

KACIANE ANDREOLA

SECAGEM DE CENOURA (*Daucus carota L.*) ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS

CAMPINAS 2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

KACIANE ANDREOLA

SECAGEM DE CENOURA (*Daucus carota L.*) ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS

Orientador: Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À	VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA
PELA ALUNA KACIANE ANDREOL PEREIRA TARANTO.	A E ORIENTADA PELO PROF. Dr. OSVALDIR
	CAMPINAS
	2013

iii

Ficha catalográfica Universidade Estadual de Campinas Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

An25s	Andreola, Kaciane, 1986- Secagem de cenoura (<i>Daucus carota L.</i>) assistida por micro-ondas / Kaciane Andreola. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.
	Orientador: Osvaldir Pereira Taranto. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.
	 Secagem. 2. Cenoura. 3. Cenoura - Secagem. 4. Alimentos - Desidratação. Microondas. I. Taranto, Osvaldir Pereira,1963 II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Microwave-assisted drying of carrot (*Daucus carota L.*) Palavras-chave em inglês: Drying Carrot Carrot - Drying Food - Dehydration Microwave Área de concentração: Engenharia de Processos Titulação: Mestra em Engenharia Química Banca examinadora: Osvaldir Pereira Taranto [Orientador] Antonio Marsaioli Junior Gustavo César Dacanal Data de defesa: 23-05-2013 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química Dissertação de Mestrado defendida por Kaciane Andreola e aprovada em 23 de Maio de 2013 pela banca examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto – Orientador DEPro/FEQ - UNICAMP

Densi

Prof. Dr. Antonio Marsaioli Junior DEPro/FEQ - UNICAMP

Prof. Dr. Gustavo César Dacanal FZEA/USP

DEDICATÓRIA

Dedido este trabalho à minha amada família, em especial aos meus pais e minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me deu força e proteção para desenvolver este trabalho e enfrentar todos os obstáculos.

Aos meus pais, Reonildo Pedrinho Andreola e Inês Andreola, pelo amor, apoio, compreensão e paciência durante todo esse período, mesmo a distância. A minha irmã Ariane Andreola pela força e amizade, imprescindíveis sempre.

Ao meu namorado Daniel de Souza Kamiya por estar sempre ao meu lado, pelo amor, companheirismo, paciência e imensa ajuda, sendo a base forte dos meus dias.

Ao professor e amigo Dr. Osvaldir Pereira Taranto pela sua dedicação na orientação deste trabalho, presteza nos ensinamentos, paciência e apoio em cada etapa deste trabalho.

Ao professor e amigo Dr. Antonio Marsaioli Junior pela sua grande contribuição para o desenvolvimento deste trabalho, agradeço imensamente pelos seus ensinamentos, sua dedicação, paciência e auxílio que foram de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Carlos Alberto Severo Felipe pelo auxílio durante a graduação e incentivo em fazer Pós-Graduação na UNICAMP.

A grande amiga e companheira Rosilene Gomes Costa que me auxiliou imensamente, estando presente em todos os momentos, pelos conselhos e ensinamentos prestados.

As amigas e companheiras Cynthia Mahl e Létícia Toledo pela parceria e por todos os bons momentos compartilhados, que amenizaram a distância e a saudade da família.

Aos amigos do Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos José Júnior Butzge, Carlos Alexandre Silva, Wilson dos Santos e Karine Zanella pela amizade e apoio.

Aos grandes amigos que fiz em Campinas, Liege Kawai, Tatiana Fiori, Aire Washington Junior, Edicarlos Barbosa, David, Geovane Motta, por tantos bons momentos vivenciados.

A UNICAMP e ao ITAL pela estrutura disponibilizada para a realização deste trabalho e aos colaboradores do ITAL pelo apoio, amizade e boa vontade sempre que solicitado durante a realização das análises, em especial à Michele e ao Renato.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido através da bolsa de mestrado.

ix

"Entrega o teu caminho ao SENHOR; confia nele, e ele o fará. E ele fará sobressair a tua justiça como a luz, e o teu juízo como o meio-dia".

(Salmo 37)

RESUMO

A cenoura está entre as hortaliças com maior cultivo no cenário nacional consumida tanto na forma *in natura* quanto processada. Esta hortalica apresenta elevado valor nutritivo e destacase pelo alto teor de β -caroteno. Contudo, como a cenoura *in natura* é um produto perecível este vegetal tem sido utilizado na forma desidratada como ingrediente para a formulação de produtos industrializados. A secagem é uma operação unitária que possibilita maior vida de prateleira, além de redução dos custos com armazenamento e transporte. Um método alternativo para a secagem de alimentos é a secagem com aplicação de micro-ondas, pois o calor é gerado no interior do material diferente da secagem convencional com ar quente, o que resulta em menor tempo de processamento. Este trabalho teve como objetivo o estudo da secagem convectiva de cenoura combinada com aplicação de micro-ondas em secador de leito fixo. Para tanto, técnicas de planejamento experimental e análise estatística dos resultados foram empregadas para avaliar a influência da temperatura do ar de secagem e da potência de micro-ondas na qualidade do produto em termos de umidade final, cor, textura e encolhimento. Foram efetuados dois planejamentos experimentais, sendo que no Planejamento A, a energia de micro-ondas foi aplicada durante todo o processo de secagem, enquanto que para o Planejamento B, a radiação foi aplicada após 30 minutos iniciais de secagem convectiva a 80 °C. Além disso, foi realizada a secagem de cenoura somente por convecção a 70 e 80 °C. A cinética de secagem apresentou um período de taxa constante, seguido de um período de taxa decrescente, tanto para a secagem com aplicação de micro-ondas quanto para a secagem puramente convectiva. A secagem com aplicação contínua de micro-ondas acelerou a retirada da umidade em relação à secagem convectiva, reduzindo o tempo de processo em pelo menos 60%. Já para o Planejamento B, em que a radiação foi aplicada a partir dos 30 minutos iniciais de secagem, o tempo de processo foi reduzido em pelo menos 50% comparado ao processo convectivo. O Planejamento A resultou em menor tempo de processo e maiores taxas de secagem em relação ao Planejamento B, sendo que em ambos foram obtidos valores para o conteúdo final de umidade, na faixa de 7,18 a 14,57% (b.u.). O aumento da potência de micro-ondas proporcionou menor encolhimento e umidade final, porém foi observada maior degradação da cor e textura mais dura, para ambos os planejamentos. A temperatura do ar, por sua vez, apresentou uma influência secundária na secagem quando micro-ondas foram incorporadas ao processo. As melhores condições de secagem obtidas para o Planejamento A, de acordo com a análise das curvas de nível e função desejabilidade global foram: temperatura do ar de 50 °C e potência de micro-ondas de 100 W. O segundo planejamento diferiu apenas quanto à temperatura do ar, apresentando como melhores condições de secagem: temperatura do ar de 45 °C e potência de micro-ondas de 100 W, mantendo-se a secagem inicial convectiva a 80 °C durante 30 minutos.

ABSTRACT

Carrot is among the most cultivated vegetables on the national scenery, being consumed fresh or in the processed form. This vegetable presents a high nutritional value and is distinguished by its high content of β -carotene. However, since carrot is a perishable product, it has been used in dried form, as an ingredient in the formulation of industrial products. Drying is a unit operation which allows longer shelf-life and reduces storage and transportation costs. Microwave drying represents an alternative method for food drying, once that the heat is generated inside the material differing from conventional drying by hot air, which results in shorter processing time. The aim of this work was to investigate microwave assisted convective air drying of carrots in a fixed bed dryer. Therefore, experimental design techniques and statistical analysis of the results were performed to analyze the influence of the air temperature and microwave power level on the product quality in terms of final moisture content, color, texture and shrinkage. Two experimental designs were performed which in the experimental design A, microwave power was applied during the whole drying process, while in the experimental design B, radiation was applied after 30 minutes of convective drying with air temperature at 80 °C. Moreover, it was also performed the drying of carrot only by convective drying with air at 70 and 80 °C. Drying kinetics showed a constant drying rate period, followed by decreasing drying rate period for both microwave and convective drying. Microwave continuous drying accelerated the removal of moisture content compared to convective drying, reducing at least 60% of the process time. In which the application of radiation was carried out after 30 minutes of drying, the process time was reduced by at least 50% compared to the convective drying. The experimental design A resulted in shorter process time and higher drying rates in relation to experimental design B, once that both were obtained values for the final moisture content in the range from 7.18 to 14.57% (w.b.). The increase on microwave power level provided less shrinkage and final moisture, however greater color degradation and harder texture were observed for both experimental designs. On the other hand, the air temperature showed a secondary effect on the drying process when the microwaves were incorporated into the process. The best conditions obtained for experimental design A, according to the analysis of contour curves and global desirability function were: air temperature at 50 °C and microwave power level of 100 W. The second experimental design differed only in the air temperature, presenting the best drying conditions: air temperature at 45 °C and microwave power level of 100 W, maintaining initial convective drying at 80 °C for 30 minutes.

RESUMO	xiii
ABSTRACT	XV
LISTA DE FIGURAS	xxiii
LISTA DE TABELAS	xxxiii
NOMENCLATURA	xxxv
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Fundamentos de secagem	5
3.1.1 Curvas de secagem	6
3.1.2 Modelagem matemática da cinética de secagem	11
3.2 Fundamentos de micro-ondas	12
3.2.1 Aquecimento por micro-ondas	15
3.2.2 Propriedades dielétricas dos materiais	16
3.2.3 Secagem assistida por micro-ondas	18
3.3 Fundamentos de encolhimento	22
3.4 Cor	27
3.5 Textura	32
3.6 Cenoura	
3.6.1 Características gerais	
3.6.2 Características nutricionais	
4 MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1 Matéria-prima	41

SUMÁRIO

4.2 Sistema experimental	41
4.3 Ensaios preliminares	45
4.4 Procedimento experimental	46
4.4.1 Procedimento para a secagem convectiva em secador de leito fixo	
4.4.2 Procedimento para a secagem em secador de leito fixo assistido a micro-ondas	49
4.5 Planejamento experimental - ensaios de secagem com aplicação de micro-ondas	51
4.6 Cinética de secagem	53
4.6.1 Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem	55
4.7 Determinação das propriedades dielétricas da cenoura	56
4.8 Avaliação da qualidade do produto	57
4.8.1 Análise do encolhimento do material	
4.8.2 Análise colorimétrica	
4.8.3 Determinação da textura	61
4.9 Análise estatística dos resultados	62
4.10 Função desejabilidade global	62
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1 Secagem convectiva em secador de leito fixo	65
5.2 Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem convectiva	67
5.3 Resultados da secagem com aplicação de micro-ondas - Planejamento A	68
5.3.1 Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem - Planejamento A	
5.4 Resultados da secagem com aplicação de micro-ondas - Planejamento B	83
5.4.1 Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem - Planejamento B	
5.5 Cinética de secagem - comparação entre os Planejamentos A e B	97
5.6 Avaliação das propriedades dielétricas	
5.7 Avaliação do produto obtido	
5.7.1 Análise do encolhimento do material	
5.7.1.1 Modelagem do encolhimento	111

5.7.2 Análise colorimétrica116
5.7.2.1 Diferença de cor total
5.7.3 Determinação da textura128
5.8 Análise das curvas de nível e estudo da função desejabilidade global
5.8.1 Análise das curvas de nível e estudo da função desejabilidade global - Planejamento A132
5.8.2 Análise das curvas de nível e estudo da função desejabilidade global - Planejamento B135
6 CONCLUSÕES139
6.1 Sugestões para trabalhos futuros141
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS143
APÊNDICE A153
APÊNDICE B155
APÊNDICE C159
APÊNDICE D163

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Curva típica de secagem convectiva7
Figura 3.2: Curva da taxa de secagem
Figura 3.3: Taxa de secagem dielétrica em função da umidade do material10
Figura 3.4: Espectro eletromagnético13
Figura 3.5: Diagrama de um sistema genérico de aquecimento por micro-ondas14
Figura 3.6: Diagrama representando o espaço de cores CIELAB (a) e representação do sólido de cor para o espaço colorimétrico L^* , $a^* \in b^*$ (b)
Figura 3.7: Morfologia da cenoura
Figura 4.1: Cesto de malha de aço inoxidável alojado em suporte cilíndrico de alumínio (a); cesto contendo as amostras (b) e visão da parte superior e inferior do cesto (c)
Figura 4.2: Representação do sistema experimental43
Figura 4.3: Fotos do sistema experimental. Secador de leito fixo assistido por micro-ondas (a), sistema gerador de micro-ondas e fonte de alimentação do <i>magnetron</i> (b) e autoclave cilíndrica envoltória da cavidade de aplicação de micro-ondas, com visores para observação no interior do secador (c)
Figura 4.4: Fluxograma de experimentos para a secagem de cenoura em secador de leito fixo assistido por micro-ondas
Figura 4.5: Imagens da monocamada de material utilizadas para a análise de encolhimento superficial
Figura 4.6: Suporte utilizado para alocar os cubos de cenoura durante a análise de cor60
Figura 5.1: Adimensional de umidade em função do tempo de secagem (a); Taxa de secagem em função do adimensional de umidade (b)
Figura 5.2: Umidade (base seca) em função do tempo de secagem - Planejamento A69
Figura 5.3: Taxa de secagem em função da umidade (base seca) - Planejamento A70
Figura 5.4: Taxa de secagem em função da umidade (base seca) para os experimentos referentes ao ponto central, Planejamento A

Figura 5.5: Curvas de secagem para as condições do Planejamento A e para a secagem puramente convectiva (a). Período final da secagem para ambos os processos (b)74
Figura 5.6: Influência da temperatura do ar na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da temperatura do ar na taxa de secagem (c), para os <i>ensaios 1a</i> (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) e <i>3a</i> (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W)
Figura 5.7: Influência da temperatura do ar na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da temperatura do ar na taxa de secagem (c), para os <i>ensaios 2a</i> (T_{ar} : 30 °C, P: 300 W) e <i>4a</i> (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W)
Figura 5.8: Influência da potência de micro-ondas na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da potência de micro-ondas na taxa de secagem (c), para os <i>ensaios 1a</i> (T_{ar} : 30 °C, P : 100 W) e 2a (T_{ar} : 30 °C, P : 300 W)
Figura 5.9: Influência da potência de micro-ondas na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da potência de micro-ondas na taxa de secagem (c), para os <i>ensaios 3a</i> (T_{ar} : 50 °C, P : 100 W) e 4a (T_{ar} : 50 °C, P : 300 W)
Figura 5.10: Diagrama de <i>Pareto</i> para a umidade (base seca) no tempo de 90 minutos – Planejamento A
Figura 5.11: Umidade (base seca) em função do tempo de secagem - Planejamento B
Figura 5.12: Taxa de secagem em função da umidade (b.s.) - Planejamento B
Figura 5.13: Taxa de secagem em função da umidade (b.s.) para os experimentos referentes ao ponto central, Planejamento B
Figura 5.14: Curvas de secagem para as condições do Planejamento B e para a secagem puramente convectiva (a). Período final da secagem para ambos os processos (b)
Figura 5.15: Influência da temperatura do ar na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da temperatura do ar na taxa de secagem (c), para os <i>ensaios 1b</i> ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) e 3b ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W)90
Figura 5.16: Influência da temperatura do ar na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da temperatura do ar na taxa de secagem (c), para os <i>ensaios 2b</i> ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 300 W) e 4b ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 300 W)

Figura 5.17: Influência da potência de micro-ondas na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da potência de micro-ondas na taxa de secagem (c), para os *ensaios 1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) e **2b** ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 300 W).......93

Figura 5.18: Influência da potência de micro-ondas na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da potência de micro-ondas na taxa de secagem (c), para os *ensaios 3b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) e *4b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 300 W)......94

Figura 5.19: Diagrama de Pareto para a umidade no tempo de 110 minutos - Planejamento B. .95

Figura 5.20: Curvas de secagem (a) e taxas de secagem (b) para o processo com aplicação contínua de micro-ondas (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W – *ensaio 1a*) e com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo ($T_{ar inicial}$: 80 °C , T_{ar} : 30 °C, P: 100 W – *ensaio 1b*). .97

Figura 5.21: Curvas de secagem (a) e taxas de secagem (b) para o processo com aplicação contínua de micro-ondas (T_{ar} : 30 °C, P: 300 W – *ensaio 2a*) e com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 300 W – *ensaio 2b*)...98

Figura 5.22: Curvas de secagem (a) e taxas de secagem (b) para o processo com aplicação contínua de micro-ondas (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W – *ensaio 3a*) e com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W – *ensaio 3b*). ...99

Figura 5.23: Curvas de secagem (a) e taxas de secagem (b) para o processo com aplicação contínua de micro-ondas (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W – *ensaio 4a*) e com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 300 W – *ensaio 4b*). ...99

Figura 5.28: Ajustes do modelo linear: Planejamento A (a) e Planejamento B (b).112

Figura 5.29: Ajustes do modelo quadrático: Planejamento A (a) e Planejamento B (b)113
Figura 5.30: Redução volumétrica da cenoura em função do adimensional de umidade, Planeiamento A (a) e Planeiamento B (b) - Modelo cúbico
Figura 5.31: Redução volumétrica da cenoura em função do adimensional de umidade, Planejamento A (a) e Planejamento B (b) - Modelo proposto por Nahimana (2011)115
Figura 5.32: Parâmetro <i>L</i> * da cor do produto final em função das condições de secagem para os Planejamentos A e B
Figura 5.33: Diagrama de <i>Pareto</i> para a resposta luminosidade, Planejamento A (a) e Planejamento B (b)
Figura 5.34: Parâmetro <i>a</i> * da cor do produto final em função das condições de secagem para os Planejamentos A e B
Figura 5.35: Diagrama de <i>Pareto</i> para o parâmetro de cor <i>a</i> *, Planejamento A (a) e Planejamento B (b)
Figura 5.36: Parâmetro <i>b</i> * da cor do produto final em função das condições de secagem para os Planejamentos A e B
Figura 5.37: Diagrama de <i>Pareto</i> para o parâmetro de cor <i>b</i> *, Planejamento A (a) e Planejamento (b)
Figura 5.38: Modificações dos parâmetros de cor (L^* , $a^* e b^*$) das cenouras secas em função das condições experimentais tendo como referência a amostra <i>in natura</i>
Figura 5.39: Diferença de cor total da cenoura em função do processo de secagem125
Figura 5.40: Variação da coloração para a cenoura seca nas condições do <i>ensaio 1a</i> (T_{ar} : 30 °C, P : 100 W) (a), <i>ensaio 3a</i> (T_{ar} : 50 °C, P : 100 W) (b), <i>ensaio 1b</i> ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, P : 100 W) (c) e <i>ensaio 4a</i> (T_{ar} : 50 °C, P : 300 W) (d)
Figura 5.41: Valores da dureza das cenouras representados pela força máxima de compressão para as diferentes condições de secagem em relação à cenoura <i>in natura</i>
Figura 5.42: Diagrama de <i>Pareto</i> para a resposta dureza final da cenoura, Planejamento A (a) e Planejamento B (b)

Figura 5.43: Curvas de nível para as respostas umidade final (% b.u.) (a); encolhimento (b);
diferença de cor total (c) e dureza (d) – Planejamento A133
Figura 5.44: Gráficos da função desejabilidade para as variáveis de resposta umidade final, cor,
dureza e encolhimento – Planejamento A
Figura 5.45: Curvas de nível para as respostas umidade final (% b.u.) (a); encolhimento (b);
diferença de cor total (c) e dureza (d) – Planejamento B
Figura 5.46: Gráficos da função desejabilidade para as variáveis de resposta umidade final, cor,
dureza e encolhimento – Planejamento B

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição da cenoura por 100 gramas de parte comestível. 39
Tabela 3.2: Conteúdo médio de α e β -caroteno em diferentes vegetais <i>in natura</i>
Tabela 4.1: Parâmetros experimentais utilizados46
Tabela 4.2: Variáveis independentes e seus valores codificados. 52
Tabela 4.3: Matriz utilizada nos planejamentos experimentais A e B
Tabela 4.4: Modelos matemáticos aplicados à cinética de secagem. 55
Tabela 4.5: Modelos matemáticos de encolhimento. 58
Tabela 4.6: Escala de valores de desejabilidade individual ou global64
Tabela 5.1: Parâmetros do modelo Linear e de Page - secagem convectiva. 68
Tabela 5.2: Resultados de umidade final - Planejamento A. 70
Tabela 5.3: Intervalo de tempo para os períodos distintos de secagem - Planejamento A72
Tabela 5.4: Parâmetros do modelo Linear e de Page - Planejamento A. 82
Tabela 5.5: Resultados de umidade final - Planejamento B
Tabela 5.6: Intervalo de tempo para os períodos distintos de secagem - Planejamento B
Tabela 5.7: Parâmetros do modelo Linear e de Page - Planejamento B
Tabela 5.8: Intervalos de tempo com aplicação de micro-ondas e tempo total de secagem (Planejamentos
A e B)100
Tabela 5.9: Propriedades dielétricas da cenoura in natura para diferentes frequências, 25 °C101
Tabela 5.10: Coeficientes de encolhimento volumétrico (V/V_0) da cenoura para a secagem com aplicação
de micro-ondas na forma contínua e descontínua105
Tabela 5.11: Coeficientes de encolhimento superficial (A/A_0) da cenoura para a secagem com aplicação de
micro-ondas na forma contínua e descontínua110
Tabela 5.12: Parâmetros de cor $(L^*, a^* e b^*)$ da cenoura in natura e seca para todas as condições de
secagem
Tabela 5.13: Diferença de cor total (ΔE^*) entre a cenoura <i>in natura</i> e seca para todas as condições de
secagem
Tabela 5.14: Valores da dureza para a cenoura in natura e seca nas condições de processo dos
Planejamentos A e B
Tabela 5.15: Valores atribuídos na investigação das melhores condições de processo via função
desejabilidade – Planejamento A134
Tabela 5.16: Valores atribuídos na investigação das melhores condições de processo via função
desejabilidade – Planejamento B

NOMENCLATURA

Letras latinas

Α	Área superficial da amostra	mm^2
A, B, C e D	Constantes dos modelos matemáticos de encolhimento	-
a,b,n	Constantes dos modelos matemáticos de secagem	-
a_0	Índice de saturação vermelho da amostra in natura	-
<i>a</i> *	Índice de saturação vermelho definido pela CIE (1976)	-
b_0	Índice de saturação amarelo da amostra in natura	-
b_*	Índice de saturação amarelo definido pela CIE (1976)	-
С	Cor	-
D	Dureza	Ν
E', B	Constantes do modelo linear de encolhimento	-
Ε	Erro relativo médio	%
F	Força de compressão	Ν
IN	Amostra de cenoura in natura	-
Κ	Constante de secagem	\min^{-1}
L^*	Índice de luminosidade definido pela CIE (1976)	-
L_0^*	Índice de luminosidade da amostra in natura	-
m	Massa	g
Ν	Taxa de secagem	\min^{-1}
N_c	Taxa de secagem no período constante	\min^{-1}
N'	Número de observações experimentais	-
Р	Potência de micro-ondas	W
---------------------------	----------------------------------------------------------	----------------------
Q_{ar}	Vazão volumétrica de ar	m ³ /min
R^2	Coeficiente de determinação	-
S	Coeficiente de encolhimento volumétrico	-
S'	Coeficiente de encolhimento superficial	-
SQR	Soma dos quadrados dos resíduos	-
T _{ar}	Temperatura do ar	°C
Tar inicial	Temperatura inicial do ar da secagem convectiva (30 min)	°C
t	Tempo	min
<i>t</i> _{total}	Tempo de secagem total	min
t _{micro-ondas}	Tempo de secagem com aplicação de micro-ondas	min
t_{Nc}	Tempo de secagem para o período de taxa constante	min
W	Taxa de secagem	kg/m ² .s
X	Teor de umidade	$g_{umidade}/g_{ss}$
X _e	Teor de umidade no equilíbrio	$g_{umidade}/g_{ss}$
X_R	Adimensional de umidade	-
X_0	Teor de umidade inicial	$g_{umidade}/g_{ss}$
X'1 e X'2	Variáveis de entrada codificadas	-
Y	Valor observado experimentalmente	-
Y_0	Valor calculado pelo modelo	-

Letras gregas

$\tan\delta$	Tangente de perdas	-
ΔE^*	Diferença de cor total em relação a amostra in natura	-
ΔL^*	Variação de luminosidade em relação a amostra in natura	-
Δa^*	Variação de tonalidade vermelha em relação a amostra in natura	-
Δb^*	Variação de tonalidade amarela em relação a amostra in natura	-
E *	Permissividade dielétrica complexa relativa	-
arepsilon'	Constante dielétrica relativa	-
$arepsilon^{"}$	Fator de perda dielétrica relativa	-

Subscritos

0	Referente a condição inicial	-
b.s.	Base seca	-
b.u.	Base úmida	-
f	Referente a condição final	-
SS	Sólido seco	_

1 INTRODUÇÃO

O avanço nos desenvolvimentos tecnológicos empregados na agricultura tem propiciado a ampliação na produção de frutas e hortaliças. Dessa forma, o consumo de vegetais *in natura* ou processados também passa por um incremento. Nos últimos anos o consumo de alimentos desidratados, principalmente de frutas e hortaliças, é crescente devido à mudança no estilo de vida e hábitos alimentares da população. Este fator tem estimulado o interesse das indústrias processadoras na obtenção de produtos desidratados de boa qualidade, diante das exigências do mercado consumidor.

O processo de secagem de materiais sólidos é uma operação unitária que visa à eliminação parcial ou total da umidade através da evaporação desta, sendo empregado principalmente na preservação de alimentos. A maioria das frutas e hortaliças apresenta alto conteúdo de umidade quando na forma *in natura*, o que as caracteriza como produtos perecíveis. Portanto, a secagem desses produtos representa uma alternativa de conservação que proporciona maior vida de prateleira, além de redução dos custos com armazenamento e transporte.

Apesar desses benefícios a secagem pode ocasionar a degradação de componentes nutricionais, alterações de cor, endurecimento superficial e encolhimento dos produtos, o que é indesejável. Essas limitações de qualidade têm despertado o interesse de diversas pesquisas no decorrer dos anos, visto que a utilização de frutas e hortaliças desidratadas na formulação de produtos industrializados tem apresentado crescimento considerável, por agregarem maior valor nutricional a esses produtos.

O alto valor nutritivo da cenoura torna esta hortaliça uma matéria-prima interessante para a indústria de alimentos, uma vez que apresenta elevado conteúdo de carotenóides e quantidades apreciáveis de vitaminas e minerais, destacando-se pelo alto teor de β -caroteno, sendo um dos vegetais que apresenta maior teor deste nutriente (MAHAN e ESCOTT-STUMP, 2002).

Como produto desidratado, a cenoura é empregada na elaboração de sopas desidratadas, alimentos infantis, purês, molhos, patês, farinhas, biscoitos e *snacks* (EMBRAPA, 2012).

Os métodos de secagem convencionais com emprego de ar quente são amplamente utilizados, porém demandam longo tempo de processo o que pode ocasionar deterioração significativa na qualidade do produto final, além disso, apresentam restrições no caso de alimentos termicamente sensíveis. Devido a isso, novas tecnologias de processamento têm sido desenvolvidas e estudadas, buscando condições que resultem em um menor tempo de secagem, maior rendimento na produção e melhor qualidade dos produtos finais.

O interesse da aplicação de micro-ondas em processos de secagem está relacionado à possibilidade de minimizar o problema de baixa eficiência e prolongado tempo, principalmente, na retirada da umidade ligada à estrutura física e química do produto, que ocorre durante o período de taxa de secagem decrescente. Na secagem com aplicação de micro-ondas ocorre o aquecimento instantâneo do produto, isto porque o calor é gerado no interior do material, resultando em tempo de processo consideravelmente menor, em relação à secagem convencional.

Nos últimos anos pesquisas vêm sendo realizadas com a aplicação de micro-ondas nos processos de secagem, principalmente, no âmbito alimentício (TULASIDAS *et al.*, 1995; MASKAN, 2000; BAYSAL *et al.*, 2003; BERTELI, 2005; PEREIRA, 2007 FIGIEL *et al.*, 2010), devido às vantagens tanto em relação ao tempo de processo quanto à qualidade do produto final. Alguns trabalhos encontrados na literatura sobre secagem de cenoura com micro-ondas associada ou não à convecção e a outros métodos como liofilização e vácuo reportam a relação da cinética de secagem, características de reidratação e propriedades estruturais do material com o método de secagem empregado (LIN *et al.*, 1998; KROKIDA e MAROULIS, 1999; PRAKASH *et al.*, 2004; REYES *et al.*, 2008; WANG e XI, 2005; ARIKAN *et al.*, 2012). Nestas pesquisas, os resultados obtidos com a aplicação de micro-ondas demonstraram que é possível reduzir consideravelmente o tempo de secagem, proporcionando maior rendimento na produção, redução do consumo energético e melhor qualidade nutricional e estrutural do produto final.

Estudos têm sido desenvolvidos buscando aperfeiçoar os processos de secagem para obtenção de melhor qualidade do produto final. Dentro deste contexto, neste trabalho realizou-se o estudo da secagem de cenoura com aplicação de micro-ondas, contribuindo para avanço de novas tecnologias de processamento para vegetais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo realizar o estudo da secagem convectiva de cenoura combinada com aplicação de micro-ondas em secador de leito fixo.

