KMFD-60.



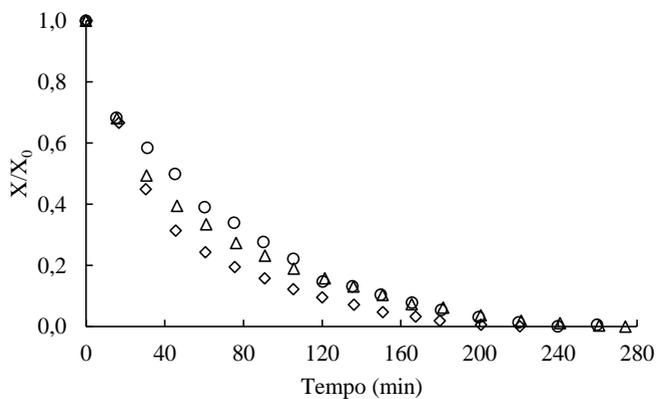
Fonte: O autor.

Figura 17. Evolução temporal da triplicata da umidade em base seca (X_b s) das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo KMFD-VD-60.



Fonte: O autor.

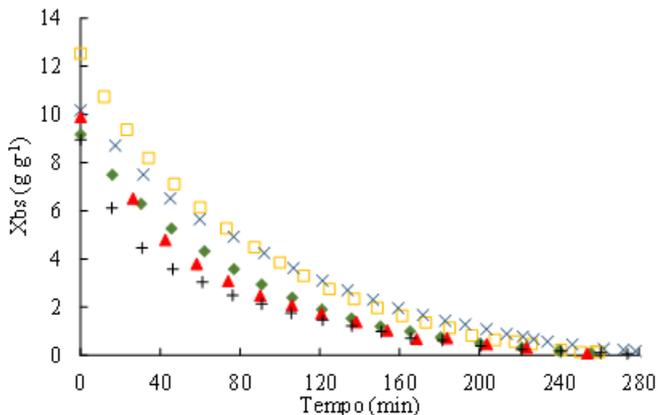
Figura 18. Evolução temporal da triplicata da umidade em base seca (X_b s) das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo VD.



Fonte: O autor.

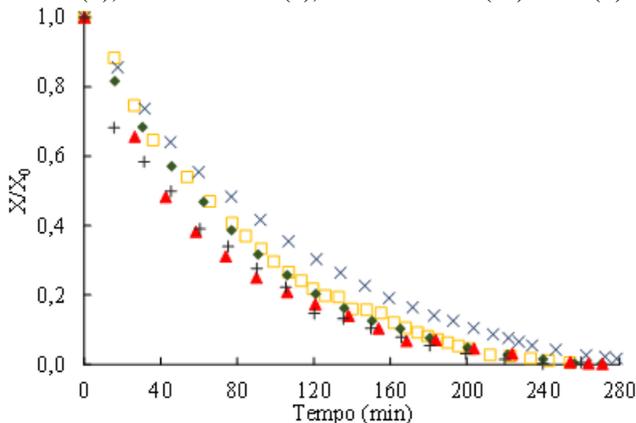
Nas Figuras 19 e 20 estão apresentadas as médias obtidas da triplicata das curvas de secagem, para os diferentes processos avaliados.

Figura 19. Evolução temporal da média da umidade em base seca das amostras de cenouras branqueadas desidratadas durante os processos de secagem KMFD-60 (□), KMFD-70 (×), KMFD-VD-60 (◆), KMFD-VD-70 (▲) e VD (+).



Fonte: O autor.

Figura 20. Evolução temporal da umidade adimensional das amostras de cenouras branqueadas desidratadas durante os processos de secagem KMFD-60 (□), KMFD-70 (×), KMFD-VD-60 (◆), KMFD-VD-70 (▲) e VD (+).

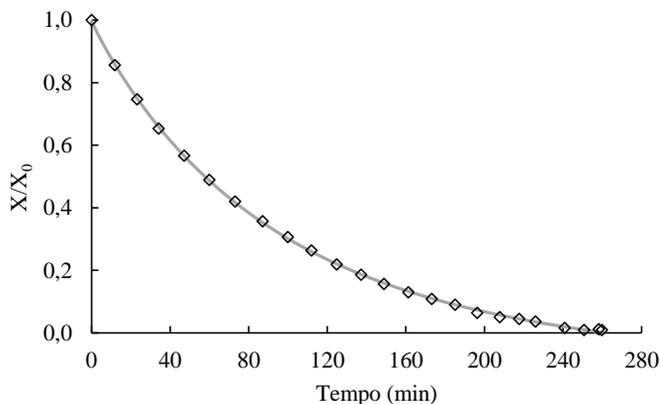


Fonte: O autor.

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam, de forma representativa, os ajustes dos dados da curva de secagem adimensionalizadas das amostras de cenoura ao modelo de Midilli, para os processos KMFD-60, KMFD-VD-60 e VD. As figuras ajustadas pelo modelo de Midilli, referente às secagens KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD,

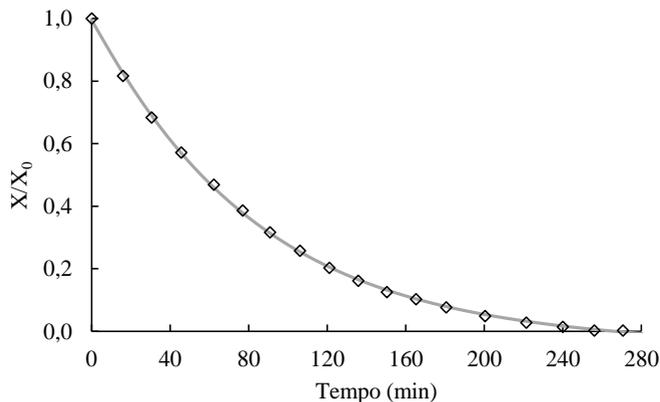
estão apresentadas no Apêndice D. As curvas de secagem experimentais adimensionalizadas foram ajustadas pelos modelos empíricos de Lewis, Page, Page Modificado I e Midilli.

Figura 21. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem KMFD-60. Experimental (\diamond), Midilli (—).



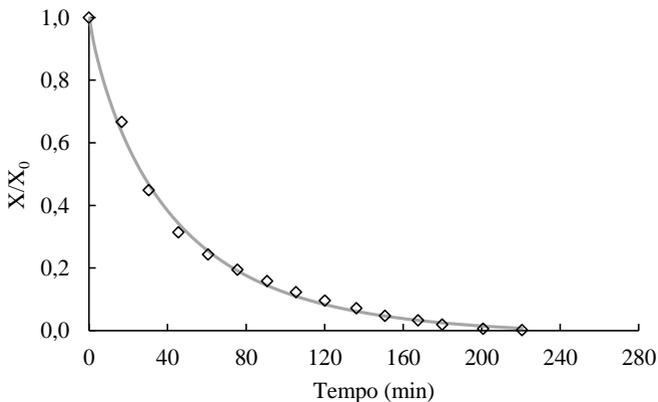
Fonte: O autor.

Figura 22. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem KMFD-VD-60. Experimental (\diamond), Midilli (—).



Fonte: O autor.

Figura 23. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem VD. Experimental (\diamond), Midilli (—).



Fonte: O autor.

A Tabela 4 apresenta os resultados das médias \pm desvio padrão das triplicatas obtidas dos valores do tempo final de secagem (t_f), umidade em base seca ($X_{bs_{final}}$) e atividade de água ($a_{w_{final}}$) das amostras desidratadas, além do número de ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo empregado nas secagens KMFD e KMFD-VD. As amostras desidratadas pelos processos KMFD-VD-60 e VD apresentaram tempos de secagem, conteúdo de umidade final (b.s.) e a_w relativamente próximos. No entanto, o processo KMFD-VD-70 apresentou menores valores de X_{bs} e a_w .

A taxa de secagem é definida como a quantidade de água removida de um produto por unidade de tempo. As Figuras 24, 25 e 26 apresentam as triplicatas das curvas representativas das taxas de secagem adimensionais (min^{-1}) nos processos KMFD-60, KMFD-VD-60 e VD. As triplicatas das taxas de secagem ($\text{g g}^{-1} \text{min}^{-1}$), assim como as triplicatas das taxas de secagem adimensionalizadas dos outros processos avaliados estão apresentadas no Apêndice C. As curvas com diferentes marcadores representam as triplicatas dos experimentos.

Tabela 4. Teor da média da umidade em base seca ($X_{bs\text{final}}$), atividade de água (a_w), tempo de secagem (t_f) e números de ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo (KMFD) para as diferentes condições de secagem avaliadas.

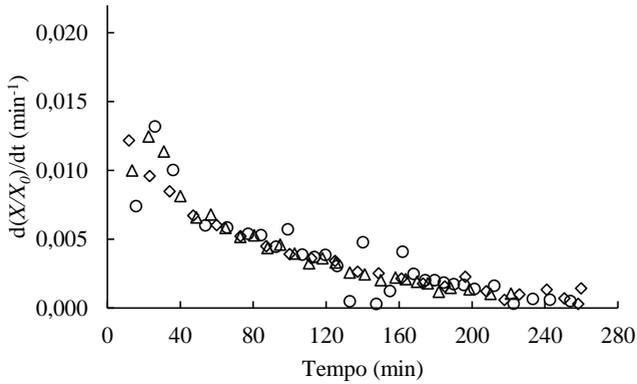
Secagem	t_f (min)	$X_{bs\text{final}}$ (g g ⁻¹)	a_w	KMFD
KMFD-60	267,8±8,4 ^{a,b}	0,08±0,03 ^a	0,513±0,07 ^{a,b}	38
KMFD-70	282,7±4,9 ^b	0,06±0,02 ^{a,b}	0,530±0,09 ^a	34
KMFD-VD-60	252,9±27,5 ^{a,b}	0,08±0,01 ^a	0,554±0,04 ^a	1
KMFD-VD-70	228,1±29,4 ^a	0,05±0,01 ^b	0,459±0,03 ^b	1
VD	244,9±31,8 ^{a,b}	0,07±0,01 ^{a,b}	0,528±0,02 ^a	-

Fonte: O autor.

^{a-d}: Médias na mesma coluna com diferentes letras representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$).