2.2 Objetivos específicos

- Estudar a cinética de secagem da cenoura para o processo convectivo com ar quente;
- Estabelecer as faixas para as condições operacionais do processo de secagem assistido por micro-ondas, como temperatura do ar e potência de micro-ondas aplicada, através de testes preliminares;
- Estudar a influência das condições operacionais no processo de secagem da cenoura;
- Realizar o estudo comparativo dos processos com e sem aplicação de micro-ondas em termos de cinéticas de secagem;
- Determinar as características físicas e estruturais da cenoura, através de análises de cor, textura e encolhimento, para o produto úmido e seco por micro-ondas;
- Obter as condições ideais de operação, dentro do domínio experimental estudado, para a secagem assistida por micro-ondas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fundamentos de secagem

A secagem de materiais é uma operação unitária que visa à eliminação da umidade contida em um sólido, através da evaporação desta por meio da aplicação de calor. Assim, o estudo da secagem de materiais abrange a determinação das curvas de secagem, como também o conhecimento do comportamento higroscópico dos materiais.

A secagem é tradicionalmente definida como uma operação unitária que converte um material sólido, semi-sólido ou líquido em um produto sólido de menor teor de umidade (BAKER, 1997). Foust *et al.* (1982) definiram a secagem, de forma geral, como uma operação destinada a eliminar a água, ou qualquer outro líquido, contido em um sólido, por meio da adição de calor.

O processo de secagem de alimentos e materiais biológicos não é considerado uma operação de natureza simples, pois envolve fenômenos de transferência de calor e massa em regime transiente dificultando, portanto, o controle de muitas alterações físicas, químicas e bioquímicas que ocorrem nestes materiais durante o processo (RAMASWAMI e MARCOTTE, 2006).

A secagem de materiais visa à preservação do produto e também a redução de peso e volume do material, facilitando desta forma as operações de transporte, além de permitir o armazenamento do produto por maior período de tempo. A operação de secagem é utilizada em diversos segmentos industriais, como por exemplo, na preparação de pós, sólidos granulares, alimentos, produtos químicos e farmacêuticos, entre outros. (COOK e DUMONT, 1991).

É importante ressaltar que os produtos finais obtidos pelo processamento de materiais biológicos necessitam apresentar baixos teores de umidade, em níveis que não proporcionem o desenvolvimento de micro-organismos indesejáveis.

Quando um material úmido é submetido à operação de secagem, geralmente ocorrem simultaneamente dois fenômenos, sendo estes (MENON e MUJUMDAR, 1987):

- Transferência de energia do ambiente, normalmente calor, para evaporar a umidade superficial do sólido. Neste caso, a remoção da umidade sob a forma de vapor da superfície do material é função das condições externas, como por exemplo, temperatura, umidade, fluxo e direção do ar de secagem e área da superfície exposta;
- Transferência de massa (umidade) presente no interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação. Assim sendo, o movimento interno da umidade é função da temperatura, da natureza física e do conteúdo de umidade do sólido.

Durante a realização da secagem a determinação do conteúdo de umidade é um parâmetro de grande importância e indispensável no que se refere ao acompanhamento das mudanças ocorridas durante o processo. Diante disto, é importante considerar que a umidade pode estar presente no material em diferentes formas (STRUMILLO e KUDRA, 1986):

<u>Umidade superficial</u>: ocorre quando o líquido existe como um filme externo sobre o material devido aos efeitos da tensão superficial.

<u>Umidade não ligada</u>: é aquela que pode ser eliminada em uma determinada condição de processo. Em material não higroscópico, representa todo o conteúdo de umidade interna presente e para um material higroscópico é o excesso do conteúdo de umidade de equilíbrio correspondente à umidade de saturação.

<u>Umidade ligada, higroscópica ou dissolvida</u>: acontece quando o líquido exerce uma pressão de vapor menor que a do líquido puro em uma determinada temperatura. Esta umidade pode estar presente em diferentes condições: na forma líquida retida em microcapilares, em solução contida nas paredes celulares e adsorvida química ou fisicamente na superfície do material e necessita de elevados níveis de temperatura para sua remoção.

3.1.1 Curvas de secagem

O processo de secagem é representado pelas curvas típicas de secagem, que são reproduções gráficas dos dados de umidade média do material em função do tempo, obtidos experimentalmente. Dessa forma, a cinética de secagem relaciona a mudança do conteúdo médio de umidade do material com o tempo de processo.

A partir da determinação da cinética de secagem é possível definir o tempo de secagem e a quantidade de água evaporada do material. Segundo STRUMILLO e KUDRA (1986), os

parâmetros que influenciam a cinética de secagem incluem a umidade, temperatura e velocidade do ar. A Figura 3.1 ilustra a curva típica de secagem que representa a evolução da umidade do material em função do tempo de secagem.



Figura 3.1: Curva típica de secagem convectiva. Fonte: STRUMILLO e KUDRA (1986).

A Figura 3.2 mostra a curva da taxa de secagem em função da umidade do material. A taxa de secagem é definida como sendo a quantidade de umidade removida do material na unidade de tempo por unidade de superfície de secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986):

$$W = -\frac{m}{A} \cdot \frac{dX}{dt}$$
(3.1)

ou como:

$$N = -\frac{dX}{dt}$$
(3.2)



Figura 3.2: Curva da taxa de secagem. Fonte: STRUMILLO e KUDRA (1986).

É possível observar pelas Figuras 3.1 e 3.2 a ocorrência de três diferentes períodos de secagem, denominados de período inicial de secagem, período de secagem à taxa constante e período à taxa decrescente. O último segmento (DE) representa o período final da secagem. Estes períodos distintos são detalhados a seguir de acordo com (STRUMILLO e KUDRA, 1986):

<u>Períodos AB e A'B</u>: denominados como período inicial de secagem, representam o intervalo de aquecimento ou resfriamento do material, isto é, o período de estabilização entre a temperatura do material e a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem. A duração deste período é consideravelmente menor do que o período total de secagem.

<u>Período BC</u>: é o período de secagem à taxa constante, sendo esta taxa de secagem independente da umidade total do material em cada instante. A superfície do material está saturada, coberta por um filme contínuo de água livre que age como se o sólido não existisse. A água evaporada é a água livre e a transferência de massa e de calor são equivalentes, assim, a velocidade de secagem é constante. A taxa de secagem será constante enquanto a quantidade de água presente na superfície do produto seja suficiente para acompanhar a evaporação. A diminuição linear do teor de umidade com o tempo ocorre continuamente até atingir o ponto C, denominado de ponto crítico, que corresponde ao instante em que o movimento do líquido do interior para a superfície é insuficiente para manter o filme contínuo sobre a superfície do material.

<u>Período CD</u>: corresponde ao período de taxa de secagem decrescente, que tem início a partir da umidade crítica. Neste período, a quantidade de umidade presente na superfície do produto começa a ser escassa e a velocidade da secagem diminui. A temperatura do material aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem e o fator limitante é a redução da migração de umidade do interior do material para a sua superfície. A migração interna da umidade é o mecanismo que governa esta fase, portanto, a característica da estrutura interna do material é um fator importante para o entendimento deste mecanismo. O período de taxa decrescente pode ser dividido em duas fases:

<u>Primeira fase</u>: a umidade livre (fase líquida) presente no interior do produto é contínua, sem a presença de ar e ocupa todos os poros do produto. O movimento da umidade do interior para a superfície ocorre por capilaridade, mecanismo que controla a velocidade de secagem nesta fase.

<u>Segunda fase</u>: a remoção de umidade da superfície por evaporação provoca a entrada de ar no interior do produto, originando bolsas de ar que ficam dispersas na fase líquida dentro dos poros. Nessa fase, o escoamento capilar ocorre apenas em alguns pontos localizados.

A partir do ponto crítico (C) o comportamento da curva aproxima-se assintoticamente do conteúdo de umidade de equilíbrio do material (X_{eq}), que é representado pelo ponto E.

<u>Período DE</u>: é denominado de fase final da secagem, em que ocorre a completa evaporação no interior do material e o vapor retirado do produto difunde-se através deste até a superfície e em seguida, através da corrente gasosa, diminuindo ainda mais a taxa de secagem.

Quando a umidade de equilíbrio é alcançada, ou seja, quando a pressão parcial do vapor na superfície do material é igual à pressão do vapor na fase gasosa, a secagem não ocorre mais sendo, portanto, a taxa de secagem nula.

De acordo com Strumillo e Kudra (1986) os principais mecanismos para a remoção da umidade por secagem dielétrica são similares aos métodos convencionais. No entanto, a presença de uma fonte de calor interior provoca certos fenômenos, que nos processos de secagem menos intensivos não ocorrem. Por meio da secagem dielétrica é possível elevar a temperatura do material até o ponto de ebulição do líquido. Uma intensiva evaporação do líquido dentro do material úmido se desenvolve e, devido à resistência ao fluxo que resulta da estrutura do material, é gerado um gradiente de pressão interno. Isto se torna a principal força motora para a transferência de massa, principalmente durante o período de taxa de secagem constante. Como resultado da geração interna de calor, um gradiente de temperatura positivo dentro do material é produzido, sendo responsável pelo movimento da umidade para a superfície do material, onde a temperatura é mais baixa (e a pressão de vapor menor), através de fluxos de líquidos e vapor.

A secagem dielétrica, em alguns casos, pode alterar completamente a distribuição de umidade do material que vai ser seco, devido à complexa dependência dos parâmetros dielétricos (constante dielétrica e fator de perdas) e parâmetros físico-químicos (difusividade) sobre a temperatura e o teor de umidade. A Figura 3.3 ilustra a taxa de secagem em função da umidade do sólido para a secagem dielétrica (STRUMILLO e KUDRA, 1986).



Figura 3.3: Taxa de secagem dielétrica em função da umidade do material. Fonte: STRUMILLO e KUDRA (1986).

De uma forma geral, os processos de secagem dielétrica podem ser divididos em quatro períodos (STRUMILLO e KUDRA, 1986):

<u>Período de aquecimento preliminar</u>: a temperatura do sólido úmido pode aumentar até o ponto de ebulição do líquido. Neste período não há perdas significativas de umidade e a pressão interna do material pode ser considerada igual à pressão atmosférica;

<u>Período de aumento de pressão</u>: a pressão aumenta desde a atmosférica até uma pressão máxima determinada pela resistência ao fluxo e a potência aplicada. O vapor gerado interiormente ao material flui em direção à superfície;

<u>Período de taxa de secagem constante</u> (para potência absorvida constante): a velocidade do fluxo de vapor dentro do material é determinada pela potência absorvida e pela resistência interna ao fluxo de vapor;

<u>Período de taxa de secagem decrescente</u>: o decréscimo do teor de umidade do material resulta em um declínio da potência absorvida e da força motora do movimento da umidade. A temperatura do material poderá aumentar em baixos teores de umidade.

3.1.2 Modelagem matemática da cinética de secagem

Diversos modelos matemáticos são propostos na literatura para o estudo da cinética de secagem dos materiais. Os modelos matemáticos buscam estimar as transferências simultâneas de calor e massa envolvidas na cinética de secagem. Portanto, estes modelos são empregados para prever o comportamento das curvas de secagem do material.

Os modelos teóricos são baseados na teoria da difusão da umidade como líquido ou vapor, representada pela segunda lei de Fick, expressa na forma unidimensional como (CRANK, 1975):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = Def\left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{q}{r}\frac{\partial X}{\partial r}\right)$$
(3.3)

em que X é conteúdo de umidade em base seca (g de água /g de material seco), t é tempo de secagem (s), r é a distância do centro até o ponto (cm) e D_{ef} representa a difusividade efetiva (cm²/s), sendo, q=0 para placa plana, q=1 para cilindro e q=2 para esfera.

Crank (1975) apresentou diversas soluções analíticas da equação da difusão para diferentes condições iniciais e de contorno, considerando a difusividade constante ou variando com a umidade. Essas soluções se aplicam para sólidos com geometrias simples e regulares, como esféricas, cilíndricas e placas planas infinitas ou paralelepípedo e são detalhadas pelo autor.

A descrição da cinética de secagem também pode ser realizada pela utilização do modelo exponencial proposto por Lewis (1921). Esse modelo prevê que a taxa de perda de água é proporcional ao teor de umidade livre do material (PARRY, 1985):

$$\frac{dX}{dt} = -K(X - X_e) \tag{3.4}$$

A forma integrada da Equação 3.4, representada pela Equação 3.5 é mais comumente encontrada na literatura:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-K \cdot t)$$
(3.5)

onde *K* representa a constante de secagem, *X* é a umidade média do material no tempo *t*, X_e é a umidade média do material no equilíbrio e X_0 é a umidade média inicial do material.

Modificações importantes foram propostas para a forma integrada do modelo de Lewis. Uma modificação do modelo foi proposta por Page (1949) com a adição de mais um parâmetro na equação para descrever a secagem de milho. A inclusão de parâmetros visa um melhor ajuste experimental. A representação da equação do modelo de Page é, portanto:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp\left(-K \cdot t^n\right)$$
(3.6)

Em que:

K = constante de secagem do modelo de Page; n = parâmetro do modelo.

O parâmetro K do modelo de Page está relacionado com o efeito das condições internas durante a secagem, enquanto que o parâmetro n está relacionado com o efeito das condições externas (VIEIRA, 2006). A Equação 3.6 é aplicada com frequência para produtos agrícolas devido aos bons resultados obtidos. Segundo Pereira (2007), o modelo de Page tem apresentado ajustes satisfatórios para os dados de secagem de produtos alimentícios com aplicação de micro-ondas.

3.2 Fundamentos de micro-ondas

As micro-ondas são uma forma de radiação eletromagnética que compreendem o intervalo de frequência entre 300 MHz e 300 GHz, com comprimentos de onda entre 1 m e 1 mm (DECAREAU e PETERSON, 1986).

As bandas de frequências utilizadas para aplicações em eletrotermia são restritas, a fim de se evitar interferências nas bandas de frequências utilizadas em telecomunicações. De acordo com as Leis Internacionais de Rádio (*International Radio Regulations*) e pelo regulamento da Comissão Federal de Comunicações (*Federal Communications Commission*), as frequências permitidas no uso industrial, científico e medicinal (ISM - *Industrial, scientific and medical*) são de 915, 2450, 5800 e 22125 MHz. Porém, as frequências mais utilizadas em aplicações industriais são de 915 MHz e 2450 MHz, que correspondem a comprimentos de onda de 32,8 cm e 12,25 cm, respectivamente, no vácuo (METAXAS e MEREDITH, 1983).

A radiação de micro-ondas está localizada no espectro eletromagnético entre a radiação de infravermelho e as ondas de rádio, como pode ser observado na Figura 3.4.



Figura 3.4: Espectro eletromagnético. Fonte: DALL`OGLIO (2002).

A frequência mais comum é a de 2450 MHz, inclusive, a maioria dos fornos de microondas domésticos opera nesta frequência (MARSAIOLI, 1991). Por sua vez, a frequência de 5800 MHz, possui um comprimento de onda menor em relação à frequência de 2450 MHz (5,17 cm) e vem sendo empregada em estudos de secagem com micro-ondas em escala laboratorial, como em ROSA (2012) para a secagem de PHB (polímero biodegradável obtido da cana-deaçúcar).

As micro-ondas são passíveis de sofrerem fenômenos de reflexão, transmissão e absorção, sendo refletidas por superfícies metálicas (condutores) e refratadas por materiais dielétricos

(pouco condutores). A propriedade mais importante dessa forma de energia, principalmente no âmbito da tecnologia de alimentos, é a sua capacidade de ser absorvida por materiais dielétricos na forma de calor (ENGELDER e BUFFLER, 1991).

O principal objetivo de um sistema de aquecimento por micro-ondas é proporcionar o aproveitamento desta energia. Para que isso seja possível, é necessário que este sistema seja constituído por componentes responsáveis pela geração de energia e pela condução desta para um aplicador, a partir do qual a potência pode ser dissipada no material submetido ao aquecimento. A Figura 3.5 ilustra a configuração geral de um sistema genérico de aquecimento por micro-ondas.



Figura 3.5: Diagrama de um sistema genérico de aquecimento por micro-ondas. Fonte: CONFORTI e TEJO (1976) citado por MARSAIOLI (1991).

O conjunto de elementos constituintes deste sistema é descrito a seguir (MARSAIOLI, 1991):

<u>Sistema de geração de micro-ondas</u>: é constituído pela fonte de alimentação e pelo gerador de micro-ondas:

- Fonte de alimentação: fornece as tensões e correntes necessárias para o funcionamento do gerador de micro-ondas;
- Gerador de micro-ondas: é um oscilador que converte a potência fornecida pela fonte em energia nas frequências de micro-ondas. O oscilador, usualmente, empregado é o do tipo *magnetron*.

<u>Sistema de transmissão de micro-ondas (guia de onda)</u>: a energia gerada pelo oscilador pode ser transferida de forma guiada por meio da propagação do campo eletromagnético em forma de onda eletromagnética em dutos metálicos altamente condutivos. As seções podem ser retangulares ou circulares com dimensões dependentes do comprimento de onda. As ondas são refletidas nas paredes metálicas no interior do guia, apresentando uma distribuição de campos elétricos de maior intensidade no guia e campo elétrico zero nas paredes (MARSAIOLI, 1991; PEREIRA, 2007).

<u>Sistema de aplicação</u>: o aplicador é um volume limitado por paredes metálicas, no interior do qual se processa a interação entre o material dielétrico e a energia de micro-ondas. É importante considerar que o campo elétrico dentro de uma cavidade apresenta inúmeras reflexões nas suas paredes metálicas, de forma que proporciona uma propagação de múltiplos modos na distribuição do campo eletromagnético no seu interior. No aquecimento por micro-ondas, as reflexões múltiplas causam o fenômeno de interferência, gerando ondas estacionárias e apresentando como resultado regiões de maiores e de menores intensidades de campo eletromagnético no espaço (MARSAIOLI, 1991; PEREIRA, 2007).

3.2.1 Aquecimento por micro-ondas

O aquecimento por micro-ondas ocorre, inicialmente, pela ruptura das pontes de hidrogênio fracas associada com a rotação dos dipolos de moléculas de água livre e com a migração eletroforética de sais livres, em um campo elétrico de polaridade rapidamente variável. Dessa forma, os constituintes iônicos aquosos dos alimentos e seus constituintes sólidos associados possuem influência direta sobre a maneira como o aquecimento por micro-ondas será conduzido (MARSAIOLI, 1991).

Os mecanismos mais relevantes no que tange o aquecimento de materiais biológicos por micro-ondas, são a rotação dipolar e a migração iônica. A ocorrência desses fenômenos caracteriza a conversão da energia de micro-ondas em térmica. Para o aquecimento gerado por meio da rotação dipolar as moléculas polares, como a água e também outras moléculas que podem se tornar dipolos induzidos devido às tensões causadas pelo campo, são influenciadas pela rápida mudança de polaridade do campo elétrico. Já na migração iônica, quando ocorre a submissão dos componentes ionizados com moléculas não ionizadas em um campo elétrico, estes

colidem aleatoriamente, de modo que a energia elétrica desses íons é convertida em calor durante as colisões (DECAREAU e PETERSON, 1986).

O mecanismo peculiar de aquecimento por micro-ondas resulta em elevação instantânea da temperatura no interior do material, diferente dos processos convencionais, nos quais a transferência de calor ocorre através da condução de energia da superfície do material para o seu interior, o que resulta em longos tempos de processo (BUFFLER, 1992).

As propriedades dielétricas dos materiais determinam a quantidade de energia acoplada em um produto, sua distribuição dentro do material e, consequentemente, o tempo e a frequência de micro-ondas necessária para o aquecimento em processos de transferência de energia por radiação. Assim, um dos principais propósitos relacionados às pesquisas sobre propriedades dielétricas dos materiais é determinar os mecanismos de interação entre o produto e a energia eletromagnética nas frequências de micro-ondas (MUDGETT, 1986).

3.2.2 Propriedades dielétricas dos materiais

As propriedades dielétricas afetam diretamente o mecanismo de interação entre o material e o campo elétrico aplicado. A maioria dos materiais dielétricos possui a habilidade de armazenar e dissipar energia elétrica de um campo eletromagnético, por meio de um conjunto de propriedades elétricas expressas em notação complexa conforme as equações (NELSON, 1973):

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{3.7}$$

$$\mathcal{E}^* = \left| \mathcal{E}^* \right| \cdot e^{-j\delta} \tag{3.8}$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{3.9}$$

em que ε^* representa a permissividade dielétrica complexa, ε ' a constante dielétrica (parte real), *j* a unidade imaginária e ε '' o fator (constante) de perda dielétrica.

Portanto, as Equações 3.7 a 3.9 podem representar valores absolutos de permissividade de um material, expressos em *F/m*. Comumente, os valores são referenciados ao espaço livre (vácuo), neste caso, os valores são referenciados como permissividade relativa. Os significados dos parâmetros que caracterizam os materiais dielétricos são definidos como:

<u>Permissividade (ou constante dielétrica, ε ') relativa</u>: é um parâmetro adimensional que mede a capacidade de um material de armazenar energia elétrica por unidade de volume;

Fator (ou constante de perda dielétrica, ε ") relativa: é um parâmetro adimensional dado pelas propriedades elétricas do material. Seu valor indica a capacidade do material de dissipar energia elétrica na forma de calor;

<u>Tangente de perdas</u>: é representado pelo quociente entre a permissividade e o fator de perda dielétrica, ou seja, tan $\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$. Seu valor indica a capacidade do material de ser penetrado por um campo elétrico e de dissipar essa energia na forma de calor.

Um material dielétrico pode ser definido como aquele que interage com um campo elétrico, pois contém portadores de cargas que podem ser deslocadas. Como todos os materiais, um material dielétrico consiste de um núcleo atômico positivo envolto por uma nuvem eletrônica negativa. A interação de um campo elétrico com um dielétrico tem sua origem devido às partículas carregadas com as cargas do campo aplicado. Desta forma, quando um campo elétrico externo é aplicado, seus elétrons são levemente deslocados em relação ao núcleo e, então, momentos dipolos são induzidos, proporcionando o fenômeno conhecido como polarização eletrônica dos materiais (JONES, 1986).

Quando a energia de micro-ondas é emitida em um material, parte da energia é refletida, parte é transmitida e parte é absorvida. As proporções da energia que se dividem nessas categorias são descritas de acordo com as propriedades dielétricas, forma e teor de umidade do material. A propriedade elétrica de maior importância na forma como essa energia será acoplada pelo material, é a permissividade do material (VENKATESH e RAGHAVAN, 2004).

A absorção da potência de micro-ondas e intensidade do campo no interior dos materiais varia de acordo com a profundidade de penetração, considerando que o poder de absorção do material é alterado no decorrer do processo. Deste modo, o fator de perda dielétrica ε " varia, não somente de uma região para outra do material, mas também dentro de um segmento particular do produto, conforme o aumento da temperatura proporcionado pelo aquecimento por micro-ondas (BUFFLER, 1992).

A maioria das aplicações industriais da radiação de micro-ondas está relacionada com a água, isso porque a água líquida apresenta os maiores valores de ε ' e tan δ , em relação a outros

materiais dielétricos. Desta forma, considera-se que os materiais constituídos por água são facilmente aquecidos por micro-ondas. Segundo Marsaioli (1991), a água destilada a 25 °C possui $\varepsilon' = 77,5$ e tan $\delta = 1,5$. 10^{-2} na frequência de 915 MHz e para a frequência de 2450 MHz os valores são $\varepsilon' = 76,7$ e tan $\delta = 15,7$. 10^{-2} .

No caso de alimentos, a absorção preferencial das micro-ondas pelas moléculas de água, promove um aquecimento focalizado, o que torna a aplicação desta energia conveniente, por exemplo, em processos de secagem de alimentos (PEREIRA, 2007).

Portanto, as características do aquecimento dos materiais por micro-ondas são relativas às suas propriedades dielétricas que influenciam nas transferências internas. Porém, mesmo no caso da secagem por micro-ondas, os fenômenos externos podem influenciar na velocidade de secagem, o que desperta o interesse pelos processos de secagem combinados, tais como secagem por convecção e micro-ondas ou secagem com vácuo e micro-ondas (BERTELI, 2005).

A distribuição do aquecimento por micro-ondas pode ser modificada de acordo com a geometria, tamanho, volume e composição do material. Para objetos cilíndricos e esféricos (da ordem de 3 a 4 mm) a densidade de potência volumétrica absorvida é maior e o aquecimento é centralizado, em contrapartida para objetos retangulares ocorre superaquecimento nos cantos e arestas (OHLSSON e RISMAN, 1978).

3.2.3 Secagem assistida por micro-ondas

Na secagem assistida por micro-ondas a remoção da umidade é acelerada, uma vez que a água presente no material é o principal componente responsável pela geração interna de calor. Algumas vantagens relacionadas à utilização da energia de micro-ondas compreendem o aquecimento instantâneo do material, a eficiência na conversão de energia, menores tempos de operação, possibilidade de aplicação em materiais termossensíveis e, em muitos casos, a obtenção de um produto final de qualidade superior (DECAREAU e PETERSON, 1986; METAXAS e MEREDITH, 1983).

Os principais parâmetros que devem ser considerados quando a energia de micro-ondas é aplicada ao processo de secagem referem-se à intensidade de micro-ondas aplicada de acordo com a quantidade de material que está sendo seco (densidade de potência) e o modo como a

energia é aplicada no material (de forma contínua ou pulsada) (RAGHAVAN e SILVEIRA, 2001).

Com o passar dos anos, diversos estudos têm reportado as vantagens obtidas, tanto em relação ao processo quanto à qualidade do produto final pela aplicação de micro-ondas na secagem de frutas e hortaliças, bem como sua combinação com outros métodos, como, por exemplo, convecção forçada, vácuo e liofilização. Entre essas pesquisas, a aplicação de micro-ondas é reportada em PRABHANJAN *et al.* (1995), KROKIDA e MAROULIS (1999), LIN *et al.* (1998), REYES *et al.* (2008), ARIKAN *et al.* (2012) para a secagem de cenoura, BAYSAL *et al.* (2003) para secagem de cenoura e alho, ANDRÉS *et al.* (2004) para maçãs, MASKAN (2000), PEREIRA (2007) para banana, TULASIDAS *et al.* (1995) para uvas, KHRAISHEH *et al.* (2004) para batata, SOYSAL *et al.* (2009) para pimenta vermelha, FUNEBO e OHLSSON (1998) para maçã e cogumelo, FIGIEL *et al.* (2010) para beterraba. Os autores dos estudos citados relataram que o emprego de radiação na secagem proporcionou a obtenção de produtos de qualidade superior em relação à cor, aroma, sabor e textura, além de redução no tempo de processo comparativamente a secagem convencional. A maioria dessas pesquisas empregou a frequência de 2450 MHz, pelo fato de esta ser mais acessível industrialmente.

A secagem com aplicação de micro-ondas representa um método alternativo aos processos convencionais, principalmente no que se refere ao período de taxa decrescente. Nesta etapa, a remoção da umidade é mais difícil, pois a superfície seca do material promove uma barreira à evaporação, exigindo alto consumo de energia. Diante disto, a secagem pode ser realizada em um primeiro instante pelo método convencional seguido da aplicação de micro-ondas ou também com a aplicação de diferentes níveis de potências de acordo com as necessidades de transferência de calor e massa de cada período da curva de secagem.

Na literatura estudos reportam a combinação da energia de micro-ondas com o processo convencional por convecção, de forma que a secagem foi dividida em dois estágios. Durante a fase inicial foi empregada a secagem convectiva com ar quente e durante a etapa final foi realizada a aplicação de micro-ondas combinada ou não com convecção (FENG e TANG, 1998, PRABHANJAN *et al.*, 1995, MASKAN, 2001; ROSA, 2012). O emprego da radiação em um segundo estágio da secagem, é utilizado a fim de acelerar o processo, de forma que a energia de micro-ondas atue de forma específica na sua etapa mais lenta, proporcionando, na maioria dos

casos, maior eficiência energética e melhor qualidade do produto final. Isto porque, o tempo de exposição do material a altas temperaturas é reduzido em comparação à secagem convencional.

A secagem de cenoura assistida por micro-ondas é amplamente reportada na literatura, sendo conduzida em processos com aplicação contínua de radiação ou através da combinação de micro-ondas com outras fontes de calor. Prabhanjan et al. (1995) estudaram a secagem assistida por micro-ondas combinada com ar quente de cubos de cenoura e compararam com a secagem puramente convectiva. As densidades de potência investigadas foram de 2 e 4 W.g⁻¹ e as temperaturas do ar de 40 e 60 °C. Foi constatado que a aplicação de micro-ondas reduziu o tempo de processo em 80 e 90% paras as condições em que a maior potência de micro-ondas foi aplicada (4 W.g⁻¹ e 45 °C; 4 W.g⁻¹ e 60 °C) e em 25 e 35%, para as condições com menor potência aplicada (2 W.g⁻¹ e 45 °C; 2 W.g⁻¹ e 60 °C). Em ambos os casos, houve redução no tempo de processo em relação à secagem convencional. Os autores constataram ainda que tanto a temperatura do ar quanto a potência de micro-ondas influenciaram na taxa de secagem, de modo que, para uma mesma temperatura, a taxa de secagem foi maior quando a maior potência de micro-ondas foi aplicada à secagem. Já, para uma mesma potência de micro-ondas, o efeito da temperatura foi mais pronunciado quando utilizou-se a menor potência. Além disso, foi verificado menor encolhimento para as amostras secas com a maior potência, ao passa que a secagem convencional proporcionou maior encolhimento dos cubos. A taxa de reidratação foi maior para a secagem com aplicação de maior potência e temperatura do ar.

Reyes *et al.* (2008) avaliaram diferentes métodos de secagem para micro-partículas de cenoura, como leito pulso-fluidizado, túnel, liofilização a vácuo, aplicação de micro-ondas e a combinação destes métodos. Os autores compararam a secagem em leito pulso-fluidizado com e sem aplicação de micro-ondas e verificaram que o tempo de secagem reduziu de 175 para 72 minutos quando micro-ondas foram empregadas na secagem. Os resultados mostraram também que a secagem com micro-ondas proporcionou as amostras textura mais macia, apresentando 4,7 N no teste de ruptura. Já, para as amostras secas sem a aplicação de micro-ondas este valor foi de 11,9 N, portanto, mais duras.

Lin *et al.* (1998) estudaram a secagem de fatias de cenoura com micro-ondas a vácuo, liofilização e secagem convectiva a 70 °C. A aplicação de micro-ondas foi realizada da seguinte maneira: 3 kW durante 19 minutos (3 W.g⁻¹), 1 kW por 4 minutos (1 W.g⁻¹) e 0,5 kW durante 10

minutos (0,5 W.g⁻¹), com pressão de vácuo constante de 100 mmHg. De acordo com os autores, para atingir um mesmo conteúdo de umidade final (10% b.s.), a secagem assistida por microondas a vácuo resultou no menor tempo de processo (33 minutos), já a secagem convectiva e a liofilização permaneceram durante 8 e 72 horas, respectivamente. Para as amostras secas por micro-ondas a vácuo as perdas totais de α e β -caroteno foram de 3,2%, em contrapartida a secagem convectiva resultou em maiores perdas destes componentes, aproximadamente 19,2%. Além disso, a secagem dielétrica a vácuo proporcionou maior preservação do conteúdo de vitamina C (79%), enquanto que, para as amostras secas por convecção este valor foi de 38%. A liofilização não provocou alterações significativas nos conteúdos de vitamina C, α e β -caroteno. Os resultados mostraram ainda que a coloração das amostras foi mais preservada quando foi empregada a secagem com micro-ondas a vácuo em relação à secagem convectiva.

Wang e Xi (2005) investigaram o efeito da aplicação de micro-ondas em mais de um estágio, com variação da potência aplicada durante a secagem, para fatias de cenoura. Foi analisada a relação entre as potências de micro-ondas aplicadas nos dois estágios e o tempo de duração do primeiro estágio no que se refere à razão de reidratação e teor de β-caroteno. Primeiramente, os autores observaram que para uma mesma carga de material (200 g) e aplicação de diferentes potências de micro-ondas (120, 160 e 240 W), a taxa de secagem foi maior quando a maior potência foi aplicada. Os autores também constataram que o consumo energético (expresso em kWh) para a menor potência de micro-ondas aplicada à secagem foi maior em relação às potências mais elevadas, considerando um mesmo conteúdo de umidade final. Isso foi explicado devido ao longo tempo de secagem requerido quando a menor potência foi utilizada. Em relação ao efeito da aplicação de micro-ondas em mais de um estágio, os autores observaram que com o aumento da densidade de potência disponível no estágio inicial até um determinado valor (aproximadamente 2,0 kW/kg) a razão de reidratação das amostras diminuiu consideravelmente e aumentou com densidades de potências maiores a partir desse ponto. Com o aumento da densidade de potência disponível no segundo estágio (com duração fixa do primeiro estágio) a razão de reidratação aumentou até um limite de 2,8 kW/kg, contudo o teor de caroteno das amostras diminuiu.

Krokida e Maroulis (1999) compararam o efeito de três métodos de secagem: secagem convectiva a 70 °C, secagem assistida por micro-ondas e secagem assistida por micro-ondas a

vácuo na qualidade de diferentes vegetais, dentre eles a cenoura. Os autores constataram que a secagem com aplicação de micro-ondas apresentou influência significativa nas propriedades estruturais, ópticas e de textura dos vegetais. Foi observado que a secagem com ambos os métodos de micro-ondas diminuiu a densidade *bulk* das amostras de forma mais significativa para a cenoura e batata. Verificou-se também que as amostras secas com micro-ondas apresentaram maior porosidade em relação às amostras desidratadas por secagem convectiva (70 °C). Os resultados mostraram que menor força foi requerida no teste de compressão para a quebra das amostras secas em ambos os métodos de micro-ondas, o que caracteriza as amostras como mais macias. No que se refere à cor, a secagem tanto com micro-ondas quanto com micro-ondas a vácuo proporcionaram maior preservação da cor das amostras em relação ao método convencional.

3.3 Fundamentos de encolhimento

O encolhimento é um fenômeno que ocorre durante a secagem da maioria dos produtos alimentícios, provocando alterações nas dimensões originais do material, relacionadas com as modificações ocasionadas em sua estrutura. Dessa forma, o estudo do encolhimento é de grande relevância para obter-se um melhor entendimento do processo de secagem.

A natureza do produto e o método de secagem afetam a estrutura do material seco de forma significativa, sendo que um processo de secagem lento resulta em encolhimento uniforme e mais pronunciado, em contrapartida a secagem rápida pode proporcionar menor encolhimento (KROKIDA e MAROULIS, 1997).

Segundo Van Arsdel (1973) durante a secagem ocorrem mudanças no tecido celular do material como resultado do encolhimento, o qual é função da diminuição da tensão que o líquido exerce sobre a parede celular do material devido à evaporação da água. As mudanças no tecido celular são caracterizadas por rachaduras e fissuras originadas pela variação do volume, além de um encolhimento não homogêneo do material que pode gerar severas deformações no produto seco.

Dados experimentais obtidos por Kilpatrick *et al.* (1955) apud Stanley e Charm (1963), para estudos com vegetais, mostraram que o encolhimento durante a fase inicial de secagem é considerado praticamente igual ao volume de água evaporado. Porém, nas etapas posteriores de secagem o encolhimento é menor, de forma que para teores de umidade abaixo de 15 a 20% não ocorre mais decréscimo substancial no volume do material. Adicionalmente, estudos experimentais realizados para alguns materiais demosntraram que a taxa de secagem pode não apresentar comportamento constante, pois à medida que ocorre a remoção de umidade, obtém-se mudanças na área superficial do material proporcionando uma taxa de secagem não constante, mesmo no período inicial, devido à influência dos efeitos de encolhimento (GORLING, 1958 apud STANLEY e CHARM, 1963).

De acordo com Madiouli *et al.* (2007), no caso da redução do volume durante a secagem ser proporcional a perda de água o encolhimento é definido como ideal. Porém, quando a redução do volume é menor do que o volume de água evaporada, o encolhimento é considerado como não ideal. Neste caso, o processo de secagem pode ocasionar o aumento da porosidade do material.

Assim, o encolhimento pode ser medido pela razão entre o volume do material ao longo do processo (V) e o seu volume inicial (V_0). Esta razão é definida como o coeficiente de encolhimento descrito pela Equação 3.10 (MADIOULI *et al.*, 2007):

$$S = \frac{V}{V_0} \tag{3.10}$$

O estudo do encolhimento de pera, cenoura, batata, batata doce e alho foi realizado por Lozano *et al.*(1983). Os autores relataram que a redução do volume durante a secagem é uma função linear da umidade. Portanto, a mudança no coeficiente de encolhimento foi representada como uma função linear da umidade representada pela equação:

$$S = E'\frac{X}{X_0} + B \tag{3.11}$$

em que *X* é o ter de umidade no tempo *t*, X_0 é o teor de umidade inicial e *B* e *E*' são parâmetros do modelo linear de encolhimento a serem determinados.

De acordo com Van Arsdel *et al.* (1973) o encolhimento apresenta uma relação linear com a quantidade de água evaporada, principalmente para baixas taxas de secagem. Isso porque, o conteúdo de umidade no centro da partícula, geralmente, não é muito maior do que o da superfície. Dessa forma, estresses internos são minimizados e o material encolhe integralmente em um núcleo sólido. No final da secagem o encolhimento é reduzido e, então, o tamanho final do material é fixado antes do final da secagem. Para altas taxas de secagem as camadas externas do material se tornam rígidas e seu volume final é fixado mais cedo durante a secagem. Com isso, no decorrer da secagem os tecidos internos podem se romper formando uma estrutura aberta.

Na literatura são encontrados trabalhos que consideram a densidade aparente na medida do encolhimento e também estudos que utilizam somente a medida direta deste parâmetro através de instrumentos, tais como paquímetros. Ratti (1994) comparou o método proposto por Lozano *et al.* (1983), que considera a densidade aparente do material, com a medida direta do encolhimento com paquímetro, para fatias de batatas. O autor observou que a diferença entre os métodos foi maior para baixos teores de umidade, em que a deformação torna-se irregular. Porém, esta diferença foi considerada aceitável, pois permaneceu dentro da zona de máximo erro permitido (menor que 10%). Resultados similares foram encontrados para outras geometrias de vegetais, confirmando que o método direto, considerando a média de uma série de medições, pode ser apropriado para determinar a redução do volume da amostra em toda a faixa de conteúdo de umidade. Moreira *et al.* (2000) também compararam estes dois métodos para as medidas de maças e encontraram boa concordância para as medidas efetuadas por ambos os métodos.

As modificações estruturais de frutas e hortaliças decorrentes do processo de secagem são amplamente relatadas na literatura. Dentre essas, o encolhimento é, comumente, apresentado como uma função da umidade do produto e influência as propriedades físicas do material, como a densidade e a porosidade.

Wang e Brennan (1995) estudaram as mudanças estruturais da batata durante a secagem e concluíram que tanto a densidade quanto a porosidade são afetadas pelo encolhimento. No período inicial da secagem a densidade aumentou com o decréscimo do teor de umidade, até atingir um ponto máximo. A partir deste momento, a densidade diminui com o decréscimo da umidade. Os autores observaram ainda que a densidade do material diminuiu com o aumento da temperatura do ar e que a porosidade não foi afetada pela temperatura e aumentou com o decréscimo no teor de umidade. Para o encolhimento, foi verificado que em altas taxas de secagem uma camada externa e rígida é formada, sendo que a partir deste momento o volume do material não apresentou variações significativas até o final da secagem. Ainda, os resultados

demosntraram que o encolhimento foi maior quando a menor temperatura do ar foi utilizada na secagem e apresentou uma relação linear com o teor umidade do produto.

Yadollahinia *et al.* (2008) estudaram a secagem convectiva de batata em monocamada e observaram que o encolhimento apresentou um comportamento linear com o teor de umidade adimensional até o valor de 0,3. A partir deste ponto até o valor de 0,1 o encolhimento desacelerou. Para valores de adimensional de umidade menores que 0,1, a redução na área das fatias de batata decresceu de forma mais rápida e o comportamento do encolhimento foi alterado, não sendo mais linear. Isso porque, neste período, as fatias apresentaram forma irregular. A temperatura do ar apresentou influência a partir do momento em que o encolhimento não foi mais linear. O menor encolhimento foi observado na maior temperatura do ar de secagem e, consequentemente, no menor tempo de processo.

Ratti (1994) observou, por sua vez, que a temperatura do ar não apresentou efeito significativo durante a secagem de batata, cenoura e maça. Para a cenoura, o coeficiente de encolhimento volumétrico durante a secagem convectiva (1,5 e 3,0 m/s; $T_{ar} = 50$ °C) apresentou valores entre 0,1 e 0,12, sendo o encolhimento representado como uma função linear da umidade.

Hatamipour e Mowla (2002) investigaram o encolhimento de partículas de cenoura cilíndricas, durante a secagem em leito fluidizado com partículas inertes. Os autores observaram que a presença de inertes, o diâmetro da amostra, a temperatura e a velocidade do ar não apresentaram efeitos significativos no encolhimento da cenoura. Contudo, a umidade relativa do ar influênciou na taxa de secagem, de modo que o endurecimento da superfície externa do material provocou a diminuição da taxa de secagem e, consequentemente, a redução no volume do material. Os autores observaram também que o encolhimento volumétrico, assim como, o encolhimento superfícial apresentaram uma relação linear com o teor de umidade do material, no entanto o encolhimento linear foi uma função logarítmica do teor de umidade. Os valores para o coeficiente de encolhimento volumétrico variaram entre 0,1 e 0,2, o que representa um encolhimento de 80 a 90 % em relação ao volume inicial da partícula.

Com o passar dos anos, estudos têm reportado a influência da aplicação de micro-ondas e sua combinação com outros métodos, no encolhimento de diferentes produtos alimentícios. Krokida e Maroulis (1997) estudaram o encolhimento de alguns vegetais, dentre eles a cenoura, durante a secagem em diferentes secadores. Os autores concluíram que o encolhimento ocorreu de forma menos intensa para a secagem em micro-ondas em comparação a secagem com ar quente. Porém, a liofilização resultou em menor encolhimento do material em relação aos outros métodos de secagem.

Maskan (2001) estudou o encolhimento de kiwi para a secagem com aplicação de microondas durante todo o processo e também para o método combinado que consistiu da secagem inicial convectiva seguida de secagem com micro-ondas. Os resultados demonstraram que o método combinado resultou em menor encolhimento do produto. O autor também constatou que a secagem somente convectiva apresentou encolhimento intermediário.

Os dados experimentais de encolhimento são comumente ajustados a modelos matemáticos como uma função da evolução da umidade. Pinedo (2003) estudou a secagem a vácuo de cenoura e abóbora e ajustou os dados experimentais ao modelo proposto por Suzuki *et al.* (1976). Este modelo define o encolhimento como ideal, quando a redução do volume é igual ao volume de água removida. O autor relatou que o modelo testado foi apropriado para o ajuste dos dados experimentais, representando o encolhimento de forma apropriada.

Comportamento linear do volume em função do teor de umidade foi observado para diferentes produtos durante a secagem convectiva, como em Zogzas *et al.* (1994) e Hatamipour e Mowla (2002) para cenouras, em Al-Muhtaseb *et al.* (2004) para gel de amido de batata e em Moreira *et al.* (2000) para maças.

Entretanto, modelos não lineares têm ajustado melhor os dados de encolhimento de alguns materiais durante diferentes tipos de secagem. Koç *et al.* (2008) estudou o encolhimento de marmelo durante a secagem convencional (leito fluidizado e bandeja), infravermelho, desidratação osmótica combinada a secagem convectiva e liofilização. Os autores reportaram que modelos não lineares descreveram melhor as mudanças no encolhimento durante a secagem do que os modelos lineares, sendo que o modelo quadrático proposto por Mayor e Sereno (2004) foi o escolhido devido a sua simplicidade. Nahimana *et al.* (2011) reportaram que o encolhimento radial de cenouras durante a secagem convectiva foi melhor correlacionado como uma função de potência da umidade. Considerando este fato, os autores propuseram um modelo para o encolhimento de modelo de Nahimana. Adicionalmente, Nahimana e Zhang (2011) estudaram o encolhimento de secagem de fatias de cenouras com micro-ondas a vácuo e constataram que os dados de encolhimento radial foram melhor ajustados a um modelo cúbico.

O encolhimento do material é considerado um fator importante durante a sua secagem e pode afetar significativamente a qualidade do produto final. Neste contexto, o estudo do encolhimento durante a secagem com aplicação de micro-ondas, torna-se interessante no que se refere a qualidade do produto obtido, contribuindo para as pesquisas já realizadas até o momento.

3.4 Cor

Os fatores que, geralmente, conduzem a preferência do consumidor na escolha de um alimento são a cor, a textura e o aroma. Dentre esses fatores, a cor destaca-se como um atributo decisivo, visto que, representa a qualidade que mais facilmente desperta a atenção do consumidor, pois o primeiro contato é feito através deste atributo (BOBBIO e BOBBIO, 2001).

O método utilizado para expressar a cor de um objeto usando notações científicas (números) é denominado de sistema ou espaço de cores. No estudo da percepção das cores, um dos primeiros espaços de cores definido matematicamente foi o CIE XYZ, proposto em 1931 pela CIE (*Commission Internationale I'Éclairage*). Este sistema menciona a cor em três quantidades (X, Y, e Z), denominadas de valores de triestímulos, os quais representam as proporções das três cores primárias – vermelho, verde e azul (SCHANDA, 2007).

Em 1976, a CIE definiu o sistema de cor denominado CIELAB, proveniente do sistema CIE XYZ, que também suporta a teoria de que a percepção da cor é baseada em três receptores distintos nos olhos (vermelho, verde e azul). Na escala de cor CIELAB, os pontos estão em um espaço tridimensional e correspondem as cores de forma mais próximas de como são percebidas pelo olho humano, sendo considerada uma escala uniforme. Em uma escala de cor uniforme, distâncias iguais entre dois pontos do gráfico correspondem a diferenças igualmente percebidas pelo olho humano (MACDOUGALL 2002; FERREIRA, 1991; HUNTERLAB, 1996).

No espaço de cores CIELAB os eixos são identificados pelas coordenadas retangulares cartesianas L^* , $a^* e b^*$, conforme mostra a Figura 3.6a. O valor de L^* é a medida da luminosidade de um objeto e é quantificado em uma escala na qual o valor máximo de L^* é 100, que representa o branco e o valor mínimo é zero, que representa o preto. O valor da coordenada de cromaticidade a^* é a medida da quantidade de vermelho para valores positivos ou verde para valores negativos. O valor da coordenada b^* representa a medida da cor amarela para valores positivos ou azul para valores negativos. Para cores neutras as coordenadas $a^* e b^*$ aproximam-

se de zero (cinza) e aumentam para cores mais saturadas ou intensas (MINOLTA, 1991; MACDOUGALL 2002; HUNTERLAB, 1996).

Na Figura 3.6b é possível observar a representação das coordenadas colorimétricas para o espaço de cor L^* , $a^* \in b^*$.



Figura 3.6: Diagrama representando o espaço de cores CIELAB (a) e representação do sólido de cor para o espaço colorimétrico L^* , $a^* e b^*$ (b).

Fonte: (a) HUNTERLAB (1996); (b) Adaptado de MINOLTA (2007).

A diferença total de cor (ΔE^*) pode ser calculada a partir dos parâmetros L^* , $a^* \in b^*$. O valor de ΔE^* representa as diferenças entre L^* , $a^* \in b^*$ de duas amostras em um único valor numérico, definido pela Eq. 3.12 (MACDOUGALL, 2002):

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$
(3.12)

em que:

$$\Delta L^* = L^*_{amostra} - L^*_{padrão} \tag{3.13}$$

$$\Delta a^* = a^*_{amostra} - a^*_{padrão} \tag{3.14}$$

$$\Delta b^* = b^*_{amostra} - b^*_{padrão} \tag{3.15}$$

onde $L^*_{amostra}$, $a^*_{amostra}$ e $b^*_{amostra}$ representam os parâmetros de cor da amostra submetida a algum tipo de processamento e $L^*_{padrão}$, $a^*_{padrão}$ e $b^*_{padrão}$ os parâmetros de cor da amostra de referência.

Além das coordenadas retangulares cartesianas padrão, o sistema de cor pode ser definido pelas coordenadas cilíndricas L^* , C^* , H° ($L^* = lightness$; $C^* = chroma$; $H^\circ = hue angle$), sendo empregado para facilitar a comparação ou a compreensão das cores. O parâmetro H° representa o ângulo da matriz e corresponde à tonalidade, já o parâmetro C^* é a cromaticidade e representa o índice de saturação. Os parâmetros de cor do sistema CIELCH são obtidos matematicamente a partir das coordenadas retangulares do sistema CIELAB, por meio das equações (MINOLTA, 1991; MACDOUGALL, 2002):

$$H^{\circ} = \arctan\left(\frac{b^{*}}{a^{*}}\right) \tag{3.16}$$

$$C^* = (a^* + b^*)^{1/2} \tag{3.17}$$

Durante a secagem de alimentos podem ocorrer alterações químicas e físicas, comprometendo a qualidade do produto desidratado em termos de cor, valor nutricional, sabor, aroma e textura. Os principais fatores responsáveis pela deterioração de alimentos desidratados são: oxidação de lipídeos, reações de escurecimento enzimático e não enzimático, degradação de pigmentos e reações de oxidação de vitaminas (CELESTINO, 2010; VANDIVAMBAL e JAYAS, 2007). Dentre estes fatores, os três últimos são os que, comumente, provocam alterações na cor dos alimentos submetidos a tratamentos térmicos. (BARREIRO *et al.*, 1997, FELLOWS, 2006).

A reação de escurecimento não enzimático com maior probabilidade de ocorrência durante a secagem é a reação de *Maillard*. Esta reação envolve aminoácidos e açucares redutores na formação de compostos poliméricos escuros, denominados de melanoidinas. As reações de escurecimento não enzimático têm início na temperatura de 70 °C, no entanto, mesmo com a diminuição da temperatura, a produção de melanoidinas ainda continua. (BOBBIO e BOBBIO, 2001; CELESTINO, 2010).

O tipo de açúcar presente no alimento acelera o processo de escurecimento, sendo as hexoses (monossacarídeos com seis carbonos - glicose e frutose) os mais reativos (BOBBIO e BOBBIO, 2001). Portanto, a cenoura é um vegetal suscetível à reação de *Maillard*, devido à presença de açucares redutores (glicose e frutose) em sua composição (HOLLAND *et al.*, 1991).

A degradação de pigmentos também representa um dos fatores que causam escurecimento durante o processamento de frutas e hortaliças. No caso da cenoura, vegetal empregado neste estudo, os carotenóides são os pigmentos de maior relevância, responsáveis pela coloração amarela, alaranjada e vermelha. Estes compostos são suscetíveis às reações oxidativas em virtude da sua estrutura altamente insaturada, sendo facilmente oxidados na presença de oxigênio. Sua sensibilidade depende ainda da presença de luz e temperatura, além da atividade de água e acidez do produto, sendo que altas temperaturas conferem maior degradação desses pigmentos alterando a coloração original do produto (WAGNER e WARTHESEN, 1995; FELLOWS, 2006; FENNEMA, 2010).

Estudos sobre alterações na coloração de frutas e hortaliças durante o processamento têm reportado a relação entre a variação da cor com os pigmentos do produto e também com os parâmetros do processo. Kalluf (2006) avaliou a coloração da polpa de abóbora durante a secagem convectiva (50 °C, 55 °C e 60 °C), vegetal semelhante à cenoura em termos de coloração e presença de carotenóides. Foi constatado que a redução do valor da luminosidade (*L**) apresentou comportamento semelhante à perda de β -caroteno, indicando que a oxidação deste pigmento durante a secagem provocou o escurecimento da amostra, com consequente redução da luminosidade do produto. Em relação ao efeito da temperatura do ar, foi observado que as amostras secas com maior temperatura do ar apresentaram coloração mais escura.

Krokida *et al.* (1998) estudaram o efeito da temperatura e umidade do ar sobre as mudanças de cor para maçã, banana, cenoura e batata durante a secagem convectiva e a vácuo. Os autores verificaram que o parâmetro L^* (luminosidade) mostrou ser praticamente independente das condições e do método de secagem para todos os produtos. Contudo, os parâmetros $a^* e b^*$ seguiram uma cinética de primeira ordem, mostrando-se dependentes tanto da temperatura quanto da umidade do ar durante a secagem.

Na literatura são encontrados trabalhos que relatam as vantagens da aplicação de microondas na secagem de frutas e hortaliças no que se refere à obtenção de produtos com melhor coloração quando comparada a secagem convencional com ar quente. Maskan (2000) secou fatias de banana em dois processos, secagem convectiva a 60 °C e secagem assistida por micro-ondas. O autor verificou que a secagem com radiação proporcionou menores perdas da coloração e escurecimento menos pronunciado do produto. Lin *et al.* (1998) constataram que fatias de cenoura secas com ar quente apresentaram coloração mais escura e também menor intensidade de cor vermelha e amarela, em relação às fatias desidratadas por micro-ondas a vácuo e liofilização.

Arikan *et al.* (2012) estudaram diferentes modos de aplicação de micro-ondas para a secagem de cenoura. Os processos de secagem foram realizados com aplicação de radiação contínua e com aplicação de micro-ondas intermitente e os dois processos foram combinados com ar em diferentes temperaturas. Os resultados mostraram que os dois modos de secagem apresentaram valores dos parâmetros *a** e *b** menores do que o produto *in natura*, demonstrando a perda da coloração das amostras desidratadas. Entretanto, a secagem com micro-ondas intermitente proporcionou maior preservação da cor em relação ao processo contínuo. Os autores reportaram também que a secagem intermitente com maior densidade de potência (2,23 W.g⁻¹) aliada à menor temperatura do ar (20 °C) forneceu um produto com melhor coloração e mais semelhante ao produto fresco.

Prabhanjan *et al.* (1995) também estudaram a secagem convectiva combinada à aplicação de micro-ondas para a cenoura. Os autores constataram que a utilização da menor densidade de potência (2 W.g⁻¹, 45 °C e 60 °C) proporcionou maior preservação da coloração das amostras, independente da temperatura do ar utilizada, em comparação ao produto seco com densidade de potência máxima (4 W.g⁻¹, 45 °C e 60 °C) e somente por secagem convectiva (45 °C e 60 °C).

Summu *et al.* (2005) analisaram a alteração da cor de fatias de cenoura durante a secagem com aplicação de micro-ondas somente após as amostras atingirem um teor de umidade de 0,47 (kg_{umidade}/kg_{ss}) e a combinação desta com a secagem em lâmpada de halogênio. Eles verificaram que a aplicação de micro-ondas proporcionou menor perda da coloração do produto, quando comparada a secagem sem aplicação de micro-ondas. O produto seco com micro-ondas aliada a lâmpada de halogênio não apresentou diferenças significativas na cor em relação à secagem assistida a micro-ondas com maior potência. A aplicação da máxima potência de micro-ondas (560 W) e potência intermediária (397 W) resultou em maiores valores de luminosidade do produto. Isto porque, o menor tempo de secagem nessas condições, contribuiu para a manutenção da cor das amostras, pois os carotenos foram menos degradados devido ao menor tempo de exposição ao calor.

Uma vez que a cor é um parâmetro de qualidade dos alimentos desidratados, sendo diretamente afetada pelas condições de processo, torna-se interessante o estudo da influência da

potência de micro-ondas e da temperatura do ar de secagem nas características de coloração do produto final. Desta forma, é possível verificar em quais condições de processo a preservação da cor será mais acentuada, buscando um produto com melhor qualidade.

3.5 Textura

A textura representa um dos atributos de qualidade dos produtos alimentícios. Dentre os parâmetros relacionados à textura, a dureza de um produto indica a sua maciez e, por isso, representa um fator que exerce forte influência na aceitação do consumidor.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, a textura é definida como o conjunto de propriedades reológicas e estruturais (geométricas e de superfície) de um alimento, perceptíveis pelos receptores mecânicos, táteis e, eventualmente pelos receptores visuais e auditivos (ABNT, 1993).

Os principais testes para avaliação da textura em alimentos compreendem a punção, penetração, compressão, cisalhamento e relaxação, os quais são medidos com a utilização de vários tipos de ponteiras em diferentes níveis de força-deformação. Os testes de punção e cisalhamento causam a ruptura do material analisado. Por outro lado, os testes de compressão e relaxação permitem mensurar a textura do produto apenas deformando-o, o que possibilita a medida deste parâmetro ao longo do tempo, do mesmo material. Para as frutas e hortaliças, os dois modos empregados na medida da textura, permitem a aquisição de dados relativos à consistência e resistência dos tecidos vegetais, mediante a aplicação de uma determinada força relacionada com a deformação ou com o tempo total do teste (ABBOTT, 1999; LI *et al.*, 1998).

Por meio dos testes de textura é possível mensurar diversos parâmetros que incluem a dureza, adesividade, coesividade, elaticidade, gomosidade, mastigabilidade e viscosidade (ROSENTHAL, 1999). A dureza, também conhecida como firmeza, é representada pela força máxima em testes de textura. Este parâmetro é, geralmente, mensurado por testes de compressão e/ou penetração, que demonstram uma relação satisfatória com as condições reais e, portanto, são amplamente utilizados para auxiliar na indicação de qualidade do produto (ABBOTT, 1999; ROSENTHAL, 1999).

De acordo com Civille e Szczesniak (1973), a dureza é definida fisicamente como a força necessária para produzir uma certa deformação e, em termos sensoriais, representa a força
requerida para a compressão de uma substância entre os dentes, no caso de materiais sólidos. Dessa maneira, este parâmetro pode ser correlacionado com a mordida humana durante a ingestão do alimento, sendo que valores menores caracterizam produtos macios e valores maiores produtos mais duros que necessitam de maior energia para mastigação.

As frutas e hortaliças constituem as partes comestíveis das plantas e a textura destes vegetais está intrinsecamente associada com a composição e estrutura da parede celular (ROSENTHAL, 1999). Mais especificamente, a textura dos vegetais é determinada pelos polissacarídeos constituintes da parede celular e da lamela média. Dentre os polissacarídeos da parede celular, os principais são a pectina, a hemicelulose e a celulose, enquanto que a lamela média é constituída, predominantemente, de polissacarídeos pécticos reticulados com íons Ca²⁺ (VAN BUREN, 1979).

Os processos de secagem podem ocasionar modificações na textura dos vegetais, resultando em alterações na composição e estrutura da parede celular e na lamela média, o que afeta as características do produto seco. Geralmente, a secagem rápida com alta temperatura do ar ocasiona maiores alterações na textura dos alimentos do que taxas moderadas de secagem e baixas temperaturas. A medida que a água é removida durante a secagem, os solutos movimentam-se do interior do alimento para a sua superfície. Desta forma, a evaporação da água acarreta na concentração de solutos na superfície do poduto. Elevadas temperaturas do ar provocam mudanças químicas e físicas complexas nos solutos presentes na superfície e a formação de uma casca dura, fenômeno conhecido como endurecimento superficial (FELLOWS, 2006).

Posteriormente a secagem, a textura do material é dependente do estado da parede celular e dos polissácarideos da lamela média, que determinarão o grau de resistência do material as interferências de forças externas, tanto durante a compressão quanto durante ao corte (STEPIÉN, 2008).