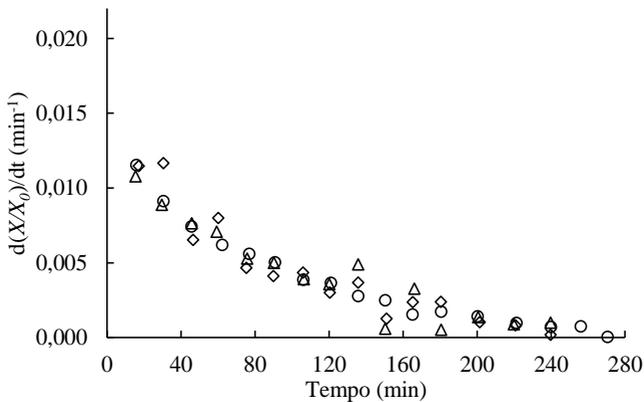
Não foi possível detectar o período de acomodação, devido ao rápido aquecimento das amostras à baixa temperatura de ebulição nas condições de vácuo. As curvas indicam que a secagem das amostras de cenoura ocorreu à taxa decrescente, sem um período de secagem à taxa constante. No período de secagem à taxa decrescente, a migração da água do interior do alimento até a superfície, que envolve fenômenos de transporte por difusão e capilaridade, é inferior à taxa de evaporação na superfície. Os resultados observados corroboram com diversos estudos sobre secagem de cenouras (MULET et al., 1987; PRAKASH; JHA; DATTA, 2004; KUMAR; SARKAR; SHARMA, 2012; DOYMAZ, 2017). O processo de secagem KMFD-VD-70 mostrou a maior taxa de secagem, devido à maior temperatura da amostra antes da despressurização do sistema. Com o avanço do processo, a taxa de evaporação diminuiu. Resultado semelhante foi observado em outros estudos de secagem convectiva de cenouras (ZIELINSKA; MARKOWSKI, 2010; DOYMAZ, 2017).

Figura 24. Evolução temporal da taxa de secagem adimensional, $d(X/X_0)/dt$ das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo KMFD-60.



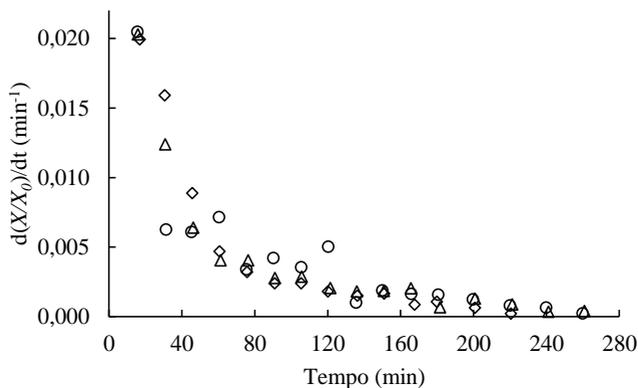
Fonte: O autor.

Figura 25. Evolução temporal da taxa de secagem adimensional, $d(X/X_0)/dt$ das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo KMFD-VD-60.



Fonte: O autor.

Figura 26. Evolução temporal da taxa de secagem adimensional, $d(X/X_0)/dt$ das amostras de cenouras branqueadas ao longo do processo VD.

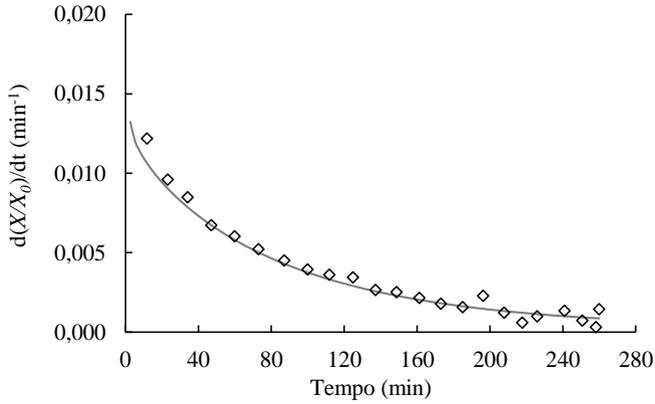


Fonte: O autor.

As Figuras 27, 28 e 29 apresentam, de forma representativa, os ajustes dos dados da curva de secagem adimensionalizadas das amostras de cenoura ao modelo de Midilli, para os processos KMFD-60, KMFD-VD-60 e VD. As figuras ajustadas pelo modelo de Midilli, referente às secagens KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD, estão apresentadas no Apêndice D.

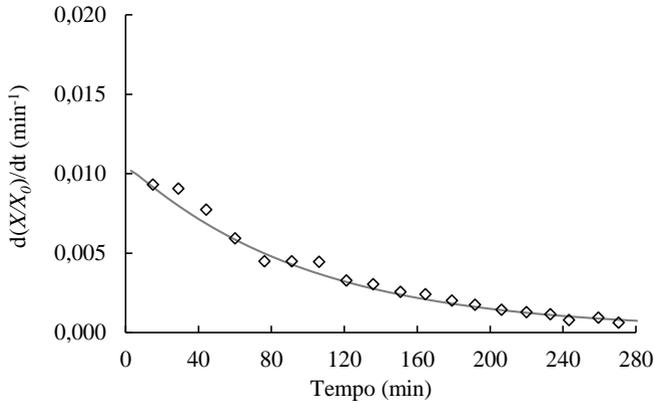
A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos dos ajustes realizados, o coeficiente de correlação (R^2) e RMSE. O modelo de Midilli foi o que apresentou os melhores valores de R^2 ($\geq 0,996$) e RMSE.

Figura 27. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem KMFD-60. Experimental (\diamond), Midilli (—).



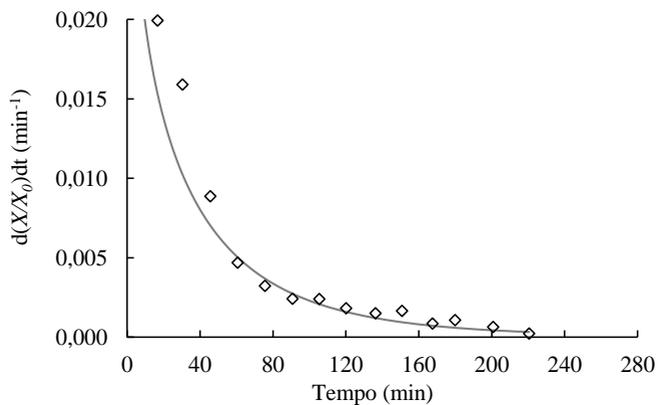
Fonte: O autor.

Figura 28. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem KMFD-VD-60. Experimental (\diamond), Midilli (—).



Fonte: O autor.

Figura 29. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem VD. Experimental (\diamond), Midilli (—).



Fonte: O autor.

Tabela 5. Parâmetros e desempenho dos modelos de Lewis, Page, Page Modificado I e Midilli ajustados aos dados experimentais da secagem pelos processos KMFD, KMFD-VD, VD.

Modelo	Parâmetros	KMFD-60	KMFD-70	KMFD-VD-60	KMFD-VD-70	VD
Lewis	$k_L (s^{-1})$	$0,0125 \pm 0,0002$	$0,0114 \pm 0,0002$	$0,0131 \pm 0,0002$	$0,0182 \pm 0,0003$	$0,0230 \pm 0,0007$
	R^2	0,9959	0,9946	0,9957	0,9984	0,9920
	RMSE	0,0081	0,0101	0,0067	0,0022	0,0089
Page	$k_P (s^{-n})$	$0,0095 \pm 0,0010$	$0,0070 \pm 0,0007$	$0,0084 \pm 0,0009$	$0,0163 \pm 0,0017$	$0,0393 \pm 0,0046$
	n	$1,0592 \pm 0,0241$	$1,1048 \pm 0,0229$	$1,0983 \pm 0,0239$	$1,0252 \pm 0,0250$	$0,8667 \pm 0,0288$
	R^2	0,9968	0,9974	0,9980	0,9984	0,9968
	RMSE	0,0060	0,0064	0,0030	0,0020	0,0034
Page Modificado I	$k_{PM} (s)$	$73,2466 \pm 0,6693$	$90,1300 \pm 1,1125$	$77,9149 \pm 0,9245$	$55,3360 \pm 0,7945$	$41,8441 \pm 0,9637$
	n	$1,1088 \pm 0,0182$	$1,1048 \pm 0,0229$	$1,0988 \pm 0,0224$	$1,0251 \pm 0,02386$	$0,8663 \pm 0,0277$
	R^2	0,9975	0,9974	0,9980	0,9984	0,9968
	RMSE	0,0049	0,0045	0,0030	0,0020	0,0034
Midilli	A	$0,9970 \pm 0,0042$	$1,0000 \pm 0,00490$	$1,0065 \pm 0,0061$	$1,0081 \pm 0,0113$	$1,0053 \pm 0,017$
	B (s^{-1})	$-0,0003 \pm 0,0000$	$-0,0003 \pm 0,0000$	$-0,0002 \pm 0,0000$	$-0,0001 \pm 0,0000$	$-0,0001 \pm 0,0000$
	$k_M (s^{-n})$	$0,0139 \pm 0,0007$	$0,0100 \pm 0,00068$	$0,0137 \pm 0,0008$	$0,0193 \pm 0,0027$	$0,0431 \pm 0,0074$
	n	$0,9541 \pm 0,0119$	$1,0063 \pm 0,0147$	$0,9870 \pm 0,0180$	$0,9807 \pm 0,0333$	$0,8415 \pm 0,0434$
	R^2	0,9998	0,9997	0,9996	0,99867	0,9964
	RMSE	0,0004	0,0005	0,0006	0,0014	0,0032

Fonte: O autor.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DESIDRATADAS

4.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As Figuras 30 e 31 apresentam as micrografias, com ampliação de 100 vezes, das fraturas e superfícies, das regiões do xilema e floema – respectivamente - das amostras de cenouras desidratadas pelos diferentes processos de secagem KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD. Na Figura 30, é possível observar que em todos os processos realizados, as amostras fraturadas apresentaram estrutura majoritariamente compacta, apresentando alta densidade e poros com formatos irregulares. Também é possível observar as regiões do xilema e floema. Os processos de secagem avaliados alteraram significativamente a estrutura das amostras, tornando-as compactas e pouco porosas, com distribuição não uniforme dos poros. Essas características observadas nas amostras desidratadas a vácuo também foram observadas por Devahastin et al. (2004), que avaliaram o comportamento de cenouras desidratadas a vácuo e por vapor superaquecido à baixa pressão.