A análise da dureza de frutas e hortaliças é amplamente reportada na literatura, sendo que observado, em alguns casos, dois padrões comportamentais deste parâmetro durante a secagem. Krokida *et al.* (2000) avaliaram a textura de maça, banana, cenoura e batata durante a secagem convectiva a 70 °C, através da dureza pelo teste de compressão. Os autores observaram que até o teor de umidade de 1,8 (kg_{umidade}/kg_{ss}) a desidratação provocou o amolecimento dos vegetais,

resultando em diminuição da força máxima de compressão. Já, para um teor de umidade menor que este, a força máxima de compressão aumentou. A maior força de compressão observada para baixos teores de umidade foi relacionada com mudanças fisico-químicas irreversíveis, tais como aumento da cristalinidade, danos estruturais na parede celular, aglomeração de microfibrilas e cisão da lamela média, o que resultou em maior dureza do material.

Troncoso e Pedreschi (2007) avaliaram a textura de batatas durante a secagem convectiva (50, 60, 70 e 80 °C) e também relataram dois padrões comportamentais da textura. A variável resposta analisada foi a força máxima, que representou a dureza das batatas durante o período de secagem. Foi constatado que a força máxima diminuiu de valor com o avanço da secagem, provavelmente devido a danos na superfície do material. Porém, no decorrer da secagem, especificamente para valores de umidade menores que 1,1 (kgunidade/kgss), a estrutura do produto começou a entrar em colapso, transformando-se em uma estrutura cristalina que conduziu ao endurecimento do produto, consequentemente a força máxima aumetou. Os autores verificarm ainda, que o aumento da tempertura do ar resultou em maiores valores da força máxima, uma vez que altas taxas de secagem conduziram a formação de uma crosta na superfície do produto, tornando-o mais duro.

De acordo com De Roeck *et al.* (2008) e Vervoort *et al.* (2012), o processamento térmico de cenouras em conserva ocasionou perda na dureza do produto (amaciamento do tecido celular), que foi relacionada a danos na membrana celular, como a degradação e solubilização da pectina, o que resultou na perda de turgor das amostras.

Na literatura são encontrados trabalhos que reportam a correlação entre o parâmetro de dureza com a mastigabilidade do produto. Guiné e Barroca (2011) analisaram o perfil de textura, através do teste de dupla compressão, para amostras de abóbora e pimentão desidratados por liofilização e secagem convectiva (30, 50 e 70 °C). De um modo geral, os vegetais desidratados pelos dois métodos apresentaram menor dureza do que os vegetais frescos. A dureza e a mastigabilidade seguiram uma tendência similar, sendo correlacionadas para os dois produtos analisados. De modo que, as amostras mais duras foram as que apresentaram também maiores valores para o parâmetro de mastigabilidade, ou seja, maior energia foi requerida durante a mastigação. Além disso, foi observado que as amostras liofilizadas caracterizaram-se por serem mais macias que as secas a 30 °C, porém foram mais duras que as amostras secas com

temperatura de 50 °C. Andrade (2006) avaliando a dureza de queijos coalho também encontrou uma relação entre a dureza e mastigabilidade. Do mesmo modo, o autor relatou que as amostras mais firmes foram também as que apresentaram maior resistência à matigação.

A secagem de produtos alimentícios assistida por micro-ondas tem sido reportada como uma potencial alternativa para a obtenção de produtos desidratados com textura macia e, portanto, desejáveis para o consumidor. A aplicação da energia de micro-ondas e a combinação desta com vácuo ou convecção resultou em produtos mais macios, comparados a secagem puramenente convectiva para cenouras (KROKIDA e MAROULIS, 1999 e LIN *et al.*, 1998), oxicoco (*cranberries*) (YONGSAWATDIGUL e GUNASEKARAN, 1996) e alho (CUI *et al.*, 2003). Isso indica que a aplicação da radiação durante a secagem mostrou-se efetiva, evitando o endurecimento acentuado na superície do produto, fenômeno que ocorre durante a desidratação de alimentos e é indesejável, quando observado de forma pronunciada (ROSENTHAL, 1999).

Lin *et al.* (1998) avaliaram a dureza de cenouras durante a secagem assistida por microondas a vácuo, secagem convectiva a 70 °C e liofilização. Os autores relataram que a força necessária para romper as amostras secas por micro-ondas a vácuo foi de 11,0 N, em contrapartida para a secagem convectiva foi requerido 18,1 N, o que demonstra que a secagem com micro-ondas proporcionou amostras mais macias. Contudo, as amostras liofolizadas apresentaram textura mais macia em relação aos outros dois métodos de secagem, apresentando um valor de força máxima no testes de ruptura de 5,5 N.

Arikan *et al.* (2012) avaliaram a textura de cenouras pelo teste de dupla compressão, para amostras desidratadas por secagem convectiva assistida por micro-ondas no modo contínuo e intermitente. Os autores constataram que a potência de micro-ondas e a temperatura do ar de secagem, assim como suas interações, apresentaram influência significativa na dureza da cenoura. Os resultados mostraram que a secagem com micro-ondas convectiva resultou em produtos mais duros em relação à secagem puramente convectiva. O aumento da temperatura do ar de 65 °C para 75 °C, para a secagem puramente convectiva, aumentou a dureza do produto de 16,48 para 25,70 N. Em relação à densidade de potência, o aumento de 1,97 para 2,23 W.g⁻¹, aumentou a dureza do produto de 46,70 para 76,26 N na secagem com micro-ondas intermitente (15 s ligada / 15 s desligada) e de 49,49 para 72,21 N na secagem intermitente (15 s ligada / 30 s desligada), quando a menor temperatura do ar (20 °C) foi utilizada. Changrue (2006) constatou

que a secagem por micro-ondas a vácuo contínua originou amostras de cenoura mais macias do que as desidratadas por micro-ondas a vácuo no modo intermitente (radiação 45 s ligada / 15 s desligada; 30 s ligada / 30 s desligada). De modo que o aumento na densidade de potência de 1,0 para $1,5 \text{ W.g}^{-1}$ não alterou a dureza do produto.

Perante o exposto, a determinação da dureza pode ser considerada uma ferramenta interessante para avaliar a influência das condições do processo de secagem, potência de microondas e temperatura do ar, nas alterações da textura do material ocasionadas pelo processamento.

3.6 Cenoura

3.6.1 Características gerais

A cenoura é uma hortaliça pertencente à família das *Apiaceae*, botanicamente classificada como *Daucus carota* L., originária da Europa e da Ásia. No grupo das hortaliças é classificada como um legume, pois sua substância de reserva acumula-se na raiz, sendo esta a parte comestível deste vegetal (MURAYAMA, 1973).

No cenário nacional a cenoura é a quinta olerícola cultivada em ordem de importância econômica (MAROUELLI *et al.*, 2007). A produção nacional de cenouras no ano de 2008 foi de aproximadamente 784 mil toneladas. O cultivo desta hortaliça é realizado em grande escala nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil, sendo São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Bahia os principais estados produtores (EMBRAPA, 2012).

Esta hortaliça caracteriza-se por ser uma raiz tuberosa, carnuda, lisa e reta, apresentando coloração predominantemente alaranjada. A morfologia da cenoura influência diretamente na sua classificação e determina o seu valor comercial. Assim, melhores aspectos morfológicos proporcionam maior valorização e preferência do mercado consumidor (HORTIBRASIL, 2000). Os principais elementos morfológicos da cenoura incluem o caule, colo, ombro, lenticelas, ápice, córtex e coração, conforme mostra a Figura 3.7.



Figura 3.7: Morfologia da cenoura. Fonte: HORTIBRASIL (2000).

O caule da cenoura é pouco perceptível, estando situado no ponto de inserção das folhas, na parte superior da raiz, que fica exposta ao sol, sendo que através dele circulam as seivas. A parte aérea é formada por numerosas folhas de formato triangular, com 40 a 60 cm de altura. O colo representa a região de transição entre a raiz e o caule, por sua vez o ombro é o local onde encontra-se a maior reserva de nutrientes. A raiz da cenoura apresenta lenticelas que são responsáveis pela fixação da raiz no solo e também possuem a capacidade de capturar água e minerais do solo (RAVEN *et al.*, 2001; ESAU, 1974).

Na parte interna da raiz situam-se o córtex (floema) e o coração (xilema). A função do córtex é auxiliar na condução de água e minerais dissolvidos através da raiz, desde a epiderme até o xilema. A região do córtex caracteriza-se por conter maior quantidade de carotenos e açucares em relação à região do coração. O coração localiza-se na parte central da raiz e representa a região com maior quantidade de fibras. Finalizando o corpo da raiz, encontra-se o ápice que auxilia na penetração da raiz no solo (RAVEN *et al.*, 2001).

As cenouras podem ser classificadas em diferentes variedades de acordo com a forma, comprimento e coloração das raízes. Uma das principais cultivares de cenoura disponível no mercado e, que possui boa aceitação comercial é a variedade Nantes. Neste grupo, as raízes são caracterizadas pelo formato cilíndrico, com 13 a 18 cm de comprimento e coloração alaranjada intensa. O cultivo durante o outono-inverno, com temperaturas amenas é preferível devido à boa adaptação deste cultivar. As raízes atingem o ponto de colheita entre 80 a 110 dias após a semeadura (FILGUEIRA, 1982).

Em condições climáticas com temperatura ambiente a cenoura perde a sua turgescência alguns dias após a colheita. Desta forma, quando *in natura*, considera-se adequado o armazenamento da hortaliça em câmaras frigoríficas, com umidade relativa do ar superior a 95%

e temperaturas entre 0 e 2 °C (EVANGELISTA, 1992). Nessas condições a cenoura pode ser conservada mantendo a firmeza e boa aparência durante, aproximadamente, 4 a 6 meses (FILGUEIRA, 1982).

Os processos de secagem representam uma alternativa para a conservação desta hortaliça. As cenouras desidratadas são empregadas como ingredientes na elaboração de produtos industrializados, na forma de cubos, flocos ou pó. Os alimentos processados, comumente produzidos com esta hortaliça desidratada compreendem sopas desidratadas, alimentos infantis, molhos, patês, farinhas, biscoitos e *snacks*.

A busca por alimentos industrializados com características semelhantes ao produto *in natura* é crescente, uma vez que a demanda por estes produtos vêm aumentando, devido à mudança no estilo de vida e hábitos alimentares da população. O alto valor nutritivo da cenoura torna esta hortaliça uma matéria-prima interessante para a indústria de alimentos, visto que seu emprego como ingrediente agrega valor nutricional ao produto final.

3.6.2 Características nutricionais

A cenoura é considerada um alimento altamente nutritivo, devido a grande quantidade de nutrientes importantes presentes em sua composição. Dentre os nutrientes, destacam-se as vitaminas, tais como as do complexo B e alguns minerais como fósforo, potássio, cálcio, sódio e cloro, considerados ingredientes reguladores dos processos vitais no organismo humano (EVANGELISTA, 1992).

O aumento da popularidade da cenoura, tanto na forma *in natura* quanto como alimento processado, é impulsionado de forma relevante devido ao seu alto conteúdo de carotenóides, principalmente de α e β -caroteno. Este último destaca-se por possuir maior atividade vitamínica A, o que representa uma maior capacidade de ser convertido em vitamina A (SMITH, 1997). A Tabela 3.1 apresenta a composição nutricional da cenoura *in natura*.

Componente	Quantidade	Unidade
Umidade	90,1	%
Calorias	34	Kcal
Proteínas	1,3	g
Lipídeos	0,2	g
Carboidratos	7,7	g
Fibra Alimentar	3,2	g
Cinzas	0,9	g
Cálcio	23,0	mg
Magnésio	11,0	mg
Manganês	0,05	mg
Fósforo	28,0	mg
Ferro	0,2	mg
Sódio	3,0	mg
Potássio	315	mg
Cobre	0,05	mg
Zinco	0,20	mg
Tiamina (vitamina B ₁)*	0,04	mg
Riboflavina (vitamina B2)*	0,03	mg
Piridoxina (vitamina B ₆)	0,05	mg
Niancina (vitamina B ₃)*	0,20	mg
Vitamina C	5,10	mg
Vitamina E*	0,56	mg

Tabela 3.1: Composição da cenoura por 100 gramas de parte comestível.

Fonte: NEPA/UNICAMP (2011); HOLLAND et al. (1991)*.

A Tabela 3.2 mostra o conteúdo de α e β -caroteno de diferentes vegetais, pela qual é possível perceber que a cenoura apresenta quantidades significativas destes nutrientes.

Vegetais	β-caroteno (μg/100g)	α-caroteno (μg/100g)
Cenoura	7.900	3.600
Abóbora	3.100	3.800
Alface	1.200	1
Tomate	520	-
Aspargo	449	9
Brócolis	700	1
Espinafre	4.100	-
Couve	4.700	-

Tabela 3.2: Conteúdo médio de α e β -caroteno em diferentes vegetais *in natura*.

Fonte: MAHAN e ESCOTT-STUMP (2002).

Bauernfeind (1972) avaliou o β -caroteno como sendo o constituinte que apresenta 100 % de atividade vitamínica A, já o α -caroteno foi relatado com a segunda maior atividade vitamínica A, em torno de 50 %. De acordo com Simon e Wolff (1987), o β -caroteno é o principal pigmento das raízes de cenouras alaranjadas e corresponde em até 90 % dos carotenóides totais da hortaliça, em contrapartida, o α -caroteno é o segundo pigmento mais importante, variando entre 10 e 30% da fração de carotenóides totais. A fração restante corresponde a outros carotenóides, entre eles, γ -caroteno, ζ -caroteno, β -zeacaroteno e licopeno.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Operações Unitárias do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), Campinas/SP e no Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos (LPTF) da Faculdade de Engenharia Química (FEQ), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

4.1 Matéria-prima

A matéria-prima escolhida para a secagem no presente trabalho foi a cenoura (*Daucus carota L.*), variedade Nantes. As amostras da variedade utilizada foram adquiridas nas centrais de abastecimento CEASA de Campinas-SP. A matéria-prima foi proveniente de um mesmo produtor a fim de garantir a uniformidade das amostras.

Para a aquisição do material levou-se em consideração, visualmente, as características da hortaliça em termos de coloração homogênea e ausência de defeitos, atributos favoráveis para obtenção de um produto desidratado de melhor qualidade. Optou-se por utilizar a variedade Nantes devido a sua ampla disponibilidade no mercado e elevado consumo.

A cenoura foi escolhida como material de secagem, pois apresenta relevante interesse industrial devido ao seu alto valor nutricional. Além disso, esta hortaliça atendia os propósitos deste trabalho referentes às avaliações de encolhimento, cor e textura do produto final da secagem.

4.2 Sistema experimental

O equipamento utilizado para o estudo da secagem consiste em um secador de leito fixo e seus componentes, onde tem-se acoplado um sistema que permite a aplicação de micro-ondas, instalado no Laboratório de Operações Unitárias do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), Campinas/SP. O equipamento foi construído e projetado por Rosa (2012) com sistema de operação em modo fluidizado pulsado rotativo. Para que fosse possível o emprego deste secador foram realizadas algumas modificações que permitiram a sua operação como leito fixo, tais como a inclusão de um cesto no interior da câmara de secagem e modificações na parte superior do secador para a acomodação do cesto.

O cesto do secador, projetado e construído neste trabalho, é constituído de malha de aço inoxidável (abertura de 1 mm) alojado em suporte cilíndrico de alumínio. Na parte superior do cesto, as aberturas foram vedadas com fibra de vidro impregnada de teflon, a fim de direcionar o fluxo de ar para a parte inferior do cesto, local onde a camada de cenoura permanecia alocada. A fibra de vidro impregnada de teflon foi utilizada por ser um material transparente a radiação de micro-ondas.

O cesto possui 9,7 cm de diâmetro interno e altura útil de 14,0 cm. Na Figura 4.1 é apresentado o cesto com suas partes constituintes e também a forma com que as amostras foram alocadas em seu interior.



Figura 4.1: Cesto de malha de aço inoxidável alojado em suporte cilíndrico de alumínio (a); cesto contendo as amostras (b) e visão da parte superior e inferior do cesto (c).

O sistema experimental completo utilizado nos ensaios de secagem está representado na Figura 4.2.



1- cesto do secador; 2- coluna de vidro de borosilicato; 3- cavidade de micro-ondas; 4- sensor de umidade relativa e temperatura; 5- aquecedor por resistência elétrica; 5a- controlador digital PID; 6- ventilador centrífugo; 7- célula de fluxo laminar; 8- manômetro "U"; 9- válvula de esfera; 10- desumidificador; 11- compressor de ar; 12- gerador de micro-ondas; 13- guia de onda; 14- circulador de 3 portas; 15- banho termostático; 16- acoplador duplo; 17- wattímetros; 18- sintonizador; 19- curva de 90° (guia de onda); 20- computador; 21- válvulas borboletas.

Figura 4.2: Representação do sistema experimental.

O secador é constituído por uma coluna cilíndrica (2), construída de vidro de borosilicato (parcialmente transparente às micro-ondas), com 14 cm de diâmetro interno e 54 cm de altura. O sistema de secagem possui duas linhas de fornecimento de energia, uma para aplicação de ar quente e outra para aplicação de micro-ondas.

Na parte superior do secador situa-se o cesto (1) que acomoda as amostras e permanece suspenso no interior da coluna cilíndrica, sendo fixado na parte superior do equipamento. O orifício onde o cesto é alocado permanece fechado com uma tampa perfurada durante a secagem.

No decorrer dos ensaios de secagem, quando faz-se necessária a pesagem da amostra, a tampa é retirada e o cesto é removido do interior do secador. Na região inferior do leito situa-se um prato perfurado que serve para a distribuição do ar, que percola o leito de sólidos com fluxo ascendente.

O ar de secagem que alimenta o secador é fornecido por um compressor (11) e um ventilador centrífugo (6) (Elam, VCE-04, 0,75 kW). A vazão de ar é regulada por uma válvula de esfera (9) e medida por uma célula de fluxo laminar (7), conectada a um manômetro diferencial

de tubo em U (8). O ar é aquecido por um aquecedor com resistência elétrica blindada de 5 kW (5) e sua temperatura de entrada é obtida por um termopar do tipo "J" e controlada por um sistema digital tipo PID (5a). A umidade relativa do ar e a temperatura na entrada do secador são monitoradas por um sensor (4) (MyPCprobe-RHT, Novus) conectado a um computador (20).

O ar passa por um sistema que permite a sua desumidificação antes de ser aquecido e entrar no secador. Para isto, utiliza-se um compressor de ar (11) (Ingersol-Rand, T30580H, 5 HP) ligado a um sistema de desumidificação por abaixamento da temperatura (10) (Norgren Pneumática Industrial Ltda, 010.200.0020).

A coluna cilíndrica de vidro borisilicato é envolvida por uma cavidade multi-modo de micro-ondas (3), de geometria de seção prismática sextavada para que a heterogeneidade tridimensional das intensidades do campo elétrico na configuração de ondas estacionárias possa ser minimizada, estabelecendo-se de forma dispersa. A cavidade está conectada ao sistema composto pelos equipamentos fornecedores de micro-ondas. Este sistema é constituído por um gerador de micro-ondas (12) de 5,8 GHz (700 W) (Gerling Applied Eng., EUA), que transmite as micro-ondas mediante um guia de onda (13) e está conectado a um sistema monitorador de potência de micro-ondas formado pelos seguintes componentes: um circulador de 3 portas (14), um banho termostático (15), um acoplador duplo (16), dois wattímetros para medir potências de micro-ondas transmitida e refletida (17), um sintonizador toco triplo (18) e o guia de onda finalizado em curva de 90° (19) até a entrada na tampa superior da cavidade.

Após a realização das modificações do sistema experimental foram realizados testes para verificar a ocorrência de possíveis vazamentos de micro-ondas.

Na Figura 4.3 é apresentado o secador de leito fixo acoplado ao sistema que permite a aplicação de micro-ondas.





Figura 4.3: Fotos do sistema experimental. Secador de leito fixo assistido por micro-ondas (a), sistema gerador de micro-ondas e fonte de alimentação do *magnetron* (b) e autoclave cilíndrica envoltória da cavidade de aplicação de micro-ondas, com visores para observação no interior do secador (c).

4.3 Ensaios preliminares

Posteriormente à montagem e adaptação do secador para operação como leito fixo, foram realizados os testes preliminares. Primeiramente, foi efetuado o ajuste da vazão do ar de secagem, para isto foi considerada a hipótese de não movimentação da camada de material no interior do secador, de modo a garantir a realização da secagem em leito fixo. A partir deste teste, optou-se por empregar a máxima vazão de ar fornecida pelo sistema experimental, correspondente a 0,5 m³/min, visto que esta não provocou movimento dos cubos de cenoura dispostos no cesto do secador. A observação do comportamento do material no interior do secador foi realizada

visualmente através dos visores localizados na parede lateral envoltória da autoclave (Figura 4.3c, *item 4.2*).

Com relação à massa de amostras utilizada, optou-se por realizar a secagem em monocamada, equivalente a 50 gramas de material. Isso porque, esta configuração possibilitou a realização da análise do encolhimento superficial, ou seja, a variação no volume da área de material após a secagem. Os parâmetros, massa do material utilizada e vazão volumétrica do ar de secagem, estão apresentados na Tabela 4.1.

Parâmetros				
Massa (g)	Q_{ar} (m ³ /min)			
50	0,5			

Tabela 4.1: Parâmetros experimentais utilizados.

Os testes preliminares com aplicação de micro-ondas foram realizados em diferentes temperaturas do ar de entrada e potência de micro-ondas, desta forma foi possível selecionar as faixas de parâmetros empregadas nos experimentos. Na escolha desses parâmetros foram considerados os níveis de potência de micro-ondas que, aliados à faixa de temperatura do ar, não ocasionaram a queima do material. Os parâmetros escolhidos serão apresentados na Tabela 4.2, *item 4.5*.

A secagem convectiva foi realizada a 70 e 80 °C, temperaturas já consolidadas na literatura para a secagem de cenoura. Após definidos os parâmetros de processo iniciou-se a execução dos experimentos de secagem.

4.4 Procedimento experimental

Os experimentos de secagem foram realizados com e sem a aplicação de micro-ondas. Para a secagem assistida por micro-ondas dois modos de aplicação da radiação foram propostos, conforme será apresentado no *item 4.5*. A sequência de atividades realizada em cada experimento está apresentada no fluxograma ilustrado pela Figura 4.4.



Figura 4.4: Fluxograma de experimentos para a secagem de cenoura em secador de leito fixo assistido por micro-ondas.

Aquisição e seleção: As amostras de cenoura foram adquiridas nas centrais de abastecimento CEASA, Campinas/SP e conduzidas em sacolas plásticas para o laboratório de Operações Unitárias do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL).

Armazenamento: Na etapa de armazenamento as amostras de cenoura passaram, primeiramente, por um processo de limpeza com o auxílio de água corrente, para retirada das sujidades presentes na superfície do vegetal. Em seguida, as cenouras foram colocadas em sacos plásticos pretos, etiquetadas e armazenadas sob refrigeração a 5 °C \pm 0,5 °C, durante o prazo máximo de três dias.

Preparação das amostras: Antes de cada corrida experimental as cenouras foram retiradas da refrigeração e colocadas em uma bandeja, permanecendo expostas ao ambiente por aproximadamente 10 minutos. Em seguida, foram descascadas e cortadas com o auxílio de uma faca. Os cortes foram realizados, primeiramente, em fatias longitudinais com aproximadamente 0,8 cm de espessura. Antes do corte, foi realizada a marcação da medida de espessura requerida com o auxílio de uma régua. Após a obtenção das fatias, cubos com dimensões de 0,8 cm x 0,8

cm x 0,8 cm foram obtidos com o auxílio de um cortador de vegetais, o qual possuía a forma de corte em cubos.

Secagem: As amostras foram, então, utilizadas para o estudo da secagem em secador de leito fixo com e sem a aplicação de micro-ondas A descrição detalhada dos procedimentos de secagem encontra-se nos *itens 4.4.1 e 4.4.2*.

As etapas de determinação da umidade, encolhimento, cor e textura foram realizadas de acordo com as metodologias descritas nos *itens* 4.8.1, 4.8.2 e 4.8.3, respectivamente.

Para a realização de cada experimento de secagem assistido por micro-ondas foi elaborada a sequência de atividades apresentada no fluxograma ilustrado pela Figura 4.4, sendo que para os experimentos de secagem puramente convectiva a sequência de atividades realizadas até a etapa **secagem** foi a mesma descrita para o processo com aplicação de micro-ondas, porém, após a secagem convectiva, realizou-se apenas a análise de umidade.

Como o foco do trabalho consistiu em estudar a influência da aplicação de micro-ondas na secagem de cenoura, a avaliação do produto obtido em termos de cor, textura e encolhimento foi realizada somente para as amostras secas com micro-ondas. O intuito foi comparar o efeito dos diferentes modos de aplicação da radiação, apresentados no *item 4.5*, nas características finais do material.

4.4.1 Procedimento para a secagem convectiva em secador de leito fixo

O processo puramente convectivo foi realizado a fim de estudar o comportamento da cenoura durante a secagem e também para que fosse possível realizar a comparação das cinéticas de secagem do método convencional com a secagem assistida por micro-ondas.

O procedimento experimental realizado durante os experimentos e determinação das curvas de secagem foi efetuado por meio do sistema experimental da Figura 4.2, e encontra-se descrito a seguir:

- Liga-se o compressor [11] e o desumidificador do ar [10];
- Liga-se o ventilador centrífugo [6] e ajusta-se a vazão de ar por meio da válvula de esfera [9];

- Aciona-se o aquecedor elétrico [5], ajusta-se o *set point* do controlador digital [5a] da temperatura do ar de secagem e aguarda-se até que as condições de equilíbrio térmico sejam atingidas (mesma temperatura do ar na entrada e saída do secador);
- Desvia-se o fluxo de ar do secador por meio das duas válvulas borboletas [21];
- Adiciona-se a camada de material no cesto [1];
- Aloca-se o cesto no interior da câmara de vidro de borosilicato [2] pela parte superior do secador;
- Desvia-se o fluxo de ar do secador por meio das duas válvulas borboletas [21], retornando o direcionamento da vazão de ar para o interior do secador;

Durante cada ensaio experimental, o tempo de secagem foi controlado através de um cronômetro digital (Timer Digital ISBB-3303) e o cesto foi retirado do secador e pesado em balança analítica (Ohaus, AdventureTM, ARC 120, precisão \pm 0,01) nos seguintes intervalos de tempo:

- 5 minutos, para tempos de secagem entre 0 e 30 minutos;
- 10 minutos, para tempos de secagem entre 30 e 100 minutos;
- 20 minutos, para tempos de secagem entre 100 e 120 minutos;
- 30 minutos, para tempos de secagem entre 120 minutos até o final do experimento (quando a amostra atingia peso constante).

Os parâmetros de temperatura e umidade relativa do ar na entrada do secador foram acompanhados durante os experimentos de secagem. O conteúdo de umidade das amostras foi determinado conforme descrito no *item 4.6*.

4.4.2 Procedimento para a secagem em secador de leito fixo assistido a micro-ondas

O procedimento experimental realizado para os experimentos de secagem com aplicação de micro-ondas e para a determinação das curvas de secagem apresenta algumas etapas semelhantes às realizadas durante a secagem puramente convectiva. Porém, difere pela utilização da energia de micro-ondas, conforme descrito a seguir.

• Liga-se o compressor [11] e o desumidificador do ar [10];

- Aciona-se o banho termostático [15] do sistema de micro-ondas para que a temperatura permaneça em 15 °C;
- Liga-se o ventilador centrífugo [6] e ajusta-se a vazão de ar por meio da válvula de esfera [9];
- Aciona-se o aquecedor elétrico [5], ajusta-se o *set point* do controlador digital [5a] da temperatura do ar de secagem e aguarda-se até que as condições de equilíbrio térmico sejam atingidas (mesma temperatura do ar na entrada e saída do secador);
- Desvia-se o fluxo de ar do secador por meio das duas válvulas borboletas [21];
- Adiciona-se a camada de material no cesto [1];
- Aloca-se o cesto no interior da câmara de vidro de borosilicato [2] pela parte superior do secador;
- Desvia-se o fluxo de ar do secador por meio das duas válvulas borboletas [21], retornando o direcionamento da vazão de ar para o interior do secador;
- Liga-se o gerador de micro-ondas [12] e regula-se a potência indicada nos wattímetros [17] conforme o desejado;

Durante os ensaios de secagem os valores da potência aplicada e da potência refletida foram monitorados por meio dos wattímetros [17], não devendo a potência refletida ultrapassar 2% do valor da potência aplicada, pois através deste parâmetro é possível conferir se o material está absorvendo as micro-ondas. Para tanto, regulava-se o sintonizador [18] manualmente, quando necessário, para manter otimizadas (casadas) as impedâncias do sistema. O tempo de secagem foi controlado através de um cronômetro digital (Timer Digital ISBB-3303), em cada ensaio experimental.

No decorrer de cada experimento, o cesto foi retirado do secador e pesado em balança analítica (Ohaus, AdventureTM, ARC 120, precisão $\pm 0,01$) nos seguintes intervalos de tempo:

- 5 minutos, para tempos de secagem entre 0 e 30 minutos;
- 10 minutos, para tempos de secagem entre 30 minutos até o final do experimento (quando a amostra atingia peso constante).

Nestes mesmos intervalos, foram medidas as dimensões de cinco cubos de cenoura, tomando-se cuidado para realizar esta etapa em curto período de tempo. Os parâmetros de temperatura e umidade relativa do ar na entrada do secador foram acompanhados durante os ensaios de secagem. O conteúdo de umidade das amostras foi determinado conforme descrito no *item 4.6.* No final de cada ensaio de secagem, uma parte das amostras foi destinada para a análise de determinação da umidade e o restante foi colocado em recipiente de polietileno e armazenado em dessecador, para posterior determinação de cor e textura.

4.5 Planejamento experimental - ensaios de secagem com aplicação de micro-ondas

Após a realização dos ensaios preliminares foram definidas as condições para a secagem com aplicação de micro-ondas. Foram realizados dois planejamentos fatoriais completos 2², com três repetições no ponto central, totalizando 14 experimentos, efetuados de forma aleatória. Dessa forma, sete corridas experimentais foram realizadas para cada planejamento experimental.

O objetivo de ambos os planejamentos experimentais foi analisar a influência da temperatura do ar de secagem e da potência de micro-ondas nas variáveis de resposta. Para tanto, as variáveis de entrada foram: potência de micro-ondas (P) e temperatura do ar (T_{ar}), codificadas como X'_{1} e X'_{2} , respectivamente. As variáveis de resposta analisadas foram: teor de umidade final ($X_{b,s}$), encolhimento (V/V_{θ}), cor (C) e dureza (D). Os dois planejamentos experimentais realizados estão descritos a seguir:

<u>Planejamento A</u> - Secagem convectiva combinada com a aplicação de micro-ondas durante todo o processo. Neste planejamento os níveis de temperatura do ar e de potência de micro-ondas foram mantidos constantes durante todo o processo de secagem. Este processo foi denominado, neste trabalho, como secagem com aplicação contínua de micro-ondas. As variáveis independentes estão apresentadas na Tabela 4.2 e a matriz do planejamento na Tabela 4.3.

<u>Planejamento B</u> - Secagem convectiva combinada com a aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo. Neste planejamento diferentes níveis de temperatura do ar foram utilizados durante o experimento, de acordo com os períodos distintos da secagem identificados durante a secagem puramente convectiva. Conforme os experimentos realizados para a secagem convectiva com temperatura do ar de 80 °C constatou-se que o período correspondente à taxa de secagem constante da cenoura compreendeu cerca de 30 minutos. Portanto, neste planejamento durante o período de secagem à taxa constante, a temperatura do ar utilizada foi de 80 °C. A partir deste período, correspondente à retirada da umidade superficial do material, a temperatura do ar foi diminuída para que não ocorresse a queima do material e, então, a aplicação de micro-

ondas foi iniciada. No período de taxa de secagem decrescente, as variáveis independentes utilizadas para o Planejamento B correspondem à temperatura do ar e a potência de micro-ondas aplicadas no Planejamento A.

Assim sendo, os experimentos do Planejamento B foram realizados com as seguintes condições: até 30 minutos de processo com temperatura do ar de secagem de 80 °C, vazão de ar igual a 0,5 m³/min e sem aplicação de micro-ondas; a partir deste período foram aplicados os níveis de temperatura do ar e potência de micro-ondas usados no Planejamento A. Este processo foi denominado, neste trabalho, como secagem com aplicação descontínua de micro-ondas.

Como as variáveis independentes utilizadas foram iguais em ambos os planejamentos, a matriz também foi a mesma para os dois casos. Porém, a influência da secagem inicial puramente convectiva (80 °C) foi analisada de acordo com as variáveis de resposta (umidade final, encolhimento, cor e textura) obtidas no Planejamento B. Desta forma, foi possível avaliar a necessidade de aplicação de micro-ondas durante todo o processo de secagem. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores das variáveis independentes e na Tabela 4.3 a matriz utilizada para os dois planejamentos experimentais.

Vaniávois da Entrada	Notacão	Níveis		
variaveis de Elitrada	ποταςαο	- 1	0	+ 1
Temperatura do ar (°C)	X'_{l}	30	40	50
Potência de micro-ondas (W)	X'_2	100	200	300

Tabela 4.2: Variáveis independentes e seus valores codificados.

Ensaios	Temperatura do ar	Potência de micro-ondas
1	-1	-1
2	-1	1
3	1	-1
4	1	1
5 (C)	0	0
6 (C)	0	0
7 (C)	0	0

Tabela 4.3: Matriz utilizada nos planejamentos experimentais A e B.

Os valores de X'_1 e X'_2 estão correlacionados com as variáveis de entrada originais, temperatura do ar e potência de micro-ondas, e podem ser obtidos através das Equações 4.1 e 4.2.

$$X'_{1} = \frac{T - 40}{10} \tag{4.1}$$

$$X'_{2} = \frac{P - 200}{100} \tag{4.2}$$

Considerando a massa inicial de cenoura de 50 g utilizada em todos os ensaios de secagem, as densidades de potência aplicadas para cada nível de potência incidente (100, 200 e 300 W) foram: 2, 4 e 6 W/g. Ressalta-se que para estas densidades de potência não ocorreu a queima do material, conforme avaliado em testes preliminares. Porém, acima de 6 W/g constatou-se a queima das amostras de cenoura, sendo este o nível máximo utilizado nos ensaios de secagem. A influência das variáveis independentes nas respostas foi apresentada através do diagrama de *Pareto*, para ambos os planejamentos experimentais, obtido com auxilio do *software* Statistica® 8.0, utilizando nível de confiança de 95%.

4.6 Cinética de secagem

Para a cinética de secagem os dados de massa das amostras foram monitorados em intervalos de tempo conforme descrito nos *itens 4.4.1* e *4.4.2*. A determinação do conteúdo de umidade das amostras foi realizada com aquecimento direto em estufa a 105 °C, segundo a norma analítica 4.5.1 do Instituto Adolfo Lutz (1985).

Os experimentos de secagem foram realizados até as amostras atingirem peso constante, exceto para a secagem puramente convectiva. Para avaliação do conteúdo de umidade final atingido no equilíbrio, tomou-se como referência a umidade final aceitável para produtos de vegetais secos ($\leq 12\%$ b.u.) (BRASIL, 2005). Desta forma, como a secagem convectiva caracteriza-se por necessitar de longo tempo de operação, neste caso as amostras foram secas até umidade final menor ou igual a 12% b.u.

Portanto, para a secagem convectiva, as curvas de secagem foram obtidas pelas Equações 4.3 e 4.4, sendo os gráficos construídos com os valores do adimensional de umidade (X_R) em função do tempo de secagem.

$$X_{(b.s.)} = \left(\frac{m(t) - m_{ss}}{m_{ss}}\right) \times 100 \tag{4.3}$$

$$X_R = \left(\frac{X}{X_0}\right) \tag{4.4}$$

em que $X_{(b,s,)}$ é o teor de umidade em base seca, m(t) representa a variação média da massa de sólidos durante a secagem (g), m_{ss} a massa de sólido seco (g), X_R o adimensional de umidade, X_{θ} o teor de umidade no tempo zero e X o teor de umidade no tempo (t). Para a secagem com microondas a razão de umidade foi calculada pela Equação 4.5. Os gráficos foram plotados com os valores de umidade em base seca $X_{(b,s)}$ em função do tempo de secagem e com o adimensional de umidade (X_R) em função do tempo de secagem.

$$X_{R} = \left(\frac{X - X_{e}}{X_{0} - X_{e}}\right) \tag{4.5}$$

em que X_e é a umidade de equilíbrio representada, neste trabalho, pelo instante em que as amostras atingiram peso constante durante três pesagens consecutivas.

Desta forma, as curvas para a secagem com micro-ondas foram plotadas com todos os pontos experimentais, incluindo os pontos das três pesagens consecutivas. Porém, na discussão dos resultados, considerou-se apenas o tempo da primeira pesagem, dentre as três pesagens consecutivas em que a amostra obteve peso constante. Como exemplo, pode-se citar a secagem com aplicação contínua de micro-ondas (Planejamento A, *ensaio 1a*), na qual o tempo necessário para a amostra atingir três pesagens consecutivas no peso constante foi de 180 minutos. Porém, na discussão dos resultados foi considerado o tempo de 160 minutos, que representa a primeira pesagem com massa constante. Portanto, as curvas de secagem foram plotadas com 180 minutos e os resultados foram discutidos com base nos 160 minutos.

As curvas de taxa de secagem foram construídas explorando-se a taxa em função do conteúdo de umidade (base seca). A taxa de secagem (N) foi determinada através da Equação 4.6.

$$N = -\frac{dX_R}{dt}$$
(4.6)

4.6.1 Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem

Os dados experimentais das curvas de secagem para todas as condições estudadas, com e sem a aplicação de micro-ondas, foram ajustados aos modelos matemáticos de secagem encontrados na literatura, apresentados na Tabela 4.4.

Modelo (ano)	Equações		
Page (1949)	$X_R = \exp(-K.t^n)$		
Henderson e Pabis (1969)	$X_R = a.\exp(-K.t)$		
Midilli <i>et al.</i> (2002)	$X_R = a.\exp(-K.t^n) + b.t$		

Tabela 4.4: Modelos matemáticos aplicados à cinética de secagem.

Os ajustes foram realizados por estimativa não linear, através do método dos mínimos quadrados, com auxilio do *software* de Statistica® 8.0. A qualidade do ajuste dos modelos testados foi determinada pelos valores dos parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2) e soma dos quadrados dos resíduos (*SQR*).

$$SQR = \sum_{i=1}^{n} (Y - Y_0)^2$$
(4.7)

em que:

Y: valor observado experimentalmente;

 Y_0 : valor calculado pelo modelo.

Para o ajuste dos pontos experimentais das curvas de secagem aos modelos, em cada experimento, primeiramente determinou-se quais os pontos da curva de secagem que apresentaram um comportamento linear (período de retirada da umidade superficial, em que a taxa de secagem é constante). Em seguida, os pontos restantes da curva (período de taxa de secagem decrescente, em que a água começa a ser deficiente na superfície e a taxa de secagem diminui) foram ajustados aos modelos apresentados na Tabela 4.4.

4.7 Determinação das propriedades dielétricas da cenoura

As análises das propriedades dielétricas da cenoura foram realizadas no Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), localizado em Campinas/SP. Para isto, foi utilizado o aparelho de sonda coaxial com extremidade aberta (Hewlett Packard, HP85070B), conectado a um analisador de rede (HP8752c). A análise foi realizada com três repetições para a cenoura *in natura*, sendo medidos os valores de ε' (constante dielétrica relativa) e ε'' (fator de perda relativo). As propriedades dielétricas das amostras secas não foram determinadas devido à inexistência de um suporte adequado para comportar as amostras secas, que apresentavam formato irregular e pequeno.

A análise se fundamenta na técnica da sonda coaxial com extremidade aberta. Durante a análise, a sonda é colocada em contato com a superfície do material, sendo o sinal de microondas emitido na faixa de frequências entre 300 kHz e 6,0 GHz. A intensidade do sinal refletido na interface sonda-amostra é detectada pelo analisador de rede (HP8752c) que envia os sinais transmitido e refletido a um computador (HP-Vectra). Este possui um programa que interpreta os sinais e calcula os valores das constantes dielétricas e das constantes de perda em função das frequências do intervalo.

Para a realização dessa análise são consideradas algumas hipóteses: material não magnético, isotrópico, homogêneo e infinito. Também, é necessário ter-se uma superfície plana e lisa da amostra, para que o contato entre a amostra e a sonda seja perfeito, ou seja, sem a existência de espaços com ar. No caso específico de sólidos, estes devem apresentar rigorosamente esta superfície plana e lisa. Para tanto, primeiramente foram obtidas fatias planas e sem rugosidade de cenoura (7,5 mm), através de um fatiador (GURAL, modelo GLT300, com motorização de 1/3 CV). Posteriormente, as fatias foram ajustadas ao formato cilíndrico (19 mm diâmetro) com o auxílio de um vazador cilíndrico-rotativo (E.H. SARGENT, modelo S-23207, com motorização de 100 W), para que fosse possível apoiá-las no suporte utilizado durante a análise. Finalmente, com as fatias de formato regular foi possível obter um contato o mais adequado possível entre a amostra e a sonda do aparelho medidor.

Antes da análise foi realizada a calibração do aparelho, que consistiu em três etapas: primeiramente foram realizadas as medições com ar, em seguida foi efetuada a medição com o curto circuito, em que uma superfície metálica é colocada em contato com a sonda e cuidadosamente pressionada para obtenção de um bom contato entre ambos e, a última etapa consistiu na medição com água destilada a 25 °C. Nesta etapa a sonda foi parcialmente imersa em água destilada, sendo que o contato entre a sonda e o líquido permaneceu isento de bolhas de ar. Finalizada a etapa de calibração, foram efetuadas as medições das propriedades dielétricas da cenoura *in natura* para quatro determinações.

Porém, devido à dificuldade de se obter um contato perfeito entre a sonda e a amostra, uma das quatro medidas apresentou um desvio bastante elevado em relação às demais. Diante disto, foram consideradas somente as medições que apresentaram maiores valores para o fator de perda, isso porque o ar existente entre a sonda e a amostra tende a diminuir o valor desta propriedade. Após a realização da análise, foi determinada a umidade das amostras.

4.8 Avaliação da qualidade do produto

4.8.1 Análise do encolhimento do material

O estudo do encolhimento foi realizado com o intuito de avaliar a influência das condições de secagem na redução de volume do material e investigar a sua relação com a cinética de secagem.

O volume das amostras durante a secagem foi obtido com o auxílio de um paquímetro digital (Mitutoyo, 150 mm, precisão \pm 0,01 mm). Foram registradas as medidas das três dimensões (altura, largura e comprimento) de cinco cubos retirados aleatoriamente antes do início da secagem e durante o experimento, para cada ponto da cinética de secagem. Os resultados do volume dos cubos foram expressos como a média das determinações com seu respectivo desvio padrão, para cada ensaio de secagem.

O encolhimento volumétrico foi expresso como a razão entre o volume do material (V) no decorrer da secagem e o seu volume antes do início do processo (V_0). Esta razão é denominada de coeficiente de encolhimento, conforme é apresentado na Equação 4.8 (MADIOULI *et al.*, 2007):

$$S = \frac{V}{V_0} \tag{4.8}$$

As curvas para o encolhimento volumétrico foram construídas explorando-se o coeficiente de encolhimento volumétrico em função do teor de umidade do material.

Para cada ensaio de secagem os dados do coeficiente de encolhimento volumétrico (V/V_0) foram ajustados aos modelos de encolhimento da literatura: modelo linear proposto por Lozano *et al.* (1983), modelo quadrático proposto por Mayor e Sereno (2004), modelo cúbico proposto por Ratti (1994) e o modelo proposto por Nihamana *et al.* (2011), apresentados na Tabela 4.5. Para isto, utilizou-se o *software* Statistica® 8.0, sendo a qualidade dos ajustes avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2) e pelo erro relativo médio (*E*), obtido através da Equação 4.9.

$$E = \frac{100}{N'} \sum \frac{(Y - Y_0)}{Y}$$
(4.9)

em que:

Y - valor observado experimentalmente;

 Y_0 - valor calculado pelo modelo;

N' - número de observações experimentais.

Modelo	Equações
Modelo Linear	$V/V_0 = A (X/X_0) + B$
Modelo Quadrático	$V/V_0 = A + B (X/X_0) + C (X/X_0)^2$
Modelo Cúbico	$V/V_0 = A + B (X/X_0) + C (X/X_0)^2 + D (X/X_0)^3$
Modelo de Nihamana et al.(2011)	$V/V_0 = A - B.C^X$

Tabela 4.5: Modelos matemáticos de encolhimento.

* X representa o teor de umidade em base seca no tempo t e X_0 o teor de umidade inicial em base seca.

A determinação do encolhimento superficial foi realizada através da medida da área do material (monocamada de cenoura). O encolhimento superficial foi expresso como a razão entre a área da monocamada (A) no final da secagem e a sua área antes do início do processo (A_0), pela Equação 4.10.

$$S' = \frac{A}{A_0} \tag{4.10}$$

Para a determinação do encolhimento superficial, imagens da monocamada de material foram obtidas através de uma câmera digital e sua dimensão de área foi medida por meio do *software* ImageJ® 1.45s. Desta forma, foi possível avaliar a variação na área da monocamada de

material após cada condição de secagem. A metodologia empregada para utilização do *software* seguiu o procedimento descrito abaixo:

- Primeiramente foi definida no espaço da imagem uma medida de referência, sendo esta utilizada na determinação da área do material. A medida de referência empregada foi de 1 mm, referente a abertura da malha de aço inoxidável do fundo do cesto, conforme mostra a Figura 4.5.
- Em seguida, a área de interesse (área do material) foi demarcada na imagem por meio da opção "*threshold*". Em seguida, através da opção "*measure*" o *software* forneceu o valor da área limitada da camada de material.

A análise do encolhimento superficial foi realizada para todos os ensaios de secagem dos dois planejamentos experimentais, antes do início da secagem e no final do processo.



Figura 4.5: Imagens da monocamada de material utilizadas para a análise de encolhimento superficial.

4.8.2 Análise colorimétrica

A cor é um parâmetro importante no que se refere à qualidade dos alimentos, fato que torna interessante a verificação da influência das diferentes condições de secagem na coloração do produto final.

Os parâmetros de cor da cenoura *in natura* e das amostras secas foram determinados com o auxílio de um colorímetro (MINOLTA CR300), instalado no Laboratório de Operações Unitárias do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), Campinas/SP. O colorímetro é conectado ao *software* Oncolor® que fornece os resultados dos parâmetros de cor conforme o sistema CIELAB. Assim sendo, os parâmetros de cor foram expressos pelas coordenadas: L^* que mede a variação da luminosidade entre o preto e o branco ($L^*=0$ preto e $L^*=100$ branco); a^* que mede a tonalidade vermelha/verde definida por + a^* = vermelho e - a^* = verde e b^* que mede a tonalidade amarela/azul definida por + b^* = amarelo e - b^* = azul.

O colorímetro foi previamente calibrado com uma placa de cerâmica padrão de cor branca. Para a medição dos parâmetros de cor foi utilizado como referência o iluminante D65 e ângulo de observação de 2°.

A partir das coordenadas L^* , $a^* e b^*$ foi determinada a diferença de cor total (ΔE^*), pela Equação 4.11, que permite avaliar a alteração de cor total do produto.

$$\Delta E^* = \sqrt{\left(L^* - L_0^*\right)^2 + \left(a^* - a_0^*\right)^2 + \left(b^* - b_0^*\right)^2} \tag{4.11}$$

em que L_0^* , a_0^* , b_0^* são os valores da amostra *in natura*, adotada como referência para avaliar as alterações de cor.

Para as análises de cor foram separados aleatoriamente dez cubos de cenoura no final de cada ensaio de secagem. Os testes foram realizados efetuando-se uma leitura em cada cubo, totalizando dez leituras para cada condição de secagem. Os resultados foram expressos como a média das dez leituras com seus respectivos desvios padrão. A medida de cor da amostra *in natura* foi efetuada pelo mesmo procedimento, antes do início do processo de secagem.

Como os cubos de cenoura apresentavam tamanho muito pequeno, inferior ao tamanho da base do colorímetro que incide o feixe de luz, foi necessária a utilização de um suporte para alocar as amostras, com o intuito de obter resultados mais precisos. O esquema do suporte utilizado está apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6: Suporte utilizado para alocar os cubos de cenoura durante a análise de cor.

O suporte foi construído com material flexível, semelhante a uma espuma. Orifícios equivalentes ao tamanho dos cubos foram feitos na base do suporte, com o auxílio de um estilete, de modo que espaços de 10 mm fossem obtidos entre cada compartimento. Desta forma, as amostras foram acomodadas nos orifícios e a medida de cor inerente a cada cubo foi obtida neste espaço delimitado, minimizando as interferências de coloração do espaço circundante. É

importante ressaltar que esta foi considerada a forma mais adequada para a realização da leitura dos parâmetros de cor do produto, uma vez que através deste procedimento foi possível preencher inteiramente a base do colorímetro com a amostra.

4.8.3 Determinação da textura

Assim como a cor, a textura representa um parâmetro importante de qualidade dos alimentos, principalmente após seu processamento. Com o intuito de avaliar a influência das condições de secagem neste parâmetro, a textura das amostras foi determinada em termos de dureza, que representa a força em compressão necessária para produzir uma determinada deformação no material.

A dureza foi medida pelo teste de compressão com o auxílio de um texturômetro TA-XT2i Texture Analyser (*Stable Micro Systems, England*), instalado no Laboratório Operações de Unitárias do Instituto de Tecnologia de Alimentos - ITAL. Para isto, foi utilizada uma sonda cilíndrica de aço inoxidável, com fundo chato e 35 mm de diâmetro (*Cylindrical Probe* - SMS P35). Os parâmetros de teste utilizados foram: modo de análise força em compressão, velocidade pré-teste 0,5 mm/s, velocidade de teste 0,5 mm/s e velocidade pós-teste 0,5 mm/s, carga de contato 5 g e distância de compressão de 2 mm (equivalente a um nível de deformação de aproximadamente 70% da dimensão original da amostra).

Pelo teste de compressão mediu-se a resistência que a amostra ofereceu ao ser comprimida pelo corpo de prova, simulando a ação de compressão dos dentes durante a mastigação. Desta forma, as amostras foram caracterizadas como macias ou duras. Os resultados foram gerados pelo *software Texture Exceed*, sendo a dureza da amostra determinada pelo pico da força máxima em compressão obtido durante o teste, expressa em Newton (N).

As análises de dureza foram realizadas em dez cubos de cenoura, separados aleatoriamente, no final de cada ensaio de secagem. Os resultados da força máxima em compressão foram expressos como a média das dez medidas com seu respectivo desvio padrão. A medida de dureza da amostra *in natura* foi efetuada por este mesmo procedimento.

Embora os valores obtidos pelo teste de compressão não representem de forma direta a energia requerida para desintegrar o alimento, esses resultados são úteis na obtenção de uma perspectiva correspondente a força necessária para comprimir o material, caracterizando sua

maciez ou firmeza. Como não foi efetuado um estudo completo do perfil de textura e sua relação com a análise sensorial, pois esse não era o propósito deste trabalho, algumas suposições foram realizadas, uma vez que um padrão aceitável pelo consumidor não foi obtido por atributos sensoriais.

As considerações efetuadas foram baseadas na hipótese de que a dureza do produto está relacionada com a mastigabilidade, como observado por Andrade (2006) e Guiné e Barroca (2011) em que as amostras mais firmes foram também as que apresentaram maior resistência à mastigação, pelo teste de compressão. Assim sendo, foram consideradas como desejáveis as amostras que apresentaram dureza menor ou intermediária. Isso porque, as amostras mais firmes poderiam estar relacionadas com a maior resistência a mastigação, sendo que as amostras com dureza intermediária poderiam ser aceitas pelo fato de apresentarem certa crocância e as com baixa dureza por serem mais fáceis de mastigar em comparação as amostras duras. A dureza intermediária foi determinada como sendo o valor intermediário entre a maior e a menor força de compressão obtida nos testes.

4.9 Análise estatística dos resultados

Os resultados obtidos durante as análises de encolhimento, cor e textura foram avaliados estatisticamente através da Análise de Variância (*One Way Analysis of Variance*), aplicando o Teste de *Tukey* ao nível de 5% de significância, com o auxílio do *software* Minitab® 16.0.

4.10 Função desejabilidade global

O estudo da função desejabilidade global foi realizado a fim de se verificar a influência das variáveis da secagem de forma sistemática e determinar a melhor condição operacional, dentro do domínio experimental estudado.

A função desejabilidade global é um método utilizado para a otimização de processos com múltiplas respostas, proposto por Derringer e Suich (1980). Este método baseia-se no conceito de que a qualidade de um processo com múltiplas características é inaceitável quando pelo menos uma destas características se encontra fora do limite desejado. Este limite se encontra num intervalo de (0, 1), onde 0 significa um valor inaceitável e 1 o valor mais desejável, ou seja, o valor ótimo. Esta função representa a média das *m* desejabilidades individuais, artifícios pela

qual a otimização simultânea das várias respostas se reduz a maximização de um único valor, a desejabilidade global (*D*), expressa pela Equação 4.12.

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 d_3 \dots d_m} \tag{4.12}$$

em que *m* é o número de respostas.

Se qualquer resposta d_m for totalmente indesejável ($d_m = 0$), a desejabilidade global será igual a zero também. Para a otimização numérica desta função, foi utilizado o *software* Statistica[®] 8.0, que emprega uma abordagem usada por Derringer e Suich (1980), baseada no seguinte princípio:

- Os valores inferior, superior e mediano são denominados, respectivamente, por *Li*,
 Ls e *M*, os quais são desejados para a resposta Ŷ, com *Li*≤*M* ≤*Ls*.
- Os expoentes s e t determinam a importância da função para encontrar o valor desejado; sendo que para s = t = 1, a função desejabilidade aumenta linearmente com M; para s < 1 e t < 1, a função é convexa; e para s > 1 e t > 1, a função é côncava.
- Se a resposta deve ser maximizada, a desejabilidade individual é definida na forma da Equação 4.13.
- Se a resposta deve ser minimizada, a desejabilidade individual é definida na forma da Equação 4.14.
- Se a resposta é do tipo mediana, então sua função desejabilidade individual é bilateral, em que o valor desejado está localizado entre o limite inferior e superior, sendo definida por meio da Equação 4.15.

$$d = \begin{cases} 0 & \hat{Y} < L_i \\ \left(\frac{\hat{Y} - L_i}{M - L_i}\right)^s & L_i \le \hat{Y} \le M \\ 1 & \hat{Y} > M \end{cases}$$
(4.13)

	1	$M < \hat{Y}$	
$d = \langle$	$\left(\frac{L_s-\hat{Y}}{L_s-M}\right)^t$	$M \leq \hat{Y} \leq L_s$	(4.14)
	0	$\hat{Y} > L_s$	
	0	$\hat{Y} < L_i$	
<i>d</i> = {	$\left(\frac{\hat{Y}-L_i}{M-L_i}\right)^s$	$L_i \leq \hat{Y} \leq M$	(4.15)
	$\left(\frac{L_s-\hat{Y}}{L_s-M}\right)^t$	$M \leq \hat{Y} \leq L_s$	(4.15)
	0	$\hat{Y} > L_s$	

Portanto, a desejabilidade consiste em três etapas: conduzir os experimentos e ajustar as respostas dos modelos para todas as variáveis de resposta do planejamento experimental; definir as funções desejabilidade individuais para cada resposta e maximizar a desejabilidade global, em relação aos fatores controlados.

A Tabela 4.6 apresenta os critérios de aceitabilidade para as respostas de desejabilidade global, propostos por Akhnazarova e Kafarov (1982).

Faixa (D ou d)	Descrição da Resposta		
0,80 a 1,00	Aceitável e excelente		
0,63 a 0,80	Aceitável e bom		
0,37 a 0,63	Aceitável, porém pobre		
0,20 a 0,37	Faixa de limite de aceitação		
0,00 a 0,20	Inaceitável		

Tabela 4.6: Escala de valores de desejabilidade individual ou global.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Secagem convectiva em secador de leito fixo

A secagem convectiva foi realizada a fim de avaliar o comportamento da cinética de secagem da cenoura, para posterior comparação com a secagem assistida por micro-ondas.

Durante a secagem convectiva, as temperaturas do ar utilizadas foram de 70 e 80 °C, estabelecidas de acordo com a literatura (BARBOSA, 1980; KROKIDA e MAROULIS, 1997; LIN *et al.*, 1998; PINEDO, 2003; GÓRNICKI e KALETA, 2007; ZIELINSKA e MARKOWSKI, 2007; REYES *et al.*, 2008).

Portanto, a secagem convectiva foi realizada com as seguintes condições: temperaturas do ar de 70 e 80 °C, vazão de ar igual a 0,5 m³/min e massa de amostra de 50 gramas. As amostras de cenoura foram secas até umidade menor ou igual a 12% (b.u.), padrão aceitável de umidade para produtos de vegetais secos (BRASIL, 2005).

Foram construídas curvas de secagem para ambas as condições testadas, plotando em gráfico o adimensional de umidade em função do tempo de secagem e a taxa de secagem em função do adimensional de umidade. Como as amostras não foram secas até a umidade de equilíbrio, o adimensional de umidade (X_R) foi calculado pela equação:

$$X_R = \frac{X}{X_0} \tag{5.1}$$

em que *X* representa o teor de umidade em base seca no tempo *t* e X_{θ} é o teor de umidade inicial em base seca. O conteúdo de umidade inicial para as amostras de cenoura utilizadas nesses experimentos variou entre 88,21 e 88,56% (b.u.).

A Figura 5.1 apresenta as curvas de secagem e taxas obtidas para a secagem convectiva de cubos de cenoura.



Figura 5.1: Adimensional de umidade em função do tempo de secagem (a); Taxa de secagem em função do adimensional de umidade (b).

Pela Figura 5.1 é possível verificar que a secagem de cenoura apresentou dois períodos distintos. Observa-se que o período inicial apresentou um comportamento praticamente constante, sendo este considerado o período de taxa de secagem constante, uma vez que na literatura é possível encontrar estudos para a secagem de cenoura que mostram a existência de umidade superficial neste vegetal (ARAÚJO, 2010; NAHIMANA *et al.*, 2011; MAY e PERRE, 2002; CHANGRUE, 2006, NAHIMANA e ZHANG, 2011), quando submetido a diferentes tipos de secagem.

Além disso, é importante ressaltar que não foi possível monitorar os parâmetros de temperatura interna e externa do material, temperatura (bulbo úmido e seco) e umidade (relativa e absoluta) do ar na saída do secador, o que impede maiores explicações sobre o período inicial da secagem, que foi avaliado como constante.

Após o período de taxa constante observa-se um período de taxa decrescente predominante que permaneceu até o final da secagem.