Em relação às micrografias das superfícies das amostras desidratadas, na Figura 31 é possível observar que, em todos os processos avaliados, na região do xilema as amostras apresentaram certa rugosidade, ao contrário da região do floema, que apresentou uniformidade na estrutura.

Figura 30. Imagem MEV, com ampliação de 100 vezes, da fratura do xilema (1) e floema (2) das amostras desidratadas pelos processos KMFD-60 (a), KMFD-70 (b), KMFD-VD-60 (c), KMFD-VD-70 (d) e VD (e).

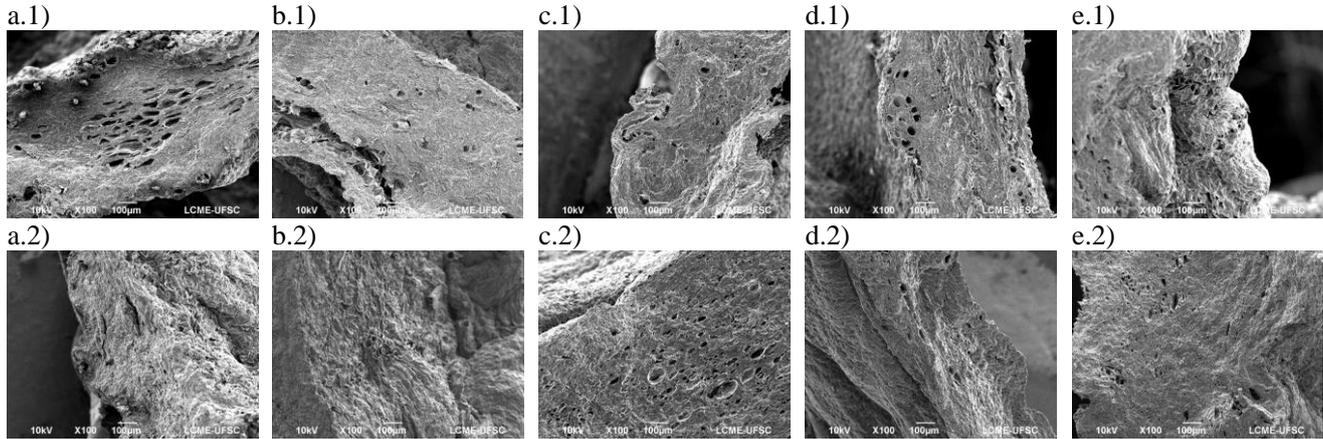
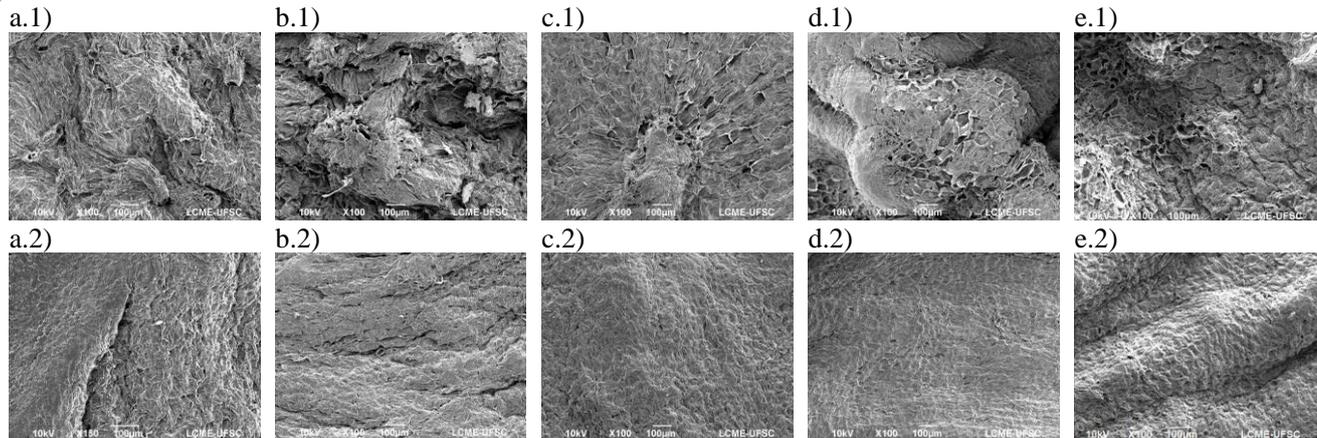


Figura 31. Imagem MEV, com ampliação de 100 vezes, da superfície do xilema secundário das amostras desidratadas pelos processos KMFD-60 (a), KMFD-70 (b), KMFD-VD-60 (c), KMFD-VD-70 (d) e VD (e).



Fonte: O autor.

4.3.2 Massa específica aparente e porosidade

Os valores das médias \pm desvio padrão das massas específicas aparentes (ρ_{ap}) e porosidades (ϵ) das amostras de cenoura *in natura*, branqueadas e desidratadas pelos processos KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD, estão apresentados na Tabela 6. Os valores de ρ_{ap} e ϵ das amostras de cenoura *in natura* foram $1,14 \pm 0,02 \text{ g cm}^{-3}$ e $3,79 \pm 2,01\%$, respectivamente. O valor obtido para a massa específica da amostra de cenoura *in natura* foi maior que o valor da massa específica da água, devido ao alto teor de umidade da amostra *in natura*. O valor da porosidade obtido pode ser justificado pela estrutura compacta da cenoura. No caso da amostra de cenoura branqueada, observou-se redução no valor da massa específica ($1,06 \pm 0,03 \text{ g cm}^{-3}$), em relação à amostra *in natura*, que pode ser justificado pela entrada de água na estrutura da amostra durante o branqueamento.

Quando comparado à amostra *in natura*, a amostra branqueada sofreu aumento no valor da porosidade ($8,21 \pm 3,20\%$). Segundo Lewicki (1998), o aquecimento durante o branqueamento, além de reduzir a turgescência celular, promove alterações complexas na matriz de polissacarídeos da parede celular. No caso da cenoura, ocorre um amolecimento da rede de fibrilas de celulose, causando sua separação ao longo da lamela média. Sendo assim, a separação da rede fibrilar de celulose pode favorecer o aumento no número de poros da amostra de cenoura, justificando o aumento da porosidade. As amostras desidratadas não apresentaram diferença significativa nos resultados das massas específicas, que variou de 1,47 a $1,52 \text{ g cm}^{-3}$. Os resultados obtidos foram semelhantes aos resultados reportados por Devahastin et al. (2004), que avaliaram o mesmo parâmetro para amostras de cenouras desidratadas a vácuo nas temperaturas de 60 – 80 °C, obtendo valores que variaram $1,42 - 1,43 \text{ g cm}^{-3}$.

Em relação à porosidade, as amostras desidratadas apresentaram porosidade superior às das amostras *in natura* e branqueadas, sendo que a amostra VD apresentou o maior valor de porosidade entre as amostras desidratadas. As amostras secas sob vácuo contínuo apresentaram valores de porosidade próximos aos valores encontrados para as amostras que foram desidratadas com sucessivas aplicações de CAPV.

Tabela 6. Valores da média \pm desvio padrão de densidade aparente (ρ_{ap}) e porosidade (ϵ) das amostras de cenoura *in natura*, branqueada e desidratadas.

Processo	ρ_{ap} (g cm ⁻³)	ϵ (%)
<i>In natura</i>	1,136 \pm 0,022 ^b	3,786 \pm 2,013 ^c
Branqueada	1,058 \pm 0,028 ^b	8,206 \pm 3,195 ^c
KMFD-60	1,474 \pm 0,000 ^a	42,219 \pm 0,000 ^{a, b}
KMFD-70	1,485 \pm 0,000 ^a	37,051 \pm 0,000 ^{a a}
KMFD-VD-60	1,481 \pm 0,000 ^a	50,588 \pm 0,000 ^{a b}
KMFD-VD-70	1,516 \pm 0,001 ^a	47,743 \pm 0,000 ^{a, b}
VD	1,479 \pm 0,000 ^a	65,591 \pm 0,000 ^{a d}

Fonte: O autor.

^{a-d}: Médias na mesma coluna com diferentes letras representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$).

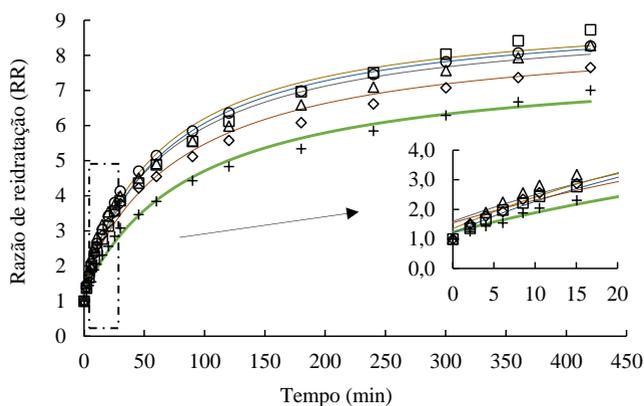
4.3.3 Capacidade de reidratação

As curvas de reidratação das amostras KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD estão apresentadas nas Figura 32 e 33. Na temperatura de 25 °C, como demonstrado na Figura 32, no início do processo e após 480 minutos de reidratação, foram observados diferentes valores na Razão de Reidratação (RR), para os processos avaliados. Na temperatura de 25 °C, o processo KMFD-VD-70 apresentou maior RR (8,7) e reidratou mais rapidamente, no início do processo. No processo de reidratação a 80 °C, a amostra VD obteve maior RR ao final do processo de reidratação (RR = 8,3); no entanto, amostras KMFD-70 reidrataram mais rapidamente. A reidratação de amostras desidratadas em temperaturas elevadas compromete a absorção da água pelos capilares, afetando sua estrutura. Lin, Durance e Scaman (1998) avaliaram a reidratação de amostras de fatias de cenouras, com 4 mm de espessura, desidratadas por diferentes processos (micro-ondas, convecção, liofilização) e submetidas à reidratação a 25 °C e 100 °C, durante 180 e 10 minutos, respectivamente. Os autores observaram que quanto maior o dano causado à estrutura do produto, maiores os resultados obtidos para a razão de reidratação e para a taxa de reidratação. Segundo Ratti (2009), a qualidade dos alimentos reidratados é afetado diretamente pelas condições de secagem, bem como pelo processo de reidratação utilizado. O processo de reidratação de alimentos desidratados envolve complexos mecanismos, dentre eles: absorção de água pelo produto desidratado, inchaço e lixiviação de compostos solúveis em água. Ocorrem mecanismos físicos, tal como embebição de água, difusão

interna, convecção na superfície e poros e amolecimento da matriz sólida (MARABI et al., 2003).