Pela Figura 5.1b verifica-se que na secagem convectiva com temperatura do ar de 80 °C o processo ocorreu à taxa constante durante aproximadamente 30 minutos iniciais, enquanto que na secagem convectiva a 70 °C o perfil da retirada de umidade inicial a taxa constante durou até aproximadamente 40 minutos. Observa-se ainda, que o aumento da temperatura do ar proporcionou maior taxa de secagem e, consequentemente, menor tempo de processo, conforme o

esperado. Na secagem convectiva a 70 °C o tempo de secagem foi de 6 horas (360 minutos), sendo que com o aumento da temperatura do ar de secagem para 80 °C houve a redução de uma hora no tempo de processo.

Após a análise do comportamento da cinética de secagem da cenoura para o processo convectivo, iniciaram-se os experimentos de secagem da cenoura com aplicação de micro-ondas.

Com base nos resultados da secagem convectiva foram realizados dois planejamentos experimentais para a secagem com aplicação de micro-ondas, conforme apresentado no *item 4.5*. O primeiro refere-se à secagem convectiva combinada com a aplicação de micro-ondas durante toda a secagem e o segundo planejamento consistiu na secagem convectiva com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo. A aplicação de micro-ondas somente a partir dos 30 minutos iniciais da secagem foi proposta, visto que, este foi o tempo aproximado para retirar a umidade superficial da cenoura durante a secagem convectiva (80 °C). Neste caso, a temperatura do ar inicial de 80 °C foi escolhida por proporcionar maior taxa de secagem, em relação à temperatura de 70 °C.

A partir dos resultados obtidos para os dois planejamentos foi possível analisar os processos no que se refere ao tempo gasto durante a secagem e a qualidade do produto final, permitindo avaliar a necessidade da aplicação de micro-ondas durante toda a secagem.

Por uma questão de conveniência e melhor entendimento durante as discussões dos resultados os planejamentos experimentais foram denominados como: secagem com aplicação contínua de micro-ondas e secagem com aplicação descontínua de micro-ondas.

5.2 Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem convectiva

Os dados obtidos para a secagem convectiva de cenoura em leito fixo foram ajustados aos modelos de Page, Midilli e Henderson e Pabis, apresentados na Tabela 4.4, *item 4.6.1*. A qualidade dos modelos foi analisada considerando o coeficiente de correlação (R^2) e a soma dos quadrados dos resíduos (*SQR*). Dentre os modelos testados, o modelo de Henderson e Pabis não apresentou ajuste satisfatório, enquanto que, tanto o modelo de Midilli quanto o modelo de Page apresentaram excelentes ajustes. Porém, o modelo de Page foi escolhido como mais adequado para predizer os dados experimentais para a secagem convectiva da cenoura por aprestar menos parâmetros (apenas dois), o que simplifica a sua utilização. Os resultados na forma gráfica e os

parâmetros encontrados para os modelos de Midilli e Henderson e Pabis encontram-se no Apêndice A.

A Tabela 5.1 apresenta os valores dos parâmetros do modelo Linear e de Page, os coeficientes de correlação e a soma dos quadrados dos resíduos para o modelo de Page.

			Modelo Linear $X_R = a + b.t$			Γ	Modelo <i>X_R=</i> exj	de Page p(-K.t ⁿ)	
Ensaios	<i>T_{ar}</i> (°C)	P (W)	а	b	R^2	K (min ⁻¹)	n	R^2	SQR
1	70	100	1,00	-0,008	0,9998	0,0056	1,15	0,9997	0,0004
2	80	300	1,00	-0,011	0,9996	0,0084	1,14	0,9998	0,0002

Tabela 5.1: Parâmetros do modelo Linear e de Page - secagem convectiva.

Pela análise da Tabela 5.1 verifica-se que o modelo linear apresentou ajuste satisfatório para os pontos do período constante com valores para os coeficientes de determinação próximos a unidade ($R^2 > 0,999$). Para o período decrescente da secagem, o modelo de Page apresentou ajuste satisfatório proporcionando baixos valores para a soma dos quadrados dos resíduos e coeficientes de determinação próximos a unidade ($R^2 > 0,999$). O parâmetro *K* está relacionado com a resistência interna à secagem e o parâmetro *n* reflete os efeitos das condições externas durante a secagem (VIEIRA, 2006). Observa-se que o aumento da temperatura do ar de 70 para 80 °C implicou em um aumento do parâmetro *K* do modelo de Page, já para o parâmetro *n* não foi observada esta mesma relação.

5.3 Resultados da secagem com aplicação de micro-ondas - Planejamento A

Neste item, estão apresentadas as cinéticas obtidas para a secagem com aplicação de micro-ondas durante todo o processo. Analisou-se a influência da temperatura do ar e da potência de micro-ondas na secagem dos cubos de cenoura.

A Figura 5.2 apresenta as curvas de perda de umidade ao longo do tempo para a cenoura submetida à secagem com aplicação contínua de micro-ondas, nas condições operacionais do Planejamento A. Os resultados na forma gráfica para o ponto central encontram-se no Apêndice B. O conteúdo de umidade inicial para a cenoura utilizada nestes ensaios experimentais variou entre 87,92 e 88,56% (b.u.).


Figura 5.2: Umidade (base seca) em função do tempo de secagem - Planejamento A.

Observa-se que para um mesmo tempo de processo, o aumento da temperatura do ar e da potência de micro-ondas, proporcionou uma redução mais acentuada da umidade, indicando o potencial da secagem em função das condições extremas de processo (T_{ar} : 50°C, P: 300 W - *ensaio 4a*).

Os resultados obtidos para o teor de umidade final (considerada neste trabalho com sendo a umidade de equilíbrio, ou seja, quando as amostras apresentaram peso constante) estão apresentados na Tabela 5.2, pela qual verifica-se que foram obtidos valores de umidade na faixa de 7,19 - 14,42% (b.u.). Desta forma, constata-se que a secagem convectiva aliada à aplicação de micro-ondas durante todo o processo proporcionou a obtenção de valores de umidade final menor ou igual a 12% (b.u.), o que é aceitável para produtos de vegetais secos (BRASIL, 2005). Porém para o *ensaio 1a* este teor de umidade não foi atingido.

Ensaios	T _{ar entrada} (°C)	Р (W)	X _{final} (% b.u.)	X _{final} (g _{umidade} / g _{ss})
1a	30	100	14,42	0,168
2a	30	300	9,19	0,101
3a	50	100	10,94	0,122
4a	50	300	7,18	0,077
5a (C)	40	200	10,68	0,119
6a (C)	40	200	10,30	0,114
7a (C)	40	200	9,98	0,110

Tabela 5.2: Resultados de umidade final - Planejamento A.

* X_{final} representa a umidade final, que corresponde a umidade de equilíbrio.

Nas Figuras 5.3 e 5.4 são apresentadas as taxas de secagem em função do teor de umidade (base seca), para os experimentos referentes ao Planejamento A e ao ponto central. A partir dos resultados do ponto central é possível verificar que houve uma boa reprodutibilidade do processo de secagem.



Figura 5.3: Taxa de secagem em função da umidade (base seca) - Planejamento A.



Figura 5.4: Taxa de secagem em função da umidade (base seca) para os experimentos referentes ao ponto central, Planejamento A.

Pela análise dos gráficos de taxas de secagem para os experimentos do Planejamento A, Figuras 5.3 e 5.4, observa-se que as curvas apresentaram dois períodos distintos de secagem.

Durante o período inicial, percebe-se um discreto pico seguido de um leve decréscimo e, na sequência, uma evolução decrescente da umidade, principalmente para as condições com níveis elevados de potência de micro-ondas. Isto pode ter ocorrido devido ao aquecimento por micro-ondas, onde na curva característica de taxa de secagem dielétrica tem-se um período de aumento de pressão (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Porém, como este pico foi pouco pronunciado e o comportamento da curva para o período inicial foi praticamente constante, este período foi considerado o período de taxa de secagem constante, assim como analisado para a secagem puramente convectiva, baseando-se nas mesmas considerações já expostas anteriormente. Após o período inicial observou-se um período de taxa decrescente predominante.

Por meio das curvas de secagem, Figuras 5.2 a 5.4, é possível observar que o período de taxa de secagem constante para a cenoura seca com aplicação contínua de micro-ondas durou até aproximadamente os 30 minutos iniciais de processo, exceto para o *ensaio 4a* (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W), no qual este período permaneceu durante aproximadamente 25 minutos.

Pela análise dos resultados constatou-se que, conforme esperado, a maior taxa de secagem foi obtida para o *ensaio 4a*, que corresponde a secagem com emprego de maior temperatura do ar e potência de micro-ondas. Por outro lado, a menor taxa foi observada para o *ensaio 1a* (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W), referente à condição mais branda de secagem.

As condições dos *ensaios 2a* (T_{ar} : 30 °C, *P*: 300 W) e *3a* (T_{ar} : 50 °C, *P*: 100 W) proporcionaram taxas de secagem semelhantes no período inicial. Contudo, no decorrer do processo, principalmente no período decrescente, observa-se a disparidade das curvas desses ensaios em razão da geração mais rápida de calor no interior produto, proporcionada pela maior potência de micro-ondas (300 W). Isto demonstra a eficiência da aplicação de maiores níveis de micro-ondas para a retirada da umidade interna do material. Entretanto, ressalta-se que a combinação da maior temperatura do ar com a maior potência de micro-ondas (T_{ar} : 50 °C, *P*: 300 W – *ensaio 4a*) afetou consideravelmente a cinética de secagem, resultando em menor tempo de processo e menor umidade final do material.

A Tabela 5.3 apresenta o tempo de secagem para o período constante e também o tempo total de processo para todas as condições do Planejamento A. O tempo total de processo representa o tempo necessário para que as amostras atingissem peso constante e inclui o período de taxa constante e decrescente. O teor de umidade no peso constante para cada condição de secagem foi apresentado na Tabela 5.2.

Ensaios	T _{ar} (°C)	Р (W)	t _{Nc} (min)	t _{total} (min)
1 ^a	30	100	30	160
$2^{\mathbf{a}}$	30	300	30	120
3a	50	100	30	140
4a	50	300	25	90
5a(C)	40	200	30	130
6a(C)	40	200	30	130
7a(C)	40	200	30	130

Tabela 5.3: Intervalo de tempo para os períodos distintos de secagem - Planejamento A.

* t_{Nc} : tempo de secagem para o período de taxa constante; t_{total} : tempo total de secagem incluindo o período de taxa constante e decrescente.

De acordo com os dados da Tabela 5.3 observa-se que o tempo de processo para a secagem de cenoura com aplicação contínua de micro-ondas nas diferentes condições do

Planejamento A variou entre 90 e 160 minutos, sendo que o menor tempo de secagem obtido foi para o *ensaio 4a* (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W). Em contrapartida, o maior tempo de secagem foi obtido para o *ensaio 1a* (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W), referente à condição mais branda de secagem.

Dessa forma, comparando-se as condições de secagem utilizadas no Planejamento A verifica-se que a condição extrema de secagem (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W - *ensaio 4a*) proporcionou uma redução de 43,75% no tempo total de processo quando comparada com a condição mais branda de secagem (T_{ar} : 30 °C; P: 100 W - *ensaio 1a*), considerando o tempo necessário para as amostras atingirem peso constante.

A Figura 5.5 mostra a comparação da secagem assistida por micro-ondas durante todo o processo e a secagem puramente convectiva a 80 °C. A umidade em base úmida 12% (b.u.) está representada em base seca, o que corresponde a um valor de 0,1363 g $_{umidade}$ / g $_{ss}$ (linha pontilhada do gráfico).

Verifica-se que para as condições de secagem com aplicação contínua de micro-ondas (exceto para o *ensaio 1a*), o tempo requerido para as amostras atingirem teor de umidade menor ou igual a 12% (b.u) variou entre 70 e 120 minutos, enquanto que o tempo de secagem necessário para atingir o mesmo teor de umidade para a secagem puramente convectiva foi de 300 minutos. Portanto, a aplicação de micro-ondas acelerou o processo de secagem, proporcionando uma redução de pelo menos 60% no tempo de secagem.



● 1 T_{ar}: 30°C, P: 100W ■ 2 T_{ar}: 30°C, P: 300W ▲ 3 T_{ar}: 50°C, P: 100W ◆ 4 T_{ar}: 50°C, P: 300 ■ T_{ar}: 80°C

Figura 5.5: Curvas de secagem para as condições do Planejamento A e para a secagem puramente convectiva (a). Período final da secagem para ambos os processos (b).

Para facilitar a compreensão da influência das condições de processo (temperatura do ar e potência de micro-ondas) na cinética de secagem, foram realizadas análises comparativas entre as curvas de secagem.

A Figura 5.6 apresenta as curvas de secagem referentes aos *ensaios 1a* (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) e **3a** (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) e a Figura 5.7 apresenta os *ensaios 2a* (T_{ar} : 30 °C, P: 300 W) e **4a** (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W). Por meio destas figuras, é possível observar a influência da temperatura do ar na secagem de cenoura para uma mesma potência de micro-ondas.



Figura 5.6: Influência da temperatura do ar na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da temperatura do ar na taxa de secagem (c), para os *ensaios 1a* (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) e *3a* (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W).



Figura 5.7: Influência da temperatura do ar na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da temperatura do ar na taxa de secagem (c), para os *ensaios 2a* (T_{ar} : 30 °C, P: 300 W) e *4a* (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W).

Pela análise das Figuras 5.6 e 5.7 verifica-se que o aumento da temperatura do ar resultou em maior taxa de secagem para uma mesma condição de potência de micro-ondas aplicada. Para a temperatura de 30 °C, a redução no teor de umidade foi mais lenta em comparação com a temperatura de 50 °C, como pode ser observado pelas Figuras 5.6a e 5.7a. Possivelmente, o

aumento na temperatura do ar, para uma mesma potência de micro-ondas, ocasionou a elevação da temperatura interna do produto, contribuindo para a aceleração da evaporação da água. Pereira (2007) constatou durante a secagem de bananas osmoticamente desidratadas que o aumento na temperatura do ar, resultou em maior temperatura interna do produto, para uma mesma potência de micro-ondas aplicada, consequentemente maiores valores na taxa de secagem foram observados.

Considerando-se uma mesma potência de micro-ondas, a influência da temperatura do ar é claramente observada no período inicial da secagem. Porém, seu efeito também é constatado quando avalia-se o processo de secagem como um todo (composto pela taxa constante e decrescente).

Para uma mesma potência de micro-ondas aplicada referente a 100 W (*ensaios 1a* e 3a – Figura 5.6c) a taxa de secagem média no período inicial foi de 0,0196 min⁻¹ para o *ensaio 3a* (50 °C), enquanto que para o *ensaio 1a* (30 °C) este valor foi de 0,0145 min⁻¹, demonstrando o efeito da maior temperatura do ar na retirada da umidade, para uma mesma potência de micro-ondas. Comportamento semelhante pode ser observado quando a potência de micro-ondas aplicada foi de 300 W (*ensaios 2a e 4a* – Figura 5.7c). Prabhanjan *et al.* (1995) também observaram que a temperatura do ar influenciou na secagem convectiva assistida por micro-ondas da cenoura, sendo que para altos níveis de potência de micro-ondas a temperatura do ar teve seu efeito reduzido.

A Figura 5.8 mostra as curvas de secagem referentes aos *ensaios 1a* (30 °C, 100 W) e 2a (30 °C, 300 W) e a Figura 5.9 apresenta as curvas dos *ensaios 3a* (50 °C, 100 W) e 4a (50 °C, 300 W). Nestas figuras, é possível observar a influência da potência de micro-ondas na secagem de cenoura para uma mesma temperatura do ar.



Figura 5.8: Influência da potência de micro-ondas na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da potência de micro-ondas na taxa de secagem (c), para os *ensaios 1a* (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) e **2a** (T_{ar} : 30 °C, P: 300 W).



Figura 5.9: Influência da potência de micro-ondas na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da potência de micro-ondas na taxa de secagem (c), para os *ensaios 3a* (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) e 4a (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W).

Em relação à influência da potência de micro-ondas, pôde-se constatar que para uma mesma temperatura do ar, o aumento da potência de micro-ondas proporcionou maior taxa de secagem durante todo o processo, conforme esperado. Isto pode ser explicado, pois quanto maior a potência de micro-ondas aplicada maior é a quantidade de calor gerada no interior do material e, consequentemente, um aumento na pressão de vapor da água ocorrerá forçando o movimento

desta para a superfície do produto (Wang e Xi, 2005). Deste modo, a vaporização da umidade será mais rápida e a diferença de pressão estabelecida entre o centro e a superfície do material maior, resultando em menor tempo de secagem.

De uma forma geral, para as condições do Planejamento A, a potência de micro-ondas apresentou efeito mais pronunciado do que a temperatura do ar, na cinética de secagem da cenoura. Este efeito pode ser observado pelas curvas de taxas de secagem, de modo que as curvas comparativas referentes à influência da potência de micro-ondas (Figuras 5.8 e 5.9) apresentaram maiores diferenças entre si ao longo do tempo de secagem, comparadas às curvas correspondentes à influência da temperatura do ar (Figuras 5.6 e 5.7).

A maior influência da potência de micro-ondas também pode ser visualizada pela análise estatística dos resultados, considerando um mesmo tempo de secagem de 90 minutos (menor tempo de secagem obtido dentre as condições do Planejamento A). Diante disto, verificou-se a influência das condições operacionais no conteúdo de umidade (b.s.) da cenoura. A influência dos efeitos principais e de suas interações está apresentada no diagrama de *Pareto*, onde os efeitos estatisticamente significativos localizam-se à direita do limiar de significância ($p \le 0,05$), conforme mostra a Figura 5.10.



Figura 5.10: Diagrama de *Pareto* para a umidade (base seca) no tempo de 90 minutos – Planejamento A.

Pela Figura 5.10 verifica-se que os efeitos de ambas as variáveis operacionais foram significativos para o conteúdo de umidade do produto no tempo determinado, com um limite de

confiança de 95%. Além disso, é possível analisar que a interação entre as variáveis independentes não teve influência significativa na resposta. Observa-se ainda, que os efeitos significativos apresentaram influência negativa na resposta estudada, indicando que com o aumento da potência de micro-ondas ou da temperatura do ar o conteúdo de umidade diminui, conforme esperado. Adicionalmente, pode-se analisar que o efeito da potência de micro-ondas foi o mais pronunciado, enquanto que a temperatura do ar apresentou um efeito secundário.

Por meio da análise comparativa entre os ensaios do Planejamento A (Figuras 5.6 a 5.9), constatou-se que os ensaios referentes aos pontos extremos, *ensaios 1a* (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) e 4a (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W) resultaram em cinéticas de secagem com diferenças significativas das demais. Para o *ensaio 4a* a taxa de secagem foi evidentemente maior, o que consequentemente proporcionou menor umidade final e tempo de secagem. Por outro lado, as condições do *ensaio 1a*, resultaram em menor taxa de secagem e, portanto, maior umidade final e tempo de processo.

5.3.1 Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem - Planejamento A

Os dados obtidos para a secagem de cenoura em leito fixo com aplicação contínua de micro-ondas, para as diferentes condições do Planejamento A, foram ajustados aos modelos de Page, Midilli e Henderson e Pabis, apresentados na Tabela 4.4, *item 4.6.1*.

A qualidade dos modelos foi analisada considerando o maior coeficiente de correlação (R^2) e o menor valor da soma dos quadrados dos resíduos (*SQR*). Para o modelo de Henderson e Pabis o ajuste não foi satisfatório. Porém, os dados foram satisfatoriamente ajustados pelo modelo de Page e também pelo modelo de Midilli. Para algumas condições de secagem, o modelo de Midilli proporcionou valores da soma dos quadrados dos resíduos levemente menores e coeficientes de correlação ligeiramente maiores quando comparados com os valores encontrados para o modelo de Page.

Apesar dessas considerações serem relevantes na avaliação da qualidade do modelo, é importante destacar que as diferenças entre os valores foram pequenas e não ocorreram em todas as condições. Isto permitiu escolher o modelo de Page como o mais adequado, visto que, este modelo possui apenas dois parâmetros, simplificando sua utilização. Dessa forma, este modelo foi considerado o mais adequado para predizer os dados experimentais para a secagem de cenoura com aplicação contínua de micro-ondas nas condições estudadas neste trabalho.

Os resultados na forma gráfica e os parâmetros encontrados para os modelos de Midilli e Henderson e Pabis encontram-se no Apêndice B. A Tabela 5.4 apresenta os valores dos parâmetros do modelo Linear e de Page, dos coeficientes de correlação e da soma dos quadrados dos resíduos para o modelo de Page.

			Modelo Linear X_{R} = a+b.t			I	Modelo X _{R=} exp	de Page p (- <i>K</i> .t ⁿ)	
Ensaios	<i>T_{ar}</i> (°C)	P (W)	а	b	R^2	<i>K</i> (min ⁻¹)	n	R^2	SQR
1a	30	100	1,00	-0,014	0,9997	0,0043	1,43	0,9993	0,0009
2a	30	300	1,00	-0,020	0,9996	0,0066	1,46	0,9998	0,0001
3a	50	100	0,99	-0.020	0,9995	0,0090	1,35	0,9991	0,0006
4a	50	300	1,00	-0,028	0,9989	0,0100	1,49	0,9999	0,0001
5a(C)	40	200	1,00	-0,019	0,9997	0,0046	1,53	0,9995	0,0003
6a(C)	40	200	1,00	-0,020	0,9994	0.0047	1,56	0,9997	0,0001
7a(C)	40	200	1,00	-0,020	0,9995	0,0056	1,51	0,9996	0,0002

Tabela 5.4: Parâmetros do modelo Linear e de Page - Planejamento A.

Por meio da Tabela 5.4 observa-se que o modelo linear apresentou ajuste satisfatório para os pontos do período constante, com valores para os coeficientes de determinação próximos a unidade ($R^2 > 0,998$). Para o período decrescente da secagem os valores obtidos para os coeficientes de determinação próximos a unidade ($R^2 > 0,999$) sugerem que o modelo de Page conseguiu ajustar adequadamente os dados experimentais. Este fato é confirmado quando se analisa os baixos valores da soma dos quadrados dos resíduos (*SQR*).

Verifica-se que os valores para a constante de secagem (*K*), do modelo de Page, são da mesma ordem de grandeza dos valores reportados nos trabalhos de Reyes *et al.* (2008), Prabhanjan *et al.* (1995) e Darvishi *et al.* (2012), para a secagem de cenoura com aplicação de micro-ondas, que variam entre 0,0023 e 0,075 min⁻¹. Os dois primeiros autores citados também encontraram que o modelo de Page ajustou melhor os dados experimentais, entretanto o último autor relatou o modelo de Midilli como o mais adequado. Observa-se ainda que o menor valor do parâmetro *K* foi obtido na condição mais branda de secagem (T_{ar} : 30 °C, *P*: 100 W - *ensaio 1a*), enquanto que o maior valor foi obtido para a condição mais intensa (T_{ar} : 50 °C, *P*: 300 W - *ensaio 4a*). Resultados similares foram observados por Darvishi *et al.* (2012) que estudaram a

secagem de cenoura com aplicação de micro-ondas e reportaram que a aplicação de maiores níveis de radiação proporcionou maiores valores da constante de secagem *K* do modelo de Page.

Constatou-se que para uma mesma temperatura do ar (30 °C), elevando a potência de micro-ondas o parâmetro *K* é aumentado, o mesmo ocorre para a temperatura de 50 °C, porém o aumento do valor de *K* é menos pronunciado. Resultados semelhantes foram encontrados por Prabhanjan *et al.* (1995) no que se refere ao aumento do parâmetro *K*. Os autores observaram o aumento deste parâmetro quando a densidade de potência foi elevada de 2 W.g⁻¹ para 4 W.g⁻¹, sendo que na condição de maior temperatura do ar empregada (60 °C) o aumento de *K* foi menos pronunciado.

De forma análoga, para uma mesma potência de micro-ondas, o aumento da temperatura do ar proporcionou maiores valores do parâmetro K, sendo esse efeito levemente mais pronunciado para a menor potência de micro-ondas (100 W). Para ambos os parâmetros do modelo de Page (K e n) foi observada reprodutibilidade com relação aos dados do ponto central.

Os valores de *n* encontrados na literatura variam de 1,0 a 1,85, desta forma observa-se que a faixa de valores obtida neste trabalho está de acordo com a literatura, para a secagem convectiva com aplicação de micro-ondas de cenoura (Reyes *et al.*, 2008; Darvishi *et al.*, 2012) bagaço de maçã (Wang *et al.*, 2007), abóbora Alibas (2007) e pistaches (Kouchakzadeh e Shafeei, 2010). Porém, para este parâmetro não foi encontrada nenhuma relação com as condições operacionais de secagem.

5.4 Resultados da secagem com aplicação de micro-ondas - Planejamento B

Da mesma forma que para o Planejamento A, por meio do sistema de amostragem utilizado durante a secagem, obteve-se o conteúdo de umidade da cenoura em diferentes tempos de secagem.

A Figura 5.11 mostra as curvas de secagem, em que se explorou a perda de umidade em função do tempo para as amostras submetidas à secagem com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo. Os resultados na forma gráfica para o ponto central encontram-se no Apêndice C. Para o Planejamento B, a sigla $T_{ar inicial}$ apresentada tanto nos gráficos de secagem quanto nas tabelas dos resultados, representa a temperatura do ar de secagem (80 °C) durante os 30 minutos iniciais de processo com secagem puramente convectiva.



Figura 5.11: Umidade (base seca) em função do tempo de secagem - Planejamento B.

Pela Figura 5.11 verifica-se que a condição extrema de secagem ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 50 °C, *P*: 300 W - *ensaio 4b*) ocasionou redução mais rápida do teor de umidade. Por outro lado, para a condição de secagem mais branda ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, *P*: 100 W - *ensaio 1b*) a redução do teor de umidade foi consideravelmente mais lenta, da mesma forma que observado para o Planejamento A. Os *ensaios 2b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, *P*: 300 W) *e 3b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 50 °C, *P*: 100 W) apresentaram curvas de secagem praticamente sobrepostas. Porém, a condição com maior potência de micro-ondas (*ensaio 2b*) resultou em menor umidade e tempo de processo. Os *ensaios 2b e 4b* do Planejamento B apresentaram diferenças menos acentuadas quando comparados com os *ensaios 2a e 4a* do Planejamento A.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados para o teor de umidade final (considerada como a umidade de equilíbrio, ou seja, quando as amostras apresentaram peso constante). Observa-se que os valores de umidade final variaram entre 7,96 - 14,57% (b.u.). Da mesma forma que verificado no Planejamento A, todas as condições experimentais proporcionaram umidade final menor ou igual a 12% (b.u.), exceto para o *ensaio 1b*. A cenoura utilizada nesses experimentos apresentou um conteúdo de umidade inicial entre 88,52 e 88,60 % (b.u.).

Ensaios	T _{ar inicial} (°C)	<i>T_{ar}</i> (°C)	Р (W)	X _{final} (% b.u.)	X _{final} (g _{umidade} / g _{ss})
1b	80	30	100	14,57	0,170
2b	80	30	300	9,69	0,107
3b	80	50	100	10,50	0,117
4b	80	50	300	7,96	0,086
5b(C)	80	40	200	10,30	0,114
6b(C)	80	40	200	10,01	0,111
7b(C)	80	40	200	9,72	0,107

Tabela 5.5: Resultados de umidade final - Planejamento B.

* X_{final} representa a umidade final, que corresponde a umidade de equilíbrio.

A partir dos resultados constatou-se que a combinação da secagem convectiva com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo, também se mostrou interessante, pois proporcionou valores de umidade final aceitável para produtos de vegetais secos (BRASIL, 2005). Nas Figuras 5.12 e 5.13 são apresentadas as taxas de secagem em função da umidade (b.s.), para os experimentos realizados nas condições de secagem do Planejamento B e no ponto central.



Figura 5.12: Taxa de secagem em função da umidade (b.s.) - Planejamento B.



Figura 5.13: Taxa de secagem em função da umidade (b.s.) para os experimentos referentes ao ponto central, Planejamento B.

Pelos resultados do ponto central é possível verificar que houve boa reprodutibilidade do processo. Pode-se observar pelas Figuras 5.12 e 5.13 que a cinética de secagem de cenoura apresentou dois períodos distintos, um período de taxa de secagem constante e um período de taxa de secagem decrescente predominante, assim como observado no Planejamento A. Para o período constante, os valores de taxas foram bastantes próximos uns dos outros, visto que nos 30 minutos iniciais a condição de secagem utilizada foi a mesma (T_{ar} : 80 °C, secagem convectiva).

Verifica-se ainda que quando a energia de micro-ondas foi aplicada (a partir dos 30 minutos iniciais de secagem) as taxas apresentaram um rápido aumento, exceto para o *ensaio 1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, P: 100 W), confirmando o efeito da aplicação de micro-ondas no que se refere à aceleração da retirada de umidade do material.

Pelas curvas de secagem, Figuras 5.11 a 5.13, constatou-se que para o período correspondente aproximadamente aos 50 minutos iniciais, a secagem ocorreu à taxa constante para o *ensaio 4b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 50 °C, P: 300 W), sendo que para o *ensaio 1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, P: 100 W), a taxa de secagem permaneceu constante até aproximadamente 30 minutos. Para os demais experimentos a taxa de secagem constante permaneceu durante aproximadamente 40 minutos de processo. A maioria dos resultados obtidos para o período de

taxa constante difere dos resultados encontrados para a secagem de cenoura puramente convectiva (T_{ar} : 80 °C), em que verificou-se que o período de taxa constante foi de aproximadamente 30 minutos, da mesma forma que observado para o *ensaio 1b*.

Este comportamento pode ser atribuído ao início da aplicação da energia de micro-ondas, sendo que esta prevaleceu na retirada de umidade do material, dessa forma a evaporação foi conservada a um nível maior e constante por um período de tempo mais prolongado. Nessa fase o material apresenta grande quantidade de água livre na sua superfície e água na forma não ligada no seu interior, que possuem alta capacidade de absorção de micro-ondas e facilidade de difusão na matriz sólida. Porém, este comportamento não foi observado quando foram utilizados os menores parâmetros de potência de micro-ondas e temperatura do ar ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, *P*: 100 W - *ensaio 1b*). Neste caso, o baixo nível de potência aliado à baixa temperatura do ar não foram suficientes para conservar a evaporação constante por maior tempo. Resultados semelhantes foram encontrados por Rosa (2012) para a secagem de PHB, em que foi constatado que a secagem com aplicação de micro-ondas a partir dos 20 minutos iniciais de secagem resultou em maior período de taxa de secagem constante comparada à secagem convectiva.

Comparando os resultados de taxa de secagem constante dos Planejamentos A e B (Figuras 5.3 e 5.12), observa-se que para o modo de secagem contínuo (Planejamento A) as taxas de secagem no período constante apresentaram valores médios entre 0,0145 m⁻¹ e 0,0280 m⁻¹, já para o Planejamento B, os valores médios para as taxas de secagem constante variaram entre 0,0141 m⁻¹ e 0,0150 m⁻¹. Portanto, as taxas de secagem no período constante foram maiores em todos os ensaios do Planejamento A, demonstrando que a aplicação de micro-ondas desde o início da secagem conseguiu acelerar ainda mais a retirada da umidade superficial, quando comparado à aplicação da radiação somente a partir dos 30 minutos iniciais do processo.

A Tabela 5.6 apresenta o tempo de secagem para o período constante e também o tempo total de processo, para todas as condições do Planejamento B. O tempo total de processo representa o tempo necessário para que as amostras atingissem peso constante e inclui o período de taxa constante e decrescente. O teor de umidade no peso constante para cada condição de secagem foi apresentado na Tabela 5.5.

Ensaios	T _{ar inicial} (°C)	<i>T_{ar}</i> (°C)	Р (W)	t _{Nc} (min)	t _{total} (min)
1b	80	30	100	30	180
2b	80	30	300	40	140
3b	80	50	100	40	160
4b	80	50	300	50	110
5b(C)	80	40	200	40	150
6b(C)	80	40	200	40	150
7b(C)	80	40	200	40	150

Tabela 5.6: Intervalo de tempo para os períodos distintos de secagem - Planejamento B.

* t_{Nc} : tempo de secagem para o período de taxa constante; t_{total} : tempo total de secagem incluindo o período de taxa constante e decrescente.

Pela análise dos resultados da Tabela 5.6, verifica-se que para todas as condições de secagem do Planejamento B o tempo total de processo foi maior em relação ao Planejamento A. O tempo total de processo para as condições do Planejamento B variou entre 110 e 180 minutos, enquanto que para o Planejamento A, a faixa de tempo total variou entre 90 e 160 minutos. Menor tempo de processo para todas as condições de secagem com aplicação contínua de micro-ondas também foram relatados em Changrue (2006) durante a secagem com micro-ondas a vácuo de cenoura, de forma que o modo intermitente acarretou em maior tempo de secagem.

Conforme observado para o Planejamento A, no Planejamento B a maior taxa de secagem e, consequentemente, o menor tempo de processo foram obtidos no *ensaio 4b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 50 °C, P: 300 W), enquanto que a condição do *ensaio 1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, P: 100 W), resultou no maior tempo de secagem. Assim sendo, observa-se que a condição de secagem mais intensa (*ensaio 4b*), ocasionou uma redução de aproximadamente 39% no tempo total de processo em relação à condição mais branda de secagem (*ensaio 1b*).

A Figura 5.14 ilustra a comparação da secagem assistida por micro-ondas a partir de 30 minutos de processo e a secagem puramente convectiva (80 °C). Observa-se que para as condições de secagem com aplicação descontínua de micro-ondas, o tempo requerido para atingir teor de umidade menor ou igual a 12% (b.u) variou entre 100 e 150 minutos, enquanto que o tempo de secagem necessário para atingir o mesmo teor de umidade para a secagem puramente convectiva foi de 300 minutos. Portanto, a aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais da secagem acelerou o processo, proporcionando uma redução de pelo menos 50% no

tempo de secagem dos cubos de cenoura em relação à secagem puramente convectiva. Ressaltase que no Planejamento A esta redução foi de pelo menos 60%, maior que a obtida para o Planejamento B. Na Figura 5.14 a umidade em base úmida 12% (b.u.) está representada em base seca, o que corresponde a um valor de 0,1363 g _{umidade} / g _{ss} (linha pontilhada no gráfico).



Figura 5.14: Curvas de secagem para as condições do Planejamento B e para a secagem puramente convectiva (a). Período final da secagem para ambos os processos (b).

Com o intuito de investigar a influência das condições operacionais (temperatura do ar e potência de micro-ondas) na cinética de secagem, foram realizadas análises comparativas entre as curvas de secagem. As figuras a seguir apresentam as curvas de secagem referentes aos *ensaios 1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, *P*: 100 W) e *3b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 50 °C, *P*: 100 W) na Figura 5.15 e *ensaios 2b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, *P*: 300 W) e *4b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 50 °C, *P*: 300 W) na Figura 5.16, em que se observa a influência da temperatura do ar no segundo estágio da secagem de cenoura, para uma mesma potência de micro-ondas.



(c)

Figura 5.15: Influência da temperatura do ar na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da temperatura do ar na taxa de secagem (c), para os *ensaios 1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) e **3b** ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W).



Figura 5.16: Influência da temperatura do ar na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da temperatura do ar na taxa de secagem (c), para os *ensaios 2b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, *P*: 300 W) e *4b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, *P*: 300 W).

Pela análise das Figuras 5.15 e 5.16 verifica-se que o aumento da temperatura do ar contribuiu para a retirada da umidade da cenoura, acelerando o processo de secagem a partir do período de taxa de secagem decrescente.

É possível observar ainda que a influência da temperatura do ar no período de secagem decrescente foi mais pronunciada para a menor potência de micro-ondas utilizada (100 W – Figura 5.15). Isso porque para baixos níveis de potência de micro-ondas a temperatura apresenta maior influência do que para altos níveis de potência aplicada. Para a condição de maior energia incidente 300 W (Figura 5.16), a temperatura apresentou um discreto efeito no final da secagem, a partir de aproximadamente 80 minutos.

As figuras a seguir apresentam as curvas de secagem referentes aos *ensaios 1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) e **2b** ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 300 W) na Figura 5.17 e *ensaios* **3b** ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) e **4b** ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 300 W) na Figura 5.18, em que se verifica a influência da potência de micro-ondas na secagem de cenoura para as condições do Planejamento B.

Observa-se que a potência de micro-ondas apresentou maior efeito quando a menor temperatura do ar foi empregada (30 °C - Figura 5.17). Assim como constatado para o Planejamento A, o aumento da potência de micro-ondas proporcionou maior taxa de secagem, conforme esperado. Da mesma maneira, verifica-se o maior efeito da potência de micro-ondas em relação à temperatura do ar, na cinética de secagem.



Figura 5.17: Influência da potência de micro-ondas na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da potência de micro-ondas na taxa de secagem (c), para os *ensaios 1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) e **2b** ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 300 W).



Figura 5.18: Influência da potência de micro-ondas na secagem de cenoura (a); período final (b); influência da potência de micro-ondas na taxa de secagem (c), para os *ensaios 3b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, *P*: 100 W) e *4b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, *P*: 300 W).

Pela análise estatística dos resultados verificou-se a influência das condições operacionais da secagem no conteúdo de umidade (b.s.) da cenoura, considerando o tempo de secagem de 110 minutos (menor tempo obtido para as condições do Planejamento B). A influência dos efeitos principais e de suas interações, para um limite de confiança de 95% está apresentada no diagrama

de *Pareto*, onde os efeitos estatisticamente significativos localizam-se à direita do limiar de significância ($p \le 0.05$), conforme ilustra a Figura 5.19.



Figura 5.19: Diagrama de Pareto para a umidade no tempo de 110 minutos – Planejamento B.

Pela Figura 5.19 verifica-se que ambas as variáveis operacionais e sua interação apresentaram efeitos significativos para o conteúdo de umidade do produto no tempo determinado. Observa-se ainda, que os efeitos da potência de micro-ondas e da temperatura do ar apresentaram influência negativa na resposta, indicando que com o aumento da potência de micro-ondas ou da temperatura do ar o conteúdo de umidade diminui, conforme esperado. Contudo, o efeito da potência de micro-ondas foi o mais pronunciado, conforme observado nas curvas de secagem.

Por meio da análise comparativa entre os experimentos (Figuras 5.15 a 5.18), constatouse que o *ensaio 1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) apresentou cinética de secagem com diferenças significativas das demais. De modo que, neste experimento, a taxa de secagem foi consideravelmente menor, sendo a secagem mais lenta e a umidade final do produto maior. Em contrapartida, as condições do *ensaio 4b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 300 W) forneceram maior taxa de secagem, o que proporcionou menor umidade final e tempo de secagem.

5.4.1 Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem - Planejamento B

Conforme realizado para o Planejamento A, os dados obtidos para a secagem do Planejamento B foram ajustados aos modelos matemáticos de secagem.

Assim como verificado no Planejamento A, os modelos de Page e Midilli apresentaram melhores ajustes para as condições do Planejamento B. Entretanto, o modelo de Page foi considerado o mais adequado por apresentar menos parâmetros e, portanto, maior simplicidade para utilização. Os resultados na forma gráfica e os parâmetros encontrados para os modelos de Midilli e Henderson e Pabis encontram-se no Apêndice C.

Na Tabela 5.7 são apresentados os parâmetros do modelo Linear e de Page, os coeficientes de correlação e a soma dos quadrados dos resíduos para o modelo de Page.

			Modelo LinearModelo deX _R =a+b.tX _{R=} exp(de Page xp(- <i>K</i> .t ⁿ)		
Ensaios	T _{ar} inicial (°C)	<i>T_{ar}</i> (°C)	Р (W)	а	b	R^2	<i>K</i> (min ⁻¹)	n	R^2	SQR
1b	80	30	100	1,00	-0,014	0,9999	0,0086	1,22	0,9995	0,0007
2b	80	30	300	1,01	-0.015	0,9985	0,0018	1,69	0,9997	0,0007
3b	80	50	100	1,00	-0,014	0,9997	0,0021	1,64	0,9993	0,0005
4b	80	50	300	1,00	-0,015	0,9989	0,0010	1,85	0,9976	0,0007
5b(C)	80	40	200	1,01	-0,015	0,9988	0,0019	1,68	0,9993	0,0002
6b(C)	80	40	200	1,01	-0,015	0,9987	0,0013	1,78	0,9987	0,0004
7b(C)	80	40	200	1,01	-0,015	0,9986	0,0012	1,80	0,9989	0,0004

Tabela 5.7: Parâmetros do modelo Linear e de Page - Planejamento B.

Pela Tabela 5.7 verifica-se que o modelo linear apresentou ajuste satisfatório para os pontos do período constante, com valores para os coeficientes de determinação próximos a unidade ($R^2 > 0,998$). Para o período decrescente da secagem, o ajuste satisfatório do modelo de Page é constatado pelos coeficientes de determinação próximos a unidade ($R^2 > 0,997$) e pelos baixos valores da soma dos quadrados dos resíduos (*SQR*).

Os valores para o parâmetro *K* do modelo de Page são da mesma ordem de grandeza dos valores reportados na maioria das condições do Planejamento A. Porém, no Planejamento B os valores deste parâmetro foram ligeiramente menores para a maioria das condições, em comparação com os valores do Planejamento A.

Para os valores de K obtidos nas condições do Planejamento B não foi encontrada nenhuma relação com as condições operacionais da secagem. Para o parâmetro n o maior valor

foi obtido na condição mais intensa de secagem ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 300 W - *ensaio* 4b) e o menor valor na condição mais branda de secagem ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 100 W *ensaio* 1b). Para ambos os parâmetros do modelo de Page (K e n) foi observada reprodutibilidade para os experimentos do ponto central.

5.5 Cinética de secagem - comparação entre os Planejamentos A e B

Com o intuito de comparar a aplicação de micro-ondas somente a partir dos 30 minutos iniciais da secagem frente à secagem com aplicação contínua de micro-ondas, as curvas de perda de umidade ao longo do tempo e da taxa de secagem em função da umidade (b.s.) foram traçadas de forma sobrepostas, para as mesmas condições de processo utilizadas nos dois modos de secagem (contínuo e descontínuo). Nestes gráficos, é possível observar o efeito do modo de operação na secagem dos cubos de cenoura.

A Figura 5.20 apresenta as curvas de secagem e taxas nas condições mais brandas de processo, para os dois modos de secagem.



Figura 5.20: Curvas de secagem (a) e taxas de secagem (b) para o processo com aplicação contínua de micro-ondas (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W – *ensaio 1a*) e com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 100 W – *ensaio 1b*).

A partir da Figura 5.20 é possível verificar que os diferentes modos de secagem não resultaram em mudança representativa no início do processo. Contudo, é possível perceber diferença notória a partir de aproximadamente 50 minutos de secagem, de modo que o processo com aplicação de micro-ondas contínua acelerou a retirada de umidade da cenoura. Neste caso, o tempo de secagem foi de 160 minutos. Em contrapartida, a secagem com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo (Planejamento B) resultou em menor taxa de secagem e, consequentemente, maior tempo de processo (180 minutos).

A Figura 5.21 apresenta as curvas de secagem e taxas para as condições dos *ensaios 2a* e *2b* (T_{ar} : 30 °C, *P*: 300 W – Planejamento A; $T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, *P*: 300 W – Planejamento B) e a Figura 5.22 apresenta as curvas de secagem e taxas para as condições dos *ensaios 3a* e *3b* (T_{ar} : 50 °C, *P*: 100 W – Planejamento A; $T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, *P*: 100 W – Planejamento B). Por meio destas figuras é possível analisar que a secagem com aplicação contínua de microondas foi a mais eficiente, resultando em maior taxa de secagem desde o início do processo.



Figura 5.21: Curvas de secagem (a) e taxas de secagem (b) para o processo com aplicação contínua de micro-ondas (T_{ar} : 30 °C, P: 300 W – *ensaio 2a*) e com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 300 W – *ensaio 2b*).



Figura 5.22: Curvas de secagem (a) e taxas de secagem (b) para o processo com aplicação contínua de micro-ondas (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W – *ensaio 3a*) e com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W – *ensaio 3b*).

A Figura 5.23 apresenta as curvas de secagem e taxas nas condições mais intensas de processo, para os dois modos de aplicação da radiação.



Figura 5.23: Curvas de secagem (a) e taxas de secagem (b) para o processo com aplicação contínua de micro-ondas (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W – *ensaio 4a*) e com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 300 W – *ensaio 4b*).

Observando a Figura 5.23, nota-se que as condições mais intensas de processo resultaram em maiores diferenças nas cinéticas de secagem. Observa-se que a secagem com aplicação contínua de micro-ondas proporcionou maior taxa de secagem quando comparada com a secagem com aplicação de radiação a partir dos 30 minutos iniciais de processo.

Para todas as condições estudadas, quando a aplicação de micro-ondas foi realizada a partir dos 30 minutos iniciais da secagem (Planejamento B) constatou-se que a micro-ondas permaneceu acionada por menor tempo (10 minutos a menos) em relação à secagem contínua, como pode ser observado na Tabela 5.8. Isto demonstra a eficiência da energia de micro-ondas na retirada da umidade interna do material (período de secagem decrescente).

Ensaios	Secagem com micro-ondas	T _{ar inicial} (°C)	<i>T_{ar}</i> (°C)	Р (W)	t _{micro-ondas} (min)	t _{total} (min)
1a	Contínua	-	30	100	160	160
1b	Descontínua	80	30	300	150	180
2a	Contínua	-	50	100	120	120
2b	Descontínua	80	50	300	110	140
3a	Contínua	-	50	100	140	140
3b	Descontínua	80	50	300	130	160
4a	Contínua	-	50	100	90	90
4b	Descontínua	80	50	300	80	110
5a(C)	Contínua	-	40	200	130	130
5b(C)	Descontínua	80	40	200	120	150
6a(C)	Contínua	-	40	200	130	130
6b(C)	Descontínua	80	40	200	120	150
7a(C)	Contínua	-	40	200	130	130
7b(C)	Descontínua	80	40	200	120	150

Tabela 5.8: Intervalos de tempo com aplicação de micro-ondas e tempo total de secagem (Planejamentos A e B).

**t_{micro-ondas:}* tempo de secagem com aplicação de micro-ondas; *t_{total:}* tempo total de secagem.

Porém, é importante ressaltar que para as condições de secagem do Planejamento B, o tempo total de processo abrange o período de secagem convectiva a 80 °C, que permaneceu durante os 30 minutos iniciais de processo, somado a secagem assistida por micro-ondas. Portanto, constatou-se que a aplicação de radiação somente no segundo estágio da secagem (Planejamento B) não foi o suficiente para proporcionar menor tempo total de processo.

De uma forma geral, comparando os modos de aplicação da energia de micro-ondas observa-se que as taxas de secagem foram maiores para todas as condições em que foi realizada a aplicação contínua de micro-ondas (Planejamento A), o que resultou em menores tempos de secagem. A taxa de secagem praticamente dobrou de valor quando compara-se as condições do *ensaio 4a* e *4b* (Figura 5.23b). Portanto, a aplicação contínua de micro-ondas apresentou-se mais viável em termos de processo, do que a aplicação de radiação somente a partir dos 30 minutos iniciais de processo (Planejamento B), pois resultou em menor tempo de secagem.

5.6 Avaliação das propriedades dielétricas

As propriedades dielétricas da cenoura *in natura* foram obtidas conforme o procedimento descrito no *item 4.7.* Os valores obtidos para as propriedades dielétricas na frequência de 5,8 GHz (frequência utilizada no processo de secagem deste trabalho) e nas frequências utilizadas industrialmente (915 e 2450 MHz), encontram-se na Tabela 5.9. O conteúdo de umidade da cenoura *in natura* utilizada nesta análise foi de 88,57% (b.u.).

Cenoura <i>in natura</i>	915 MHz	2450 MHz	5800 MHz
Constante dielétrica (ɛ')	$70,04 \pm 5,36$	$66,68 \pm 5,01$	$61,03 \pm 4,56$
Fator de perda (ε ")	$28,05 \pm 0,36$	$19,21 \pm 0,77$	$22,51 \pm 1,21$

Tabela 5.9: Propriedades dielétricas da cenoura in natura para diferentes frequências, 25 °C.

* Os valores das propriedades dielétricas representam a média de três determinações, seguida do desvio padrão.

Pelos resultados obtidos verifica-se que a cenoura *in natura* apresenta elevados valores para a constante dielétrica e para o fator de perda, o que sugere um alto potencial para utilizar a energia de micro-ondas na secagem desta hortaliça.

Os elevados valores das propriedades dielétricas da cenoura, para as frequências apresentadas na Tabela 5.9, são devido ao alto conteúdo de água presente em sua composição, uma vez que, valores de $\varepsilon' \in \varepsilon$ " para a água nas frequências de 2450 MHz e 5,8 GHz (entre 20 e 25 °C), no estado líquido são também elevados. Estes valores são reportados na literatura em Metaxas e Meredith (1983) para a frequência de 2,45 GHz ($\varepsilon' = 76,70 \varepsilon$ " = 12,04) e em Rosa (2012) para a frequência de 5,8 GHz ($\varepsilon' = 71,79 \varepsilon$ " = 19,54).

Desta forma, as propriedades dielétricas da água determinam, em grande parte, as propriedades dielétricas da cenoura, o que confere a este vegetal maior facilidade de ser aquecido por micro-ondas. Isto sugere que a aplicação de micro-ondas no processo de secagem da cenoura proporciona tempo de secagem consideravelmente menor em relação à secagem convencional, fato que foi confirmado quando comparados os resultados da cinética de secagem somente convectiva (70 e 80 °C) com os resultados da cinética de secagem com aplicação de micro-ondas.

A evidência da habilidade de aquecimento da cenoura por micro-ondas também é confirmada quando confrontados os resultados obtidos para as cinéticas de secagem dos Planejamentos A e B. No período inicial da secagem, quando o conteúdo de umidade do material era ainda elevado, verifica-se que a aplicação de micro-ondas proporcionou maiores taxas de secagem (Planejamento A), comparadas as taxas obtidas durante a secagem puramente convectiva nos 30 minutos iniciais do Planejamento B, o que contribuiu para a redução do tempo de secagem.

Os valores obtidos para as frequências de 915 e 2450 MHz são similares aos relatados por Venkatesh e Raghavan (2004), que encontraram valores de $\varepsilon' = 59$ e $\varepsilon'' = 18$ para a frequência de 915 MHz e $\varepsilon' = 56$ e $\varepsilon'' = 15$ na frequência de 2450 MHz para a cenoura *in natura*. De forma que, os valores das propriedades dielétricas foram maiores para 915 MHz do que em 2450 MHz, assim como verificado no presente trabalho.

Pode-se verificar também que tanto para a constante dielétrica ε ' quanto para o fator de perda ε ", os valores obtidos na frequência de 5,8 GHz diferem dos resultados para as frequências de 2450 e 915 MHz. Isso evidencia que na maior frequência (5,8 GHz) o produto tende a dissipar mais energia na forma de calor do que na frequência de 2450 MHz. Porém, o produto tende a dissipar mais energia na menor frequência (915 MHz) em relação às outras duas frequências analisadas, desconsiderado outros fatores.

A Figura 5.24 apresenta os resultados obtidos para as propriedades dielétricas da cenoura através da varredura para diferentes frequências. Este procedimento é realizado para que seja possível verificar também as propriedades dielétricas da cenoura nas frequências comumente utilizadas industrialmente (915 e 2450 MHz). Os dados são referentes aos valores médios relativos de ε ' e ε ". A tendência observada para a constante dielétrica e para o fator de perda da cenoura pode ser observado de forma mais clara a partir da frequência de 0,5 GHz.



Figura 5.24: Propriedades dielétricas da cenoura em função da frequência de onda eletromagnética, temperatura de 25 °C.

Para a faixa de frequências analisadas verifica-se que a constante dielétrica relativa (ε ') apresentou comportamento ligeiramente decrescente com o aumento da frequência. Este comportamento pode estar relacionado com o fato da rotação dipolar não ser completa em frequências elevadas devido às rápidas oscilações do campo elétrico. Portanto, o momento dipolo é menos efetivo o que proporciona decréscimo dos valores da constante dielétrica (BUFFLER, 1992).

Em relação ao fator de perda relativo (ε ") pode-se observar que seu comportamento foi decrescente até aproximadamente 2,0 GHz, apresentando um discreto aumento em torno 4,0 GHz até 6,0 GHz, sendo os menores valores observados entre as frequências de 2,5 e 3,5 GHz. O fator de perda é constituído pela soma do calor gerado devido à rotação dipolar mais o calor gerado pela condução iônica. Sendo assim, o comportamento observado para o fator de perda da cenoura nas frequências varridas, pode ser explicado tomando-se como base a contribuição dos dois mecanismos de aquecimento.

Primeiramente, verifica-se a evidência da contribuição da condução iônica em baixas frequências, o que faz com que os valores do fator de perda sejam altos, devido à presença de íons livres nos tecidos com alto conteúdo de umidade, como no caso da cenoura. De acordo com Buffler (1992), na presença de um campo elétrico de baixa frequência os íons se movem continuamente gerando calor, contudo esse comportmento é diferente para moléculas polares

nessa faixa de frequência, que cessam sua rotação a medida que são alinhadas com o campo elétrico.

Para um campo elétrico de alta frequência a rotação dipolar tornou-se o fator predominante. Nesse caso, as moléculas que possuem momento de dipolo elétrico tendem a se alinhar com o campo, porém devido a acelerada oscilação do campo as moléculas se alinham e voltam ao estado de desordem (relaxação dielétrica) rapidamente, dissipando energia na forma de calor. Segundo Buffler (1992), o fator de perda tende a aumentar com a frequência até o ponto de máxima absorção definido como a frequência de relaxação do material, após esse ponto a absorção tende a decrescer. No presente trabalho, a máxima frequência varrida foi de 6 GHz, não sendo possível observar o valor de frequência correspondente ao ponto de máxima absorção. Porém, foi possível observar um discreto aumento no fator de perda a medida que a frequência aumentou.

O comportamento observado para as propriedades dielétricas da cenoura é semelhante ao relatado em Nelson *et al.* (1994). No que se refere ao fator de perda, os autores também observaram um decréscimo nos valores com o aumento da frequência, porém após 3,0 GHz o comportamento desta constante foi crescente à medida que a frequência aumentou atingindo altos valores próximo a frequência de 20 GHz. Os autores explicaram os altos valores em baixas frequências devido à predominancia da condução iônica, já os altos valores para o fator de perda nas frequências elevadas (região de 10 à 20 GHz) foram atribuídos devido à influencia da frequência de relaxação da água, que ocorre em torno de 19 GHz.

Portanto, conforme exposto anteriormente, a aplicação de micro-ondas na secagem de cenoura é justificada devido ao elevado conteúdo de água presente na composição desta hortaliça, visto que, quanto maior a umidade maior energia será absorvida pelo material. Contudo, é importante ressaltar que no decorrer da secagem, a umidade do produto diminui o que possivelmente tende a provocar um decréscimo nos valores do fator de perda do produto. Este comportamento é relatado na literatura para a secagem com micro-ondas de macarrão em Nitz (1999) e de PHB em Rosa (2012). Os autores constataram maiores valores do fator de perda para altos teores de umidade, o que demonstra a influência predominante da água nesta propriedade.
5.7 Avaliação do produto obtido

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para as análises de encolhimento, cor e textura. O Planejamento A será mencionado como secagem com aplicação contínua de micro-ondas e o Planejamento B como secagem com aplicação descontínua de micro-ondas.

5.7.1 Análise do encolhimento do material

O encolhimento ocorrido durante a secagem foi avaliado pela determinação do volume relativo do material, representado pelo coeficiente de encolhimento volumétrico (V/V_0) , que relaciona o volume final médio da amostra seca e o seu volume inicial médio. A Tabela 5.10 apresenta os coeficientes de encolhimento volumétrico (V/V_0) para a cenoura seca nas condições dos dois planejamentos experimentais.

Ensaios	Secagem com micro-ondas	T _{ar inicial} (°C)	<i>T_{ar}</i> (°C)	Р (W)	V/V ₀
1a	Contínua	-	30	100	$0,31 \pm 0,02^{\rm f}$
1b	Descontínua	80	30	100	$0,29 \pm 0,03^{\rm f}$
2a	Contínua	-	30	300	$0,39 \pm 0,02^{bcd}$
2b	Descontínua	80	30	300	$0,43 \pm 0,03^{abc}$
3a	Contínua	-	50	100	$0,38 \pm 0,02^{cd}$
3b	Descontínua	80	50	100	$0,32 \pm 0,02^{\rm ef}$
4a	Contínua	-	50	300	$0,44 \pm 0,02^{ab}$
4b	Descontínua	80	50	300	$0,46 \pm 0,04^{a}$
5a (C)	Contínua	-	40	200	$0,38 \pm 0,03^{d}$
5b (C)	Descontínua	80	40	200	$0,37 \pm 0,03^{d}$
6a (C)	Contínua	-	40	200	$0,37 \pm 0,02^{d}$
6b (C)	Descontínua	80	40	200	$0,36 \pm 0,02^{de}$
7a (C)	Contínua	-	40	200	$0,38 \pm 0,02^{d}$
7b (C)	Descontínua	80	40	200	$0,36 \pm 0,03^{de}$

Tabela 5.10: Coeficientes de encolhimento volumétrico (V/V_0) da cenoura para a secagem com aplicação de micro-ondas na forma contínua e descontínua.

* Médias com letras iguais na mesma coluna não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de *Tukey*. A letra **a** vinculada ao número do ensaio representa a secagem com aplicação contínua de micro-ondas (Planejamento A) e a letra **b** representa a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas (a partir dos 30 minutos iniciais do processo – Planejamento B).

Ressalta-se que quanto menor o valor de V/V_0 , mais o material diminuiu de tamanho em relação ao seu volume original. Pela Tabela 5.10 observa-se que os valores do coeficiente de encolhimento volumétrico variaram entre 0,31 - 0,44 para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas (Planejamento A) e entre 0,29 - 0,46 para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas (Planejamento B), caracterizando a modificação na estrutura do material. Verifica-se ainda que a aplicação de micro-ondas em períodos distintos da secagem resultou em diferença significativa no encolhimento volumétrico apenas entre as condições dos *ensaios 3a* e *3b*.

A Figura 5.25 apresenta o encolhimento médio volumétrico do material, representado pela porcentagem de redução do volume das amostras em relação à cenoura *in natura*, tanto para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas quanto para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas.



Figura 5.25: Encolhimento volumétrico médio do material em relação à cenoura *in natura* em função das condições de secagem.

Pode-se observar pela Figura 5.25 que as amostras apresentaram uma redução de volume após a secagem na ordem de 56 a 69 % em relação à cenoura *in natura* para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas e de 54 a 71 % para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas.

Na literatura é possível encontrar valores para o encolhimento volumétrico de cenouras durante a secagem convectiva que variam entre 0,1 e 0,2, o que representa uma redução de volume na faixa de 80 a 90% em relação à cenoura *in natura* (Ratti, 1994; Hatamipour e Mowla, 2002). Apesar desses valores da literatura terem sido determinados pelo método de deslocamento

de volume da amostra (considerando o volume aparente do material), é possível realizar a comparação com os resultados obtidos no presente trabalho. Isso porque, o método de medida direta (com emprego de paquímetro) demonstrou ser também apropriado para calcular o volume de vegetais em Ratti (1994) e Moreira *et al.* (2000), pois apresentou desvios aceitáveis, em comparação com o método de deslocamento de volume da amostra.