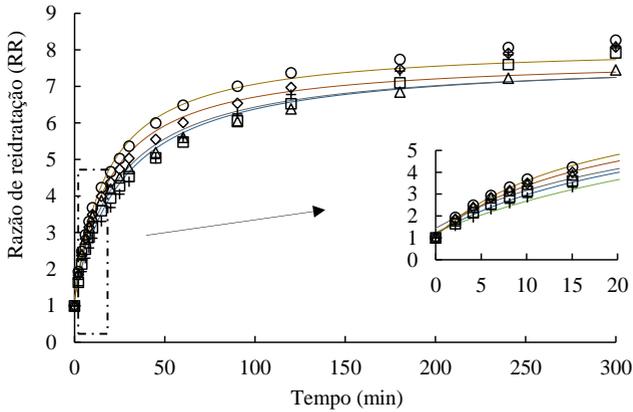
Os dados experimentais da RR das amostras de cenouras desidratadas submetidas à reidratação, nas temperaturas de 25 °C e 80 °C, foram ajustados com os modelos Exponencial, de Peleg e Weibull, conforme demonstrado na Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9. O modelo de Peleg apresentou bons ajustes ($R^2 \geq 0,99$ e $RMSE \geq 0,17$), uma vez que o modelo utiliza maior número de parâmetros para descrever os fenômenos que envolvem o processo de reidratação e, assim, indicam boa tendência para descrever a cinética de reidratação.

Figura 32. Razão de reidratação a 25 °C das amostras de cenouras desidratadas em função do tempo. Dados experimentais: KMFD-60 (+); KMFD-70 (□); KMFD-VD-60 (◇); KMFD-VD-70 (Δ) e VD (o). O modelo de Peleg ajustado às curvas está representado pela linha contínua.



Fonte: O autor.

Figura 33. Razão de reidratação a 80 °C das amostras de cenouras desidratadas em função do tempo. Dados experimentais: KMFD-60 (+); KMFD-70 (□); KMFD-VD-60 (◇); KMFD-VD-70 (Δ) e VD (o). O modelo de Peleg ajustado às curvas está representado pela linha contínua.



Fonte: O autor.

Tabela 7. Parâmetros do Modelo Exponencial ajustados aos dados experimentais da razão de reidratação das amostras de cenouras desidratadas por diferentes processos.

	KMFD-60	KMFD-70	KMFD-VD-60	KMFD-VD-70	VD	
	<i>Parâmetros 25 °C</i>					
	RRe (-)	6,422 ± 0,185	8,068 ± 0,225	6,890 ± 0,217	7,383 ± 0,245	7,661 ± 0,181
	k (min ⁻¹)	0,013 ± 0,001	0,014 ± 0,001	0,018 ± 0,002	0,019 ± 0,002	0,019 ± 0,002
	R ²	0,971	0,972	0,952	0,945	0,974
Modelo	RMSE	0,112	0,183	0,215	0,286	0,152
Exponencial	<i>Parâmetros 80 °C</i>					
	RRe (-)	7,554 ± 0,197	7,112 ± 0,236	7,334 ± 0,220	6,665 ± 0,212	7,601 ± 0,190
	k (min ⁻¹)	0,024 ± 0,002	0,030 ± 0,003	0,037 ± 0,004	0,042 ± 0,005	0,041 ± 0,004
	R ²	0,974	0,949	0,952	0,938	0,965
	RMSE	0,133	0,229	0,228	0,228	0,180

Fonte: O autor.

Tabela 8. Parâmetros do Modelo de Peleg ajustados aos dados experimentais da razão de reidratação das amostras de cenouras desidratadas por diferentes processos.

	KMFD-60	KMFD-70	KMFD-VD-60	KMFD-VD-70	VD	
Modelo de Peleg	<i>Parâmetros 25 °C</i>					
	RRe (-)	7,868 ± 0,219	9,277 ± 0,019	8,757 ± 0,044	9,163 ± 0,248	9,345 ± 0,126
	k ₁ (min)	13,698 ± 1,273	8,179 ± 0,533	11,581 ± 0,924	9,745 ± 0,0808	8,091 ± 0,420
	k ₂ (1)	0,151 ± 0,004	0,124 ± 0,002	0,139 ± 0,002	0,132 ± 0,002	0,125 ± 0,001
	R ²	0,992	0,992	0,985	0,986	0,995
	RMSE	0,032	0,051	0,065	0,075	0,032
	<i>Parâmetros 80 °C</i>					
	RRe (-)	8,953 ± 0,132	7,825 ± 0,201	8,396 ± 0,152	7,765 ± 0,150	8,590 ± 0,095
	k ₁ (min)	5,757 ± 0,336	4,165 ± 0,434	3,802 ± 0,359	4,222 ± 0,389	3,098 ± 0,190
	k ₂ (1)	0,130 ± 0,002	0,152 ± 0,004	0,142 ± 0,003	0,158 ± 0,003	0,137 ± 0,002
	R ²	0,997	0,985	0,992	0,987	0,996
	RMSE	0,017	0,069	0,039	0,047	0,018

Fonte: O autor.

Tabela 9. Parâmetros do Modelo de Weibull ajustados aos dados experimentais da razão de reidratação das amostras de cenouras desidratadas por diferentes processos.

	KMFD-60	KMFD-70	KMFD-VD-60	KMFD-VD-70	VD	
<i>Parâmetros 25 °C</i>						
	RR _e (-)	6,423 ± 0,322	8,070 ± 0,360	6,892 ± 0,292	7,384 ± 0,323	7,661 ± 0,187
	α (-)	1,03x10 ² ± 3,33x10 ³	1,00x10 ³ ± 2,97x10 ³	5,5x10 ³ ± 1,87x10 ³	5,49x10 ³ ± 1,95x10 ³	-1,10x10 ¹² ± 1,12x10 ¹²
	β(min)	8,08x10 ⁶ ± 2,61x10 ⁶	7,14x10 ⁴ ± 2,12x10 ⁴	3,01x10 ⁵ ± 1,02x10 ⁵	2,86x10 ⁵ ± 1,01x10 ⁵	-5,90x10 ¹³ ± 6,22x10 ¹³
Modelo de Weibull	R ²	0,969	0,970	0,941	0,973	0,973
	RMSE	0,119	0,194	0,304	0,161	0,161
<i>Parâmetros 80 °C</i>						
	RR _e (-)	7,559 ± 0,205	7,114 ± 0,307	7,336 ± 0,275	6,667 ± 0,261	7,559 ± 0,197
	α (-)	2,59x10 ¹² ± 3,01x10 ¹²	898,58 ± 376,46	766,36 ± 283,62	1,48x10 ³ ± 5,14x10 ³	1,16x10 ¹² ± 3,28x10 ¹²
	β(min)	1,09x10 ¹⁴ ± 1,22x10 ¹⁴	2,99x10 ⁴ ± 1,01x10 ⁴	2,06x10 ⁴ ± 6,53x10 ⁴	3,51x10 ⁴ ± 1,22x10 ⁴	2,85x10 ¹³ ± 8,10x10 ¹³
	R ²	0,973	0,945	0,948	0,934	0,962
	RMSE	0,143	0,246	0,245	0,244	0,193

Fonte: O autor.

4.3.4 Ensaios mecânicos de textura

A Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de perfuração (*puncture test*) realizados nas amostras *in natura*, branqueadas e desidratadas pelos processos diferentes processos KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD, após reidratação a 25 °C e 80 °C. Não foi possível realizar o teste de perfuração nas amostras desidratadas, devido à sua estrutura compacta. Lin, Durance e Scaman (1998) realizaram análise de perfuração em amostras de cenouras após desidratação, com o objetivo de avaliar a dureza da superfície. Para realizarem esse teste, os autores posicionaram as amostras, individualmente, no centro de um prato, com abertura de 9,3 mm de diâmetro, destinado a esse fim, viabilizando a realização do teste.

De acordo com os resultados obtidos, nas duas temperaturas de reidratação avaliadas, observou-se que a região do xilema necessitou menor força de perfuração quando comparada à região do floema. A região do xilema é predominantemente vascular e possui mais fibras que a região do floema, que possui mais tecidos parenquimáticos, o que torna a estrutura xilemática mais porosa, facilitando a migração de água nos processos de secagem (NAHIMANA; ZHANG, 2011). O processo de reidratação a 25 °C resultou em força de perfuração próxima aos encontrados nas amostras que foram submetidas ao branqueamento (Tabela 10). As amostras KMFD-VD-60 e VD mostraram menores valores de força máxima de perfuração.

No processo de reidratação a 80 °C, por outro lado, os resultados do teste de perfuração resultaram em valores significativamente menores aos resultados obtidos no teste realizado nas amostras *in natura* e branqueada, como demonstrado na Tabela 11. Esse comportamento pode ser justificado pela alta temperatura empregada na análise de reidratação, que pode ter amolecido os tecidos. Sila et al. (2005), ao avaliarem a textura de cenouras submetidas à diferentes temperaturas de cozimento (60 °C e 90 °C) durante 40 minutos, observaram não haver diferença em relação à textura das amostras tratadas pelos diferentes métodos, atribuindo a degradação da textura à perda da integridade das membranas celulares, que resultou na perda de turgescência.

Tabela 10. Média \pm desvio padrão da força máxima aplicada (N) nos ensaios de perfuração para as amostras *in natura*, branqueada e nas amostras desidratadas pelos processos KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD após serem submetidas a reidratação na temperatura de 25 °C, durante 7 horas.

Amostra	Xilema (N)	Floema (N)
<i>In natura</i>	11,333 \pm 1,415 ^d	12,316 \pm 1,257 ^e
Branqueada	8,255 \pm 1,759 ^a	10,618 \pm 2,002 ^{c,d}
KMFD-60	8,340 \pm 1,638 ^{a,b,c}	9,927 \pm 2,675 ^{a,b,c}
KMFD-70	8,288 \pm 1,632 ^{a,b,c}	9,705 \pm 1,240 ^{a,b,c,d}
KMFD-VD-60	7,634 \pm 2,808 ^{a,b}	7,866 \pm 2,543 ^{a,b}
KMFD-VD-70	9,745 \pm 1,494 ^{a,b,c,d}	10,476 \pm 1,726 ^{b,c,d,e}
VD	8,119 \pm 2,625 ^{a,b}	7,819 \pm 1,731 ^{a,b}

Fonte: O autor.

^{a-e}: Médias na mesma coluna com diferentes letras representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$).

Tabela 11. Média \pm desvio padrão da força máxima aplicada (N) nos ensaios de perfuração para as amostras *in natura*, branqueada e nas amostras desidratadas pelos processos KMFD-60, KMFD-70, KMFD-VD-60, KMFD-VD-70 e VD após serem submetidas a reidratação na temperatura de 80 °C, durante 5 horas.

Amostra	Xilema (N)	Floema (N)
<i>In natura</i>	11,333 \pm 1,415 ^c	12,316 \pm 1,257 ^f
Branqueada	8,255 \pm 1,759 ^c	10,618 \pm 2,002 ^d
KMFD-60	1,826 \pm 1,616 ^{a,b}	3,278 \pm 1,689 ^{a,b}
KMFD-70	1,264 \pm 2,335 ^a	2,329 \pm 2,715 ^{a,b}
KMFD-VD-60	2,941 \pm 1,112 ^{a,b}	3,600 \pm 1,787 ^b
KMFD-VD-70	2,518 \pm 2,763 ^{a,b}	3,543 \pm 1,963 ^b
VD	1,709 \pm 2,604 ^{a,b}	2,846 \pm 2,764 ^{a,b}

Fonte: O autor.

^{a-f}: Médias na mesma coluna com diferentes letras representam diferenças significativas ($p \leq 0,05$).

Para esses autores, a qualidade da textura de cenoura está relacionada aos polímeros que constituem a parede celular, que é composta principalmente de fibras de celulose insolúveis misturadas a uma matriz de hemicelulose e pectina. Comportamento semelhante também foi observado por Belović et al. (2014), ao avaliarem a textura de amostras de cenoura tratadas termicamente (100 °C durante 5, 10, 15 e 20 min), por meio de ensaios de perfuração. Os autores observaram que a partir do 15º minuto de tratamento, as diferenças nos valores de textura não eram significativas.

4.3.5 Carotenoides totais

O conteúdo de carotenoides totais das amostras de cenoura *in natura*, branqueadas e desidratadas pelos diferentes processos, estão apresentados na Tabela 12. Visando estimar a concentração do analito nas condições mais extremas de temperatura de secagem (70 °C), optou-se pela quantificação dos pigmentos somente para as amostras desidratadas pelos processos KMFD-70, KMFD-VD-70 e VD. A concentração de carotenoides totais encontrada para as amostras *in natura* foi de $623,2 \pm 55,8 \mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca, ou $71,44 \pm 4,8 \mu\text{g g}^{-1}$ de massa total. Alguns estudos reportaram resultados próximos aos valores encontrados, com valores próximos a $77 \mu\text{g g}^{-1}$ de massa total (NOWACKA; WEDZIK, 2016) e $764 \mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca (CUI; SHI-YING; SUN, 2004). No entanto, há estudos que mostram grande variação de concentração desse analito em amostras de cenoura *in natura* (HEINONEN, 1990; BAO; CHANG, 1994; LIMA et al., 2004; SAINI; KEUM, 2018). A composição de carotenoides em alimentos pode variar em função da variedade e cultivar; parte da planta avaliada; variação do local e do clima de produção; colheita e manuseio pós-colheita; processamento e armazenamento. Cabe ressaltar que erros analíticos durante a amostragem, extração e quantificação, somada à instabilidade do pigmento, faz com que resultados encontrados na literatura tenham que ser analisados com cuidado (RODRIGUEZ-AMAYA, 2001).

As amostras de cenoura branqueada apresentaram concentração de $766,95 \mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca, valor 23,1% maior do que o encontrado para a amostra *in natura*. Segundo Cui, Shi-Ying e Sun (2004) o branqueamento pode aumentar o valor de carotenoides nas análises, uma vez que esse tratamento térmico causa danos celulares e nas propriedades mecânicas do tecido vegetal, aumentando a permeabilidade da membrana citoplasmática, favorecendo a entrada de água e saída de gases e outros compostos voláteis, além de desnaturar proteínas – associadas ou não aos carotenoides – e favorecer a lixiviação de açúcares, vitaminas hidrossolúveis, sais e minerais. Para Arya et al. (1979), a etapa de branqueamento permite aumentar a estabilidade dos carotenoides devido à inativação de enzimas, como peroxidase e lipoxidase, responsáveis pela catalisação de pigmentos e compostos lipídicos.

Em relação à concentração de carotenoides encontrada nas amostras desidratadas pelo processo KMFD-70, KMFD-VD-70, observa-se retenção de 11% e 17%, respectivamente, em relação à amostra *in natura*. Comparando as amostras desidratadas, a amostra KMFD-70 apresentou menor concentração de carotenoides totais, do que as amostras

desidratadas pelos processos KMFD-VD-70 e VD. As amostras desidratadas pelo processo KMFD-VD-70, apresentaram maior concentração do pigmento, em relação ao processo KMFD-70 e menor concentração quando comparada ao processo VD. Esse comportamento já era esperado, uma vez que as amostras desidratadas pelo processo KMFD-70 foram submetidas à sucessivos ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo, em que o sistema atingia a pressão atmosférica, sendo aquecido até 70 °C para que o sistema fosse despressurizado novamente; que favorece a degradação dos compostos, tanto pela presença do oxigênio, quanto pela exposição a maiores temperaturas.

Tabela 12. Concentração de carotenoides totais ($\mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca) das amostras *in natura*, branqueada e desidratadas pelos processos KMFD-70, KMFD-VD-70 e VD.

Amostra	CAR ($\mu\text{g g}^{-1}$ massa seca)
<i>In natura</i>	623,16 \pm 55,72 ^c
Branqueada	766,95 \pm 69,65 ^d
KMFD-70	69,24 \pm 14,74 ^b
KMFD-VD-70	107,88 \pm 5,094 ^{a,b}
VD	213,60 \pm 5,42 ^b

Fonte: O autor.

^{a-d}: Médias na mesma coluna com diferentes letras representam diferença significativa ($p \leq 0,05$).

A maior retenção de carotenoides em relação à amostra *in natura* foi encontrada nas amostras desidratadas a vácuo (VD), que reteve aproximadamente 34% do pigmento no alimento processado, quando comparada à amostra *in natura*. Já a amostra KMFD-VD-70 apresentou valor intermediário em relação aos outros processos de desidratação avaliados. Os pigmentos carotenoides são sucessíveis às reações oxidativas durante o processamento, que favorecem a perda de coloração e atividade biológica. Há formação de compostos voláteis com odores desejáveis e indesejáveis nos alimentos. A oxidação dos carotenoides pode ser provocada por diversos fatores, dentre eles a exposição à luz e ao oxigênio (RODRIGUEZ-AMAYA, 2001).

Embora o vácuo tenha sido empregado durante todos os processos de secagem avaliados, perdas de carotenoides podem ter ocorrido durante as etapas de preparo da amostra, em que foram realizados descascamento e corte das amostras e na etapa de branqueamento. Esforços foram realizados para realização da extração dos carotenoides no menor tempo possível, em ambiente climatizado e sem incidência de luz. No entanto,

perdas do pigmento podem ter ocorrido em virtude da impossibilidade de eliminar a presença completa de oxigênio e luz.

4.3.6 Análise instrumental de cor

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos das análises de cor (L^* , a^* e b^*) e as diferenças totais de cor (ΔE^*) entre as amostras de cenoura branqueadas, reidratadas e *in natura*. As amostras de cenouras desidratadas apresentaram parâmetros de cor diferentes. As amostras submetidas ao processo de secagem KMFD ficaram mais escuras, com menores valores de coloração vermelha e amarela, quando comparadas às amostras submetidas ao processo KMFD-VD e VD. A temperatura de processo não teve influência sobre os parâmetros de cor.

As amostras submetidas ao processo de secagem a vácuo contínuo (VD) não diferiram significativamente das amostras produzidas pelos outros processos de secagem. A aparência mais escura das amostras KMFD, quando comparadas às amostras produzidas pelos processos KMFD-VD e VD, pode estar relacionada à maior exposição a temperaturas elevadas durante os ciclos de aquecimento antes da aplicação dos pulsos de vácuo.

Os resultados obtidos estão de acordo com resultados observados por Lin, Durance e Scaman (1998) e Doymaz (2017). Segundo Lin, Durance e Scaman (1998), o parâmetro de luminosidade é afetado pelo emprego de maiores temperaturas. Doymaz (2017) atribui esse comportamento às reações oxidativas que ocorreriam durante a secagem, sendo potencializadas pelo aumento da temperatura empregada no processo. Lin, Durance e Scaman (1998), no caso de alimentos com alto conteúdo de carotenoides, o parâmetro que corresponde à coloração vermelha – parâmetro a^* – possui relação com o conteúdo de carotenoides e sua redução pode estar associada à degradação deste pigmento, enquanto que a redução no parâmetro b^* , pode estar associado à degradação do cromoplasto e consequente solubilização do pigmento na membrana lipídica. Para Doymaz (2017), por outro lado, o aumento nos valores de a^* e redução nos valores de b^* podem ser atribuídos ao aumento da temperatura, que causa a perda de coloração amarela, associada à degradação dos carotenoides e à reação de *Maillard*, com formação de pigmentos escuros.

Após reidratação, observou-se que quanto maior a temperatura utilizada para reidratar as amostras, maiores valores de luminosidade e menor tendência à coloração vermelha eram observadas. Não foram

observadas diferenças no parâmetro b^* , entre as temperaturas de reidratação avaliadas,

Em relação à variação de coloração em relação à amostra *in natura* (ΔE^*), observa-se que a secagem VD foi o processo que provocou menor alteração de cor e a secagem KMF-70 foi a que gerou maior alteração a coloração das amostras de forma significativa. A menor exposição a temperaturas elevadas e a maiores concentrações de oxigênio são as explicações mais plausíveis para explicar as menores variações observadas nas amostras desidratadas pelo processo VD.

Tabela 13. Valores da média \pm desvio padrão das medidas dos parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) e variação de cor em relação à amostra *in natura* (ΔE^*) das amostras de cenoura branqueada, desidratadas pelos diferentes processos, reidratadas em diferentes temperaturas (25 °C e 80 °C).

Amostra	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
<i>In natura</i>	69,88 \pm 2,32 ^c	35,29 \pm 3,08 ^d	57,14 \pm 1,37 ^e	-
Branqueada	67,59 \pm 2,21 ^a	39,23 \pm 2,81 ^f	62,24 \pm 1,27 ^f	7,83 \pm 1,94 ^{a,d}
Desidratadas				
KMFD-60	69,50 \pm 1,19 ^{b,c}	37,15 \pm 0,31 ^{d,e,f}	48,22 \pm 1,37 ^b	7,67 \pm 2,22 ^{a,d}
KMFD-70	67,94 \pm 0,38 ^{a,b}	36,24 \pm 1,22 ^{d,e}	46,28 \pm 1,27 ^a	9,11 \pm 1,72 ^{a,b,d,e}
KMFD-VD-60	70,31 \pm 0,83 ^c	37,47 \pm 3,08 ^{d,e,f}	51,05 \pm 0,61 ^c	5,43 \pm 2,42 ^{a,b}
KMFD-VD-70	69,40 \pm 0,69 ^{b,c}	37,44 \pm 2,81 ^{d,e,f}	51,62 \pm 0,27 ^c	4,35 \pm 3,80 ^{a,b}
VD	70,75 \pm 0,89 ^c	37,71 \pm 0,54 ^{e,f}	52,19 \pm 0,10 ^c	4,96 \pm 2,42 ^{a,b}
Reidratadas a 25 °C				
KMFD-60	71,23 \pm 1,99 ^{b,c,d}	34,91 \pm 1,42 ^{c,d,e,f}	56,97 \pm 5,47 ^e	3,61 \pm 2,22 ^c
KMFD-70	72,21 \pm 3,57 ^{c,d}	33,75 \pm 5,23 ^{b,c,d,e}	51,44 \pm 5,42 ^{b,c,d}	5,56 \pm 1,72 ^{a,b}
KMFD-VD-60	70,91 \pm 6,79 ^{a,b,c,d}	35,74 \pm 2,74 ^{d,e,f}	57,23 \pm 4,14 ^e	3,66 \pm 1,80 ^c
KMFD-VD-70	70,74 \pm 3,26 ^{a,b,c,d}	35,99 \pm 4,81 ^{d,e,f}	56,40 \pm 2,50 ^e	2,64 \pm 3,80 ^c
VD	69,14 \pm 2,32 ^{a,b,c}	37,87 \pm 4,43 ^{d,e,f}	56,89 \pm 2,44 ^e	2,55 \pm 2,74 ^c
Reidratadas a 80 °C				
KMFD-60	74,28 \pm 2,97 ^d	28,28 \pm 1,57 ^a	57,65 \pm 2,62 ^e	10,45 \pm 1,48 ^{a,b,c,d,e}
KMFD-70	74,61 \pm 1,32 ^d	27,41 \pm 2,01 ^a	55,29 \pm 1,17 ^{d,e}	10,57 \pm 1,66 ^{a,b,c,d,e}
KMFD-VD-60	74,11 \pm 2,33 ^d	29,14 \pm 1,53 ^{a,b}	57,55 \pm 1,81 ^e	9,32 \pm 1,42 ^{a,b,d,e}
KMFD-VD-70	73,70 \pm 1,16 ^d	28,50 \pm 1,04 ^{a,b}	55,38 \pm 1,85 ^{d,e}	9,44 \pm 2,19 ^{a,b,d,e}
VD	73,48 \pm 2,29 ^d	30,04 \pm 1,98 ^{a,b,c}	56,37 \pm 2,50 ^e	7,20 \pm 3,09 ^{a,d}

Fonte: O autor.

^{a-f} - Médias na mesma coluna, com diferentes letras, representam diferença significativa ($p \leq 0,05$).

5 CONCLUSÃO

O secador a vácuo com tambor rotativo desenvolvido neste estudo permite desidratar branqueadas de várias maneiras. O equipamento é eficiente na produção de cenouras desidratadas com baixa umidade final e $a_w < 0,6$. As cinéticas de secagem mostraram que todo o processo ocorre com taxa de secagem decrescente. O processo com somente um pulso de vácuo a 70 °C (KMFD-VD-70) apresentou menor tempo de secagem (228 min), para umidade final de 0,05 g g⁻¹. Os produtos desidratados por todos os processos apresentam estrutura compacta, com alta densidade e poros irregulares, indicando que os processos de secagem avaliados alteraram significativamente a estrutura das fatias de cenoura branqueadas.

As amostras reidratadas a 25 °C durante 7 horas apresentaram razão de reidratação próximas às amostras reidratadas a 80 °C, durante 5 horas. Em ambas as temperaturas avaliadas, observou-se reidratação mais rápida nos primeiros minutos do processo. A amostra KMFD-VD-70 reidratada a 25 °C foi a que apresentou textura mais próxima da textura da amostra controle (branqueada). Amostras reidratadas a 80 °C apresentaram texturas próximas entre si.

O processo de secagem realizado sob vácuo contínuo (VD) foi capaz reter os carotenoides totais com maior concentração, uma vez que operou com menores temperaturas e menor concentração de oxigênio. Resultado análogo foi observado para a variação da cor das amostras.

Considerando o exposto, conclui-se que o equipamento desenvolvido é versátil e permite produzir cenouras desidratadas com propriedades atrativas, de fácil reidratação. Estudos para avaliar a ampliação da escala de produção e os custos operacionais são necessários. O equipamento é de fácil operação e pode ser usado para desidratar outros produtos, contribuindo deste modo para a agregação de valor aos produtos da agricultura de pequena escala.

6 REFERÊNCIAS

AOAC. Association of Official Analytical Chemists. **Official Methods of Analysis**, 18th. Gaithersburg, Maryland, 2005.

ARAÚJO, P. M. **Estudo da desidratção osmótica da cenoura (*Daucus carota L.*) em fatias**. 2010. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

ARÉVALO-PINEDO, A.; MURR, F. E. X. Influência da pressão, temperatura e pré-tratamentos na secagem a vácuo de cenoura e abóbora. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 4, 636-643 p., 2005.

ARYA, S. S.; NATESAN, V.; PARIHAR, D. B.; VIJAYARAGHAVAN, P. K. Stability of carotenoids in dehydrated carrots. **Journal Food Technology**. v. 14, 579-586 p., 1979.

BAO, B.; CHANG, K. C. Carrot juice color, carotenoids, and nonstarchy polysaccharides as affected by processing conditions. **Journal of Food Science**, v. 59, 1155-1158 p., 1994.

BAYSAL, T.; ICIER, F.; ERSUS, S.; YILDIZ, H. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. **European Food Research and Technology**, v. 218, 68-73 p., 2003.

BELOVIĆ, M.; PESTORIĆ, M.; MASTILOVIĆ, J. KEVREŠAN, Ž. **Journal on Processing and Energy in Agriculture**, v. 1, 36-39 p., 2014.

BERK, Z. **Food Process Engineering and Technology**. 3. ed. Israel: Academic Press, 2018.

BÉTTEGA, R.; ROJ. G.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Comparison of carrot (*Daucus carota*) drying in microwave and in vacuum microwave. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, 403-412 p., 2014.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2005. 785 p.

CUI, Z.W.; SHI-YING, X.; SUN, D.W. Effect of microwave-vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of chinese chive leaves. **Drying Technology**, v. 3, 563 – 575 p., 2004.

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

DEVAHASTIN, S.; SUVARNAKUTA, P.; SOPONRONNARIT, S.; MUJUMDAR, A. S. A comparative study of low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. **Drying Technology**, v. 22, 1845-1867 p., 2004.

DOYMAZ, I. Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot- air drying of carrot slices. **Heat Mass Transfer**, v. 53, 25–35 p., 2017

EMBRAPA (Brasil). Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Coleção plantar: Cenoura**. Brasília: Embrapa, 1999. 77 p.

EVANGELISTA, J. **Tecnologia de Alimentos**. 2. ed. São Paulo: Atheneu, 2008. 652 p.

FAO (Org.). **Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention**. Roma: [s.1], 2011. 37 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

FRANCO, B. D. G. M.; LANDGRAF, M. **Microbiologia dos Alimentos**, São Paulo: Editora Atheneu, 2008.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**, 3 ed., New Jersey: Inc. Prentice Hall, 1993.

GÓRNICKI, K.; KALETA, A. Drying curve modelling of blanched carrot cubes under natural convection condition. **Journal of Food Engineering**, v. 82, 160-170 p., 2007.

GHOSH, P.K; AGRAWAL, Y.C; JAYAS, D.S; KUMBHAR, B.K.
Mass transfer kinetics model of osmotic dehydration of carrots.
Transactions of ASAE, v. 4, 1179-1185 p., 2004.

HEINONEN, M. Carotenoids and provitamin A activity of carrot (*Daucus carota L.*) cultivars. **J. Agric. Food Chem.**, v. 38, 609-612 p., 1990.

HIRANVARACHAT, B.; SUVARNAKUTA, P.; DEVAHASTIN, S.
Isomerisation kinetics and antioxidant activities of β -carotene in carrots undergoing different drying techniques and conditions. **Food Chemistry**, v. 107, 1538-1546 p., 2008.

HUNTERLAB. CIE L* a* b* color scale. **Applications note**, v. 8, 1996. Disponível em: <http://www.hunterlab.com>. Acesso em: 17 jun, 2018.

JANGAM, S. V.; LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Drying of Foods, Vegetables and Fruits: Volume 1**. [s.i.]: [s.i.], 2010. 232 p.

JAY, J. M. **Modern food microbiology**, 4 ed., New York: Van Nostrand Reinhold, 38-62 p., 1992.

KOKRIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v. 15, 2441-2458 p., 1997.

KUMAR, N.; SARKAR, B. C.; SHARMA, H. K. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. **J Food Sci Technol**, v. 1, 33-41p., 2012.

LAURINDO, J. B., PORCIUNCULA, B. D. A.; ZOTARELLI, M. F. (2011). Processo de secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) para obtenção de alimentos desidratados crocantes. **Brazilian Patent**, PI 1107173-7.

LEWICKI, P. P. Effect of pre- drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. **International Journal of Food Properties**, v. 1, 1-22 p., 1998.

LIMA, K. S. C.; LIMA, A. S. L.; FREITAS, L. C.; DELLA-MODESTA, R.; GODOY, R. L. O. Efeito de baixas doses de irradiação

nos carotenoides majoritários em cenouras prontas para o consumo.

Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 2, 183-193 p., 2004.

LIN, T. M.; DURANCE, T. D.; SCAMAN, C. H. Characterization of vacuum microwave, air and freeze-dried carrot slices. **Food Research International**, v. 31, 111-117 p., 1998.

LITVIN, S.; MANNHEIM, C.H; MILTZ, J. Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. **Journal of Food Engineering**, v. 36, 103- 111 p., 1998.

LOZANO, J. E., ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M. J. Total porosity and open-pore porosity in the drying of fruits. **Journal of Food Science**, v. 45, 1403–1407 p., 1980.

MARABI, A.; LIVINGS, S.; JACOBSON, M.; SAGUY, I. S. Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. **Eur Food Res Technol**, v. 217, 311–318 p., 2003.

MICHAILIDIS, P. A. et al. Measurement of density, shrinkage and porosity. In: RAHMAN, M. S. **Food Properties Handbook**. 2. ed. S. L.: CRC Press, 2008. Cap. 13. 398-415 p.

MONTEIRO, R. L.; CARCIOFI, B .A. M.; LAURINDO, J. B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. **Journal of Food Engineering**, v.178, 1-11 p., 2016.

MUJUMDAR, A. S. FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF DRYING. In: DEVAHASTIN, S. (Ed.). **Mujumdar's practical guide to industrial drying**. Montreal: Exergex Corporation, 2011.

MULET, A.; ROSSELLÓ, C.; PINÁGA, F.; CARBONELL, J. V.; BERNA, A. Mecanismo y cinética del secado de zanahorias con aire caliente. **Ver. Agroquím. Tecnol. Aliment.**, v. 3, 369-377 p., 1983

MULET, A.; BERNA, A.; BORR, M.; PIÑAGA, F. Effect of air flow rate on carrot drying. **Drying Technology**, v. 2, 245-258 p., 1987.

MURAYAMA, S. **Horticultura**. 2. ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 321 p.

NAHIMANA, H.; ZHANG, M. Shrinkage and color change during microwave vacuum drying of carrot. **Drying Technology**, v. 29, 836–847, p., 2011.

NOWACKA, M.; WEDZIK, M. Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. **Science Direct**, v. 103, 163-171 p., 2016.

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

PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**. v. 53, 1216–1219 p., 1988.

PORCIUNCULA, B. D. A.; SEGURA, L. A.; LAURINDO, J. B. Processes for controlling the structure and texture of dehydrated banana. **Drying Technology**, v. 34. 167-176 p., 2016.

PRAKASH, S.; JHA, S. K.; DATTA, N. Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. **Journal of Food Engineering**, v. 62, 305–313 p., 2004.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 49, 311-319 p., 2001.

RATTI, C. (Ed.). **Advances in food dehydration**. 5. ed. New York: Crc Press, 2009. 468 p. (Contemporary food engineering).

REIS, F. R. (Ed.). **Vacuum drying for extending food shelf life**. Jacarezinho, Pr: Springer, 2014.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. **A guide to carotenoid analysis in foods**. (1sted) ILSI Press, Washington, D. C, 2001.

SAINI, R. K.; KEUM, Y. S. Carotenoid extraction methods: a review of recent developments. **Food Chemistry**, v. 240, 90-103 p., 2018.

SERENO, A. M., SILVA, M. A., MAYOR, L. Determination of particle density and porosity in foods and porous materials with high moisture content. **International Journal of Food Properties**, v. 10, 455–469 p., 2007.

SHARMA, K. D.; KARKI, S.; THAKUR, N. S.; ATTRI, S. Chemical composition, functional properties and processing of carrot - a review. **J Food Sci Technol**, n. 49, 22–32 p., 2012.

SILA, D. N. SMOUT, C.; VU, S. T. ; LOUEY, A. V. ; HENDRICKY, M. Influence of pretreatment conditions on the texture and cell wall components of carrots during thermal processing. **Journal of Food Science**, v. 70, 85–91 p., 2005.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M; HOLLER, F. J. **Analytical chemistry: an introduction**. 6th ed. Philadelphia: Saunders College Publishing, 1994. 25p.

SMITH, D., Characterization of lactose by helium pycnometer. In Stephens, K. (ed.). **The micro report: News and ideas for decision makers**, 2nd. Quarter, v. 7 (2), Micro-metrics Instrument Corporation, USA, 1996.

SONMETE, M. H.; MENGEŞ, H. O.; ERTEKIN, C.; ÖZCAN, M. M. Mathematical modeling of thin layer drying of carrot slices by forced convection. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 11, 629-638 p., 2017.

SPOTO, M. H. F. Desidratação de frutas e hortaliças. In: OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. **Fundamentos de Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Barueri: Manole, 2006. p. 565-603.

SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J.S.; SHENE, C.; CABEZAS, M. J. BRAVO, S. Effect of drying air temperature on drying kinetics parameters and fructan content in *helianthus tuberosus* and *Cichorium intybus*. **Drying Technology**, v. 5, 945-956 p., 2003.

SUTAR, P. P.; PRASAD, S.; GUPTA, D. K. Modeling fluidized bed drying of osmotically dehydrated onion slices and product quality evaluation. **Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 2, 567-572 p., 2007.

SUVARNAKUTA, P.; DEVAHASTIN, S.; MUJUMDAR, A. S. Drying kinetics and β -carotene degradation in carrot undergoing different drying processes. **Journal of Food Science**, v. 70, 520-526 p., 2005.

TACO. **Tabela brasileira de composição de alimentos**. NEPA – Núcleo de estudos e pesquisas em alimentos, Campinas: Flamboyant Ltda., 2011.

TEDERRA, F. T.; ABERA, S.; WORKU, S. Nutritional and sensory properties of solar-dried carrot slices as affected by blanching and osmotic pre-treatments. **International Journal of Food Science and Nutrition Engineering**, v. 5, 24-32 p., 2015.

WANG, L.; SUN, D.-W. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology. **Trends in Food Science & Technology**, v. 12, 174–184 p., 2001.

YONGSAWATDIGUL, J.; GUNASEKARAN, S. Microwave-vacuum drying of cranberries: Part ii. Quality evaluation. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 20, 145-156 p., 1996.

ZIELINSKA, M.; MARKOWSKI, M. Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. **Chemical Engineering and Processing**, v. 49, 212–218 p., 2010.

ZOTARELLI, M. F., PORCIUNCULA, B. D. A., LAURINDO, J. B. A convective multi-flash drying process for producing dehydrated crispy fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 108, 523-531 p., 2012.

APÊNDICE A

Dados do perfil de temperatura e pressão ao longo da cinética de secagem

Figura A.1. Perfil dos valores da média de temperatura (°C) e pressão (mbar), obtidos durante as cinéticas de secagem dos processos KMFD-70.

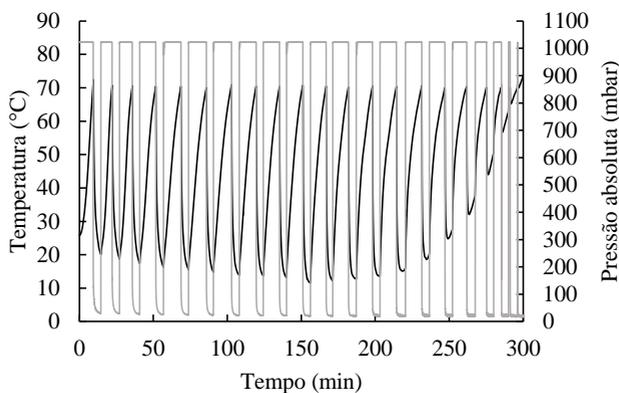
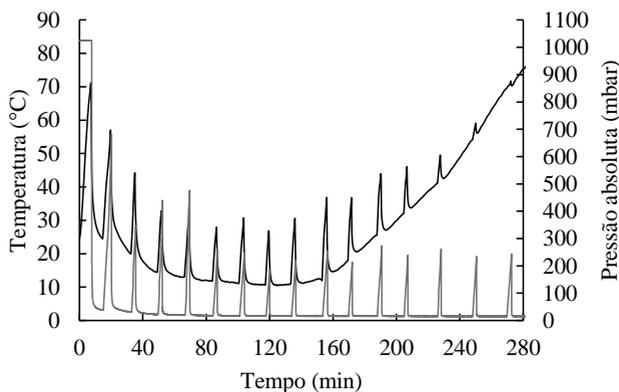


Figura A.2. Perfil dos valores da média de temperatura (°C) e pressão (mbar), obtidos durante as cinéticas de secagem dos processos KMFD-VD-70.

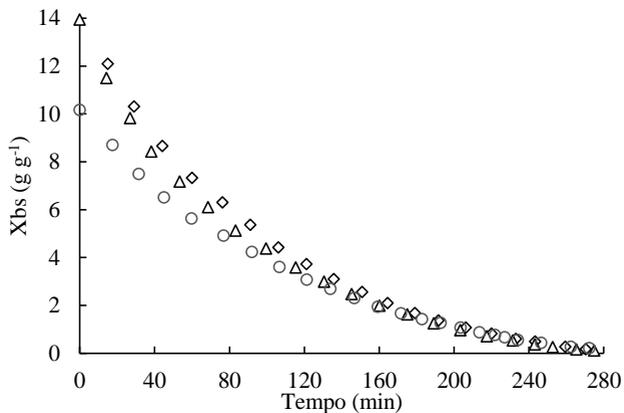


APÊNDICE B

Dados das cinéticas de umidade em base seca e adimensional

Figura B.1. Evolução temporal (min) da X_{bs} (a) e X/X_0 (b) das amostras de cenouras durante a secagem KMFD-70.

a)



b)

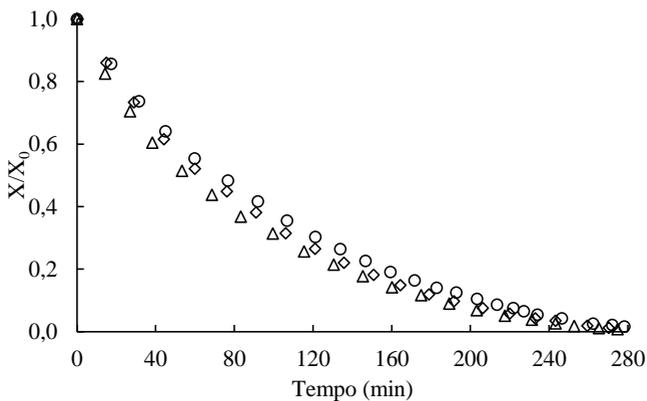
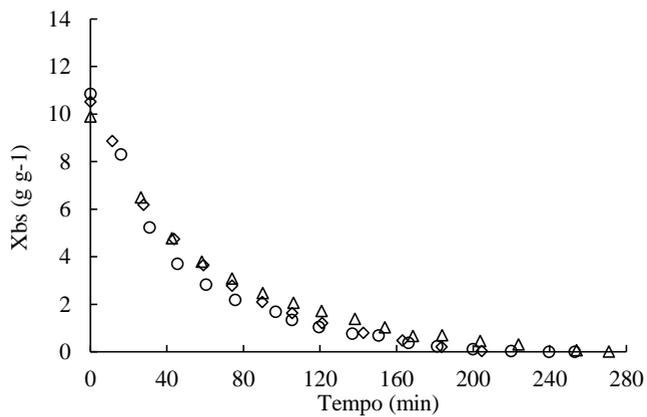
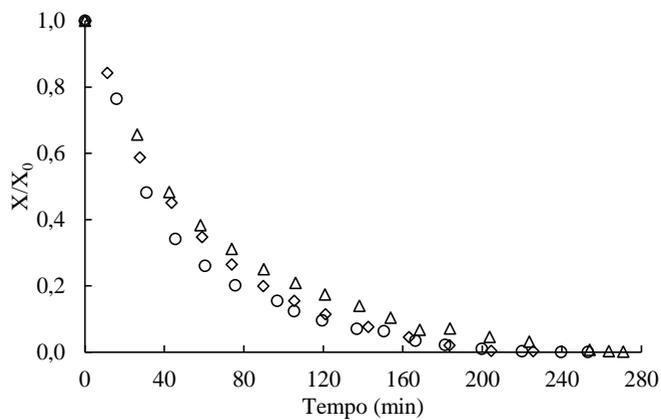


Figura B.2. Evolução temporal (min) da X_{bs} (a) e X/X_0 (b) das amostras de cenouras durante a secagem KMFD-VD-70.

a)



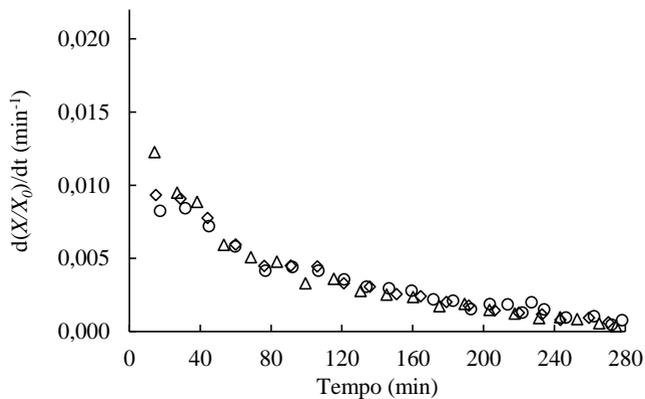
b)



APÊNDICE C

Dados das cinéticas das taxas de secagem, dX/dt e $d(X/X_0)/dt$.**Figura C.1.** Cinética da taxa de secagem dX/dt (a) e $d(X/X_0)/dt$ (b) das amostras de cenouras durante a secagem KMFD-70.

a)



b)

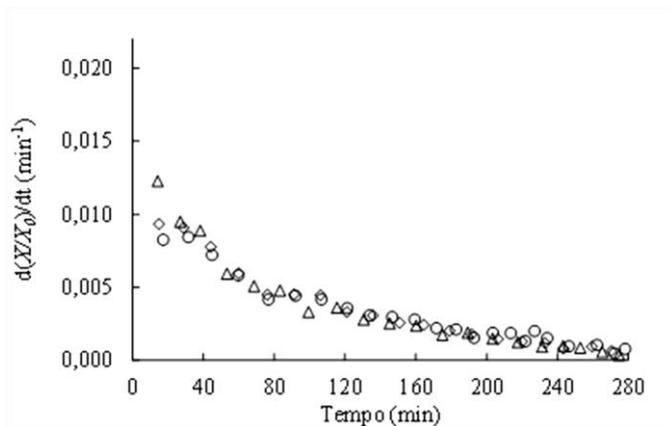
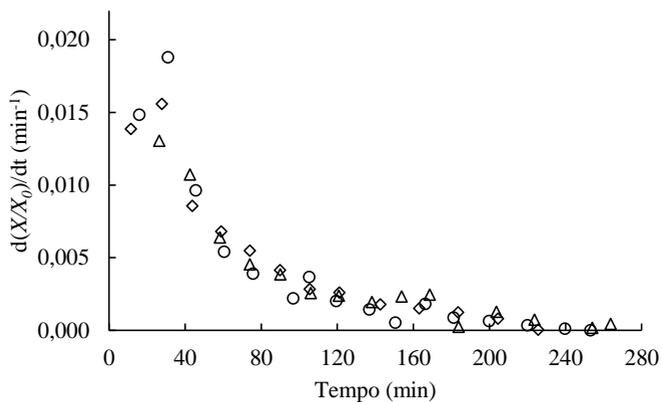
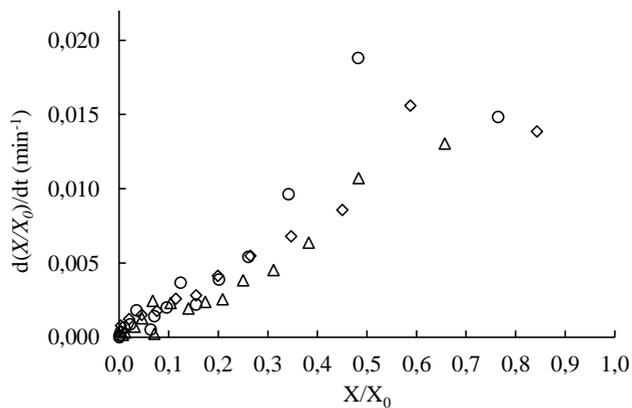


Figura C.2. Cinética da taxa de secagem dX/dt (a) e $d(X/X_0)/dt$ (b) das amostras de cenouras durante a secagem KMFD-VD-70.

a)



b)

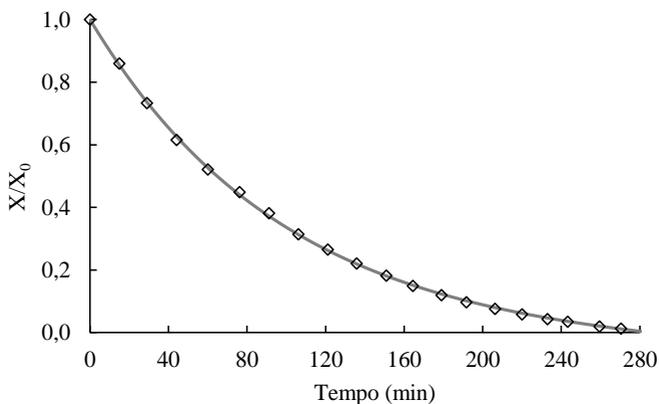


APÊNDICE D

Ajuste ao modelo empírico de Midilli

Figura D.1. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem KMFD-70 e da taxa de secagem (b) obtida no processo. Experimental (\diamond), Midilli (—).

a)



b)

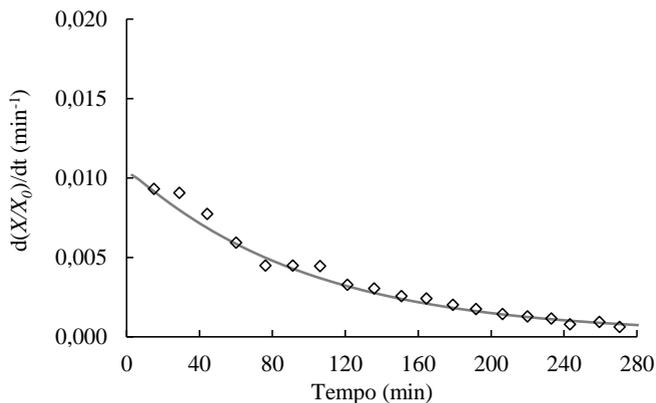
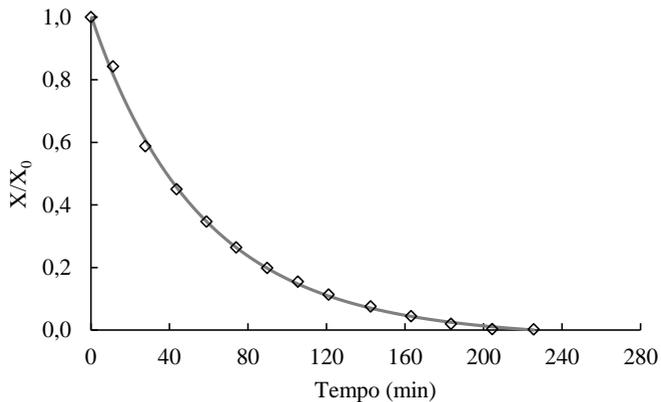


Figura D.2. Ajuste do modelo de Midilli para as amostras de cenoura durante a secagem KMFD-VD-70 e da taxa de secagem (b) obtida no processo. Experimental (\diamond), Midilli ($-$).

a)



b)