Portanto, o encolhimento volumétrico das amostras tanto para as condições do Planejamento A quanto para o Planejamento B foi menor comparado aos valores da literatura citados anteriormente, o que demonstra o potencial da aplicação de micro-ondas na secagem de cenoura no que se refere à conservação do tamanho do material. Porém, cabe ressaltar a existência de outros estudos que relacionam o encolhimento volumétrico de cenouras em diferentes tipos de secagem, não relatados no presente trabalho.

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 5.10 e Figura 5.25, constatou-se que o aumento da potência de micro-ondas, em um mesmo modo de secagem, proporcionou menor encolhimento das amostras, corroborando com os resultados encontrados por Khraisheh *et al.* (2004) para a secagem de batata com aplicação de micro-ondas, em Figiel (2010) na secagem com micro-ondas a vácuo de cubos de beterraba, em (Rosa, 2010) na secagem de cenoura em micro-ondas e em Raghavan e Silveira (2001) para morangos pré-desidratados e secos com aplicação de micro-ondas.

O encolhimento menos pronunciado observado com a aplicação da maior potência de micro-ondas (300 W) pode estar relacionado com as maiores taxas de secagem obtidas nessas condições, uma vez que altas taxas de evaporação da umidade provocam o fenômeno de endurecimento da superfície do material, que ocorre antes do final da secagem, limitando o encolhimento. De acordo com Ratti (1994), para elevadas temperaturas e velocidades do ar, o conteúdo de água é baixo na superfície do material, mesmo nos períodos que antecedem o final da secagem, fazendo com que as camadas externas do produto se tornem rígidas e seu volume final seja fixado antes do final da secagem.

O encolhimento do material pode ser correlacionado com o tempo de secagem, visto que para maiores níveis de potência de micro-ondas a secagem foi mais rápida e o encolhimento menos pronunciado, enquanto que baixos níveis de potência apresentaram maiores tempos de processo e encolhimento mais acentuado. Como, por exemplo, no caso do *ensaio 4a* (T_{ar} : 50 °C;

P: 300 W) em que o tempo de secagem foi de 90 minutos e a redução de volume das amostras foi de 56%, já o *ensaio 1a* (T_{ar} : 30 °C; *P*: 100 W) apresentou maior tempo de secagem (160 minutos) e maior redução do volume das amostras (69%), ou seja, maior encolhimento. A mesma tendência foi observada para os resultados do Planejamento B.

A Figura 5.26 ilustra o comportamento do encolhimento volumétrico observado no decorrer do tempo de secagem, para os dois modos de aplicação de micro-ondas (contínuo e descontínuo).



Figura 5.26: Redução de volume em função do tempo de secagem para as condições de secagem com aplicação contínua de micro-ondas (a) e para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas (b).

Pela análise da Figura 5.26 constata-se que a redução de volume dos cubos em função do tempo de secagem foi similar para ambos os planejamentos experimentais. Observou-se elevado encolhimento inicial com gradual nivelamento no decorrer da secagem e estabilização nos períodos finais. Isto representa que o tamanho final das amostras foi fixado antes da secagem ser concluída. O acentuado encolhimento inicial pode ser atribuído ao fato de que nas condições iniciais de secagem a estrutura do material ainda é suficientemente elástica para encolher no espaço deixado pela água evaporada, no entanto com o prosseguimento da secagem a estrutura do material tende a se tornar mais rígida o que propicia a estabilização do encolhimento. Segundo, Khraisheh *et al.* (2004) menor variação do volume no final da secagem é atribuída a formação de

poros (cheios de ar) no interior da matriz sólida devido à remoção da água, estabilizando o encolhimento do material.

A tendência de estabilização do encolhimento nos períodos finais da secagem e seu comportamento ascendente nos períodos iniciais, também foi observada em Maskan (2001) para a secagem de kiwi com aplicação de micro-ondas, em Nahimana *et al.* (2011) durante a secagem convectiva de cenoura e em Wang e Brennan (1995) para a secagem convectiva de batatas.

É possível analisar também que até aproximadamente 60 minutos de processo as curvas apresentam um formato mais íngrime caracterizando a maior redução de volume do material, para os dois modos de aplicação de micro-ondas.

Pelo diagrama de *Pareto*, Figura 5.27, pode-se verificar a influência das condições operacionais de secagem no encolhimento volumétrico final do produto, representado pelo coeficiente de encolhimento volumétrico, para as condições dos Planejamentos A e B. Os efeitos estatisticamente significativos localizam-se à direita do limiar de significância ($p \le 0.05$).



Figura 5.27: Diagrama de *Pareto* para o encolhimento volumétrico final da cenoura, Planejamentos A e B.

Por meio da Figura 5.27 constata-se que tanto a temperatura do ar quanto a potência de micro-ondas apresentaram efeito significativo no encolhimento volumétrico final da cenoura, para ambos os planejamentos experimentais. De modo que, o efeito da potência de micro-ondas foi o mais pronunciado. Observa-se também que a interação entre as variáveis independentes não teve influência significativa na resposta. Os efeitos significativos apresentaram uma influência

positiva, ou seja, um aumento da potência de micro-ondas ou da temperatura do ar acarretou em um aumento no valor do coeficiente de encolhimento volumétrico (menor encolhimento final), para ambos os planejamentos experimentais.

A potência de micro-ondas influenciou significativamente no encolhimento volumétrico final dos cubos de cenoura, sendo que maiores potências implicaram em maiores taxas de secagem, como pode ser observado pelas cinéticas de secagem apresentadas nos *itens 5.3 e 5.4*, reduzindo o tempo de processo e, consequentemente, o encolhimento do material. A temperatura do ar, por sua vez, apresentou um efeito significativo secundário.

Na Tabela 5.11 são apresentados os coeficientes de encolhimento superficial (A/A_0) , que representam a relação entre a área final e área inicial de material nas condições dos dois planejamentos experimentais. Observa-se que o encolhimento superficial seguiu a mesma tendência do encolhimento volumétrico. Para as condições mais extremas de secagem (*ensaio 4a* e *4b*) o encolhimento superficial foi menor, entretanto, para as condições mais brandas (*ensaio 1a* e *1b*) o encolhimento superficial foi mais elevado.

Ensaios	Secagem com micro-ondas	T _{ar inicial} (°C)	<i>T_{ar}</i> (°C)	Р (W)	A/A ₀
1a	Contínua	-	30	100	0,41
1b	Descontínua	80	30	100	0,38
2a	Contínua	-	30	300	0,52
2b	Descontínua	80	30	300	0,50
3a	Contínua	-	50	100	0,47
3b	Descontínua	80	50	100	0,43
4a	Contínua	-	50	300	0,54
4b	Descontínua	80	50	300	0,52
5a (C)	Contínua	-	40	200	0,48
5b (C)	Descontínua	80	40	200	0,43
6a (C)	Contínua	-	40	200	0,47
6b (C)	Descontínua	80	40	200	0,44
7a (C)	Contínua	-	40	200	0,49
7b (C)	Descontínua	80	40	200	0,42

Tabela 5.11: Coeficientes de encolhimento superficial (A/A_0) da cenoura para a secagem com aplicação de micro-ondas na forma contínua e descontínua.

De um modo geral, conforme apresentado na Tabela 5.10, para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas as condições de secagem que resultaram em menor encolhimento volumétrico foram as empregadas nos *ensaios 4a* (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W), 2a (T_{ar} : 30 °C, P: 300 W) e 3a (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W). Para estas condições, a redução no volume das amostras foi de 56, 61 e 62%, respectivamente, em relação à cenoura *in natura*. Vale destacar que o *ensaio 3a* resultou em encolhimento volumétrico estatisticamente igual ao *ensaio 2a*.

Para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas as condições empregadas nos ensaios 4b ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 300 W) e 2b ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 300 W) proporcionaram menor encolhimento volumétrico da cenoura, sendo a redução no volume das amostras de 54 e 57%, respectivamente, em relação a cenoura *in natura*. Em seguida, tem-se a condição do ensaio 3b ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W), que proporcionou redução de 68% no volume das amostras, em relação à cenoura *in natura*.

Para ambos os planejamentos, observou-se reprodutibilidade com relação aos ensaios do pnto central, sendo que a maioria dos valores (Planejamentos A e B) foram estatisticamente iguais ao valor de encolhimento volumétrico do *ensaio 2a*

5.7.1.1 Modelagem do encolhimento

A partir do volume dos cubos obtidos ao longo da secagem foram calculados os coeficientes de encolhimento volumétrico (V/V_0) para ambos os planejamentos experimentais. Os dados foram ajustados aos modelos propostos na literatura para o encolhimento, Tabela 4.5 *item* 4.8.1. A qualidade do ajuste foi avaliada pelo coeficiente de correlação (R^2) e pelo erro relativo médio *E* (%).

A Figura 5.28 mostra o ajuste dos dados experimentais do coeficiente de encolhimento volumétrico ao modelo linear, para as condições dos Planejamentos A e B, respectivamente.



Figura 5.28: Ajustes do modelo linear: Planejamento A (a) e Planejamento B (b).

Os parâmetros do modelo linear, os coeficientes de correlação e os erros relativos médios, para os dois planejamentos experimentais, encontram-se no Apêndice D.

Apesar de o modelo linear ter apresentado altos coeficientes de correlação e erros relativos médios aceitáveis, conforme Tabelas D1 e D2 (Apêndice D), pela análise da Figura 5.28 verifica-se que, para ambos os planejamentos, os pontos experimentais estão situados acima da linha diagonal (que representa o encolhimento ideal em que o volume de água removido é igual ao encolhimento) durante a maior parte do processo. Isto indica a não linearidade do encolhimento, principalmente após o período inicial da secagem.

O encolhimento de cenouras durante a secagem convectiva é comumente reportado como uma função linear do teor de umidade (ZOGZAS *et al.*, 1994; KROKIDA e MAUROULIS, 1997; HATAMIPOUR e MOWLA, 2002). Contudo, observou-se pelos resultados obtidos no presente trabalho que a relação entre o encolhimento e o teor de umidade não seguiu uma função linear. Resultados semelhantes foram reportados para a cenoura durante a secagem convectiva (Nahimana *et al.* 2011), secagem a vácuo e secagem com vapor superaquecido a baixa pressão (Panyawong e Devahastin, 2007) e na secagem com micro-ondas á vácuo (Nahimana e Zhang, 2011).

A Figura 5.29 apresenta o ajuste dos dados experimentais ao modelo quadrático, para a secagem com aplicação contínua e descontínua de micro-ondas, respectivamente.



Figura 5.29: Ajustes do modelo quadrático: Planejamento A (a) e Planejamento B (b).

Os dados referentes ao ponto central de ambos os planejamentos e os parâmetros do modelo quadrático encontram-se no Apêndice D.

O comportamento não linear apresentado durante a secagem para os dois planejamentos, pode estar relacionado com o colapso da matriz sólida, ocasionado durante a remoção da água do material por radiação, sendo que os fenômenos intrínsecos do aquecimento por micro-ondas provavelmente afetaram o comportamento do encolhimento do material. De acordo com Khraisheh *et al.* (2004) a secagem com micro-ondas consiste não somente da transferência de umidade, mas também de reações complexas que ocorrem no interior do material, devido à aplicação da radiação. A presença de gradientes de temperatura, geram gradientes de pressão que proporcionam diferentes graus de tensão, que podem ocasionar encolhimento não uniforme do material. Com isso, a aplicação de micro-ondas pode originar alterações físicas intrínsecas do aquecimento por radiação.

Dentre os modelos não lineares testados todos apresentaram bons ajustes, porém, o modelo quadrático proposto por Mayor e Sereno (2004) foi escolhido como o mais adequado por possuir menos parâmetros e, portanto, maior conveniência para aplicação. Este modelo

proporcionou resultados satisfatórios para o coeficiente de correlação e para o erro relativo médio, apresentados no Apêndice D.

Para o modelo cúbico proposto por Ratti (1994) e para o modelo proposto por Nihamana (2011), os dados de todas as condições utilizadas nos dois planejamentos, foram plotados em um único gráfico. Dessa forma, uma média dos valores foi empregada para demonstrar que o ajuste destes modelos também foi adequado para descrever o encolhimento da cenoura durante a secagem. A Figura 5.30 mostra o ajuste dos dados experimentais ao modelo cúbico para a secagem com aplicação contínua e descontínua de micro-ondas.



Figura 5.30: Redução volumétrica da cenoura em função do adimensional de umidade, Planejamento A (a) e Planejamento B (b) - Modelo cúbico.

Para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas, o valor do coeficiente de correlação (R^2) foi de 0,9925 e o erro relativo médio (E) foi de 4,38%. A equação do modelo é apresentada a seguir:

$$S = 0,398 + 1,435X - 1,490X^{2} + 0,681X^{3}$$
(5.2)

em que X representa o adimensional de umidade.

Para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas a equação obtida para os dados é representada pela Equação 5.3. O coeficiente de correlação (R^2) apresentou um valor de 0,9857 e o erro relativo médio (*E*) foi de 6,45%.

$$S = 0.389 + 1.469X - 1.437X^{2} + 0.590X^{3}$$
(5.3)

A Figura 5.31 mostra a representação gráfica do ajuste dos dados experimentais ao modelo proposto por Nahimana (2011) para os dados de encolhimento volumétrico dos Planejamentos A e B.



Figura 5.31: Redução volumétrica da cenoura em função do adimensional de umidade, Planejamento A (a) e Planejamento B (b) - Modelo proposto por Nahimana (2011).

As equações obtidas para os dados experimentais modelados dos Planejamentos A e B são apresentadas a seguir:

$$S = 1,083 - 0,705 \cdot 0,764^{X} \tag{5.4}$$

$$S = 1,081 - 0,713 \cdot 0,762^X \tag{5.5}$$

O coeficiente de correlação (R^2) e o erro relativo médio (E) para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas foi de 0,9912 e 4,70 %. Para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas o coeficiente de correlação (R^2) foi 0,9940 e o erro relativo médio (E) foi 6,77%.

5.7.2 Análise colorimétrica

Os parâmetros de cor (L^* , $a^* e b^*$) foram determinados nas amostras de cenoura *in natura* e secas, conforme descrito no *item 4.8.2*. Os valores médios e desvios padrão dos parâmetros de cor obtidos para a secagem com aplicação contínua e descontínua de micro-ondas estão apresentados na Tabela 5.12.

de secagem.							
Ensaios	Secagem com micro-ondas	T _{ar inicial} (°C)	T _{ar} (°C)	P (W)	a*	<i>b</i> *	L^*
			IN		$18,02 \pm 0,59^{a}$	$36,49 \pm 0,61^{a}$	51,03±0,90 ^a
1a	Contínua	-	30	100	$17,67 \pm 0,90^{ab}$	28,57±0,91 ^b	$50,64\pm1,02^{ab}$
1b	Descontínua	80	30	100	$17,22 \pm 0,75^{abc}$	27,94±0,75 ^b	50,26±0,86 ^{abc}
2a	Contínua	-	30	300	15,54 ±0,49 ^{ef}	24,49±0,61 ^f	47,40±0,78 ^{ef}
2b	Descontínua	80	30	300	14,38 ±0,50 ^g	22,68±0,67 ^g	46,02±0,62 ^g
3a	Contínua	-	50	100	17,23 ±0,46 ^{abc}	27,79±0,93 ^{bc}	$50,07\pm1,00^{abc}$
3b	Descontínua	80	50	100	16,82 ±0,44 ^{bcd}	26,63±0,86 ^{cd}	49,20±0,90 ^{cd}
4a	Contínua	-	50	300	16,54 ±0,41 ^{cde}	26,13±0,74 ^{de}	48,47±0,56 ^{de}
4b	Descontínua	80	50	300	15,17 ±0,56 ^{fg}	24,17±0,87 ^f	46,94±0,54 ^{fg}
5a (C)	Contínua	-	40	200	16,94 ±0,90 ^{bcd}	$26,50\pm0,76^{d}$	49,41 ±0,77 ^{bcd}
5b (C)	Descontínua	80	40	200	$16,12 \pm 0,62^{def}$	25,72±0,73 ^{de}	48,57±0,82 ^{de}
6a (C)	Contínua	-	40	200	16,70 ±0,70 ^{bcd}	26,33±0,58 ^{de}	49,13±0,83 ^{cd}
6b (C)	Descontínua	80	40	200	16,03 ±0,88 ^{def}	25,30±0,54 ^{ef}	48,29±0,88 ^{de}
7a (C)	Contínua	-	40	200	16,67 ±0,60 ^{bcd}	26,12±0,93 ^{de}	49,02±0,52 ^{cd}
7b (C)	Descontínua	80	40	200	$16,24\pm0,62^{cde}$	$25,99\pm0,78^{de}$	$48,69\pm0,99^{d}$

Tabela 5.12: Parâmetros de cor (L^* , $a^* e b^*$) da cenoura *in natura* e seca para todas as condições de secagem.

IN*: *in natura*. Médias com letras iguais na mesma coluna não diferem entre si estatisticamente ao nível de 5% pelo teste de *Tukey*. A letra **a vinculada ao número do ensaio representa a secagem com aplicação contínua de micro-ondas e a letra **b** representa a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas (a partir dos 30 minutos iniciais do processo – Planejamento B).

A Figura 5.32 apresenta os resultados do parâmetro L^* , referente à luminosidade do produto seco nas condições dos dois planejamentos experimentais e para a cenoura *in natura*. Os

valores de luminosidade podem variar de 0 a 100, sendo que quanto maior este valor mais claras são as amostras, o contrário é válido para o menor valor. O ponto central de cada planejamento é apresentado como a média obtida para trinta determinações (dez para cada repetição do ponto central) e seus respectivos desvios padrão. Esta ressalva vale também para os ensaios dos pontos centrais dos parâmetros de cor $a^* e b^*$, que serão apresentados no decorrer da discussão.



Figura 5.32: Parâmetro L^* da cor do produto final em função das condições de secagem para os Planejamentos A e B.

Pela Figura 5.32 observa-se que para todas as condições de secagem a cenoura seca apresentou coloração mais escura que a hortaliça *in natura*, como pode ser confirmado pela diminuição do parâmetro *L**, que atingiu um valor mínimo de 46,02. O escurecimento da cenoura ocasionado durante a secagem é atribuído à formação de compostos de coloração escura originados, possivelmente, a partir de reações de escurecimento (enzimático e não enzimático), oxidação do ácido ascórbico e alterações dos pigmentos presentes naturalmente na hortaliça, principalmente dos carotenóides (VANDIVAMBAL e JAYAS, 2007; CELESTINO, 2010).

Pelos resultados da Tabela 5.12 e Figura 5.32 é possível constatar que as condições de secagem com aplicação da maior potência de micro-ondas, independente do modo de aplicação da radiação, resultaram em cenouras mais escuras. Infere-se este resultado a maior geração de calor no interior do material proporcionado pela alta potência de micro-ondas, que possivelmente ocasionou maior degradação dos constituintes da hortaliça, principalmente dos pigmentos, ocasionando maior perda da luminosidade.

Observa-se ainda que para a menor potência de micro-ondas empregada, independente do modo de aplicação da radiação, foram obtidos maiores valores do parâmetro L^* , o que representa menor perda de luminosidade. Os *ensaios 1a* (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W), *1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) *e 3a* (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) resultaram em valores de luminosidade estatisticamente iguais ao produto fresco, para um limite de confiança de 95%. Portanto, estas foram as melhores condições para a conservação da luminosidade da cenoura. As condições do *ensaio 3b* ($T_{ar inicial}$: 80°C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) também proporcionaram boa conservação da luminosidade, sendo seu resultado estatisticamente igual aos valores dos *ensaios 3a* e *1b*.

Vale ressaltar que, apesar dos menores tempos de secagem obtidos nas condições com maior potência de micro-ondas, estes não foram reduzidos o suficiente para conter a perda da luminosidade do produto. Porém, a condição do *ensaio 4a* (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W) foi a que melhor conservou a luminosidade do material, dentre as condições com alta potência de micro-ondas. O valor de L* obtido neste ensaio foi estatisticamente igual ao *ensaio 3b* com menor potência de micro-ondas ($T_{ar inicial}$: 80°C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W).

Comparando os Planejamentos A e B, verifica-se que foram encontradas diferenças significativas para os ensaios com aplicação da maior potência de micro-ondas (*ensaios 2a* e *4a*; *2b* e *4b*). Sendo que, a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas resultou em coloração mais escura das amostras, que pode estar relacionada à aplicação de ar quente no início do processo e aos maiores tempos de secagem obtidos nessas condições. Desta forma, a secagem convectiva (80 °C) seguida da incidência de alta radiação possivelmente favoreceu a formação de compostos escuros em maior quantidade, devido à exposição prolongada do produto ao calor.

Pelo diagrama de *Pareto*, Figura 5.33, observa-se a influência das condições operacionais de secagem na luminosidade do produto final, para os Planejamentos A e B. Os efeitos estatisticamente significativos localizam-se à direita do limiar de significância ($p \le 0.05$).



Figura 5.33: Diagrama de *Pareto* para a resposta luminosidade, Planejamento A (a) e Planejamento B (b).

Pela Figura 5.33a e 5.33b verifica-se que a potência de micro-ondas apresentou efeito significativo para a luminosidade do produto final, conforme discutido anteriormente. Observa-se ainda, que o efeito da potência de micro-ondas apresentou influência negativa, o que significa que com o aumento da potência de micro-ondas a luminosidade do produto diminui, para ambos os planejamentos experimentais.

Observa-se ainda que para o Planejamento B a interação entre as variáveis independentes também foi significativa na resposta. No Planejamento A, a interação entre as variáveis independentes foi considerada significativa, visto que seu valor encontra-se muito próximo ao limiar de significância ($p \le 0,05$), e também pelo fato de que a luminosidade seguiu as mesmas tendências nos dois planejamentos.

Para os resultados de luminosidade obtidos nas condições do ponto central, em ambos os planejamentos experimentais, constatou-se boa reprodutibilidade dos dados.

A Figura 5.34 ilustra a variação do parâmetro de cor a^* (vermelho/verde) para o produto seco em todas as condições estudadas e para a hortaliça *in natura*. Os valores de a^* positivos indicam a intensidade da coloração vermelha da cenoura.



Figura 5.34: Parâmetro *a** da cor do produto final em função das condições de secagem para os Planejamentos A e B.

Por meio da Figura 5.34 observa-se que todas as condições estudadas proporcionaram amostras de cenoura secas com coloração menos avermelhada, quantificada pela diminuição do parâmetro a^* . Entretanto, os *ensaios 1a* (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W), *1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) *e 3a* (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) apresentaram valores de a^* estatisticamente iguais à cenoura *in natura*.

As condições com aplicação de menor potência de micro-ondas (*ensaios 1a* e 3a; *ensaios 1b* e 3b), resultaram em maiores valores do parâmetro a^* para e foram estatisticamente iguais entre si.

A influência da potência de micro-ondas no parâmetro a^* seguiu uma tendência semelhante a da luminosidade. A menor potência de micro-ondas utilizada resultou em maiores valores do parâmetro a^* , o que representa maior conservação da cor vermelha. Em contrapartida, a maior potência ocasionou perda mais acentuada da coloração vermelha, para ambos os planejamentos experimentais.

Como analisado para o parâmetro de luminosidade, para o parâmetro a^* houve diferença significativa entre os modos de aplicação de radiação apenas para a maior potência de micro-ondas utilizada, sendo que na secagem com aplicação descontínua de micro-ondas (*ensaio 2b* - $T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 300 W e *ensaio 4b* - $T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 300 W) ocorreu maior perda da coloração vermelha comparada à secagem com aplicação contínua de micro-ondas (*ensaio 2a* - T_{ar} : 30 °C, P: 300 W e *ensaio 4a* - T_{ar} : 50 °C, P: 300 W).

O ensaio 4a (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W) se destacou entre as condições com aplicação de maior potência de micro-ondas para a conservação da cor vermelha. Seu valor foi estatisticamente igual aos valores dos ensaios 3a (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W), 1b ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 100 W) e 3b ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) que foram executados com menor potência de micro-ondas.

Observa-se ainda que os resultados de cromaticidade a^* , para os dois planejamentos experimentais nas condições do ponto central, apresentaram boa reprodutibilidade dos dados.

Pelo diagrama de *Pareto*, Figura 5.35, é possível analisar a influência das condições operacionais do processo na cromaticidade a^* , para os Planejamentos A e B. Os efeitos estatisticamente significativos localizam-se à direita do limiar de significância ($p \le 0.05$).



Figura 5.35: Diagrama de *Pareto* para o parâmetro de cor *a**, Planejamento A (a) e Planejamento B (b).

Pela análise da Figura 5.35a e 5.35b verifica-se que a potência de micro-ondas apresentou efeito significativo no parâmetro de cor a^* , para a secagem em ambos os planejamentos. Este efeito apresentou influência negativa, o que significa que com o aumento da potência de micro-ondas a cor vermelha do produto diminuiu. Constatou-se ainda que a interação entre as variáveis independentes também foi significativa na resposta, para os dois planejamentos.

A Figura 5.36 mostra a variação do parâmetro de cor b^* (amarelo/azul), para o produto seco em todas as condições experimentais e para a hortaliça *in natura*. Os valores de b^* positivos indicam a intensidade de coloração amarela da cenoura.



Figura 5.36: Parâmetro b^* da cor do produto final em função das condições de secagem para os Planejamentos A e B.

É possível observar de acordo com os valores do parâmetro b^* apresentados na Tabela 5.12, que todas as condições de secagem resultaram em amostras com coloração amarela estatisticamente diferente da cenoura *in natura*.

Assim como constatado para a luminosidade e para a cromaticidade a^* , os maiores valores do parâmetro b^* foram obtidos nas condições com aplicação da menor potência de microondas (*ensaios 1a* e *1b*; *ensaios 3a* e *3b*), o que representa menor perda da coloração amarela. No entanto, as amostras submetidas a maior potência, apresentaram perda pronunciada da coloração amarela verificada pelos menores valores do parâmetro b^* , tanto para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas quanto para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas.

Como observado para os outros parâmetros de cor, diferenças significativas entre os modos de aplicação de micro-ondas para o parâmetro b^* foram constatadas apenas para as condições com maior potência de micro-ondas (*ensaios 2a* e 4*a*; *ensaios 2b* e 4*b*).

Pelo diagrama de *Pareto*, Figura 5.37, verifica-se a influência dos efeitos principais e de suas interações para a cromaticidade b^* , dos Planejamentos A e B. Os efeitos estatisticamente significativos localizam-se à direita do limiar de significância ($p \le 0,05$).



Figura 5.37: Diagrama de *Pareto* para o parâmetro de cor *b**, Planejamento A (a) e Planejamento (b).

Pela análise da Figura 5.37 observa-se que a potência de micro-ondas apresentou efeito significativo e negativo para o parâmetro de cor b^* , o que significa que com o aumento da potência de micro-ondas a cor amarela da cenoura diminuiu, para ambos os planejamentos. Constatou-se ainda que a interação entre as variáveis independentes também foi significativa na resposta para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas.

Para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas a interação também foi considerada significativa, visto que, seu valor encontra-se muito próximo ao limiar de significância ($p \le 0,05$) e também pelo fato de que o parâmetro b^* seguiu as mesmas tendências para os dois planejamentos.

A Figura 5.38 apresenta as modificações dos parâmetros de cor $(L^*, a^* e b^*)$ da cenoura seca em relação à cenoura *in natura*, pela qual é possível verificar que para todas as condições de secagem as amostras apresentaram decréscimo da luminosidade e das tonalidades vermelha e amarela. Arikan *et al.* (2012) também observaram que os valores dos parâmetros $a^* e b^*$ tendem a diminuir para as cenouras submetidas à secagem com aplicação de micro-ondas.



Figura 5.38: Modificações dos parâmetros de cor (L^* , $a^* e b^*$) das cenouras secas em função das condições experimentais tendo como referência a amostra *in natura*.

Observa-se que o decréscimo do parâmetro b^* , que caracteriza a perda da coloração amarela, foi o que mais influenciou na alteração da cor das cenouras secas, seguido pelo decréscimo da luminosidade L^* , que caracteriza o escurecimento. A perda na coloração total das amostras secas está associada, em parte, à oxidação dos carotenóides que são degradados quando expostos à presença de ar aliado ao calor, como discutido anteriormente. Esta degradação é desencadeada de forma mais acelerada em produtos desidratados, nos quais a camada protetora de absorção primária de água foi reduzida e a porosidade do alimento torna-se maior, aumentando a superfície de contato com o oxigênio (BOBBIO e BOBBIO, 2001).

Como observado na Tabela 5.12, em algumas condições os parâmetros de cor L^* e a^* para as amostras secas foram estatisticamente iguais à cenoura *in natura*. Porém, em todas as condições houve perda significativa da coloração amarela. Resultados semelhantes foram observados por BAYSAL *et al.* (2003) em relação à conservação do parâmetro L^* e a perda excessiva da coloração amarela na secagem de fatias de cenoura com micro-ondas (6 W.g⁻¹).

5.7.2.1 Diferença de cor total

A perda de cor total da cenoura seca em relação ao estado *in natura* foi avaliada pelo parâmetro ΔE^* , conforme descrito no *item 4.8.2*. A Tabela 5.13 apresenta os valores médios para a diferença de cor total das amostras submetidas às condições de secagem estudadas.

Ensaios	Secagem com micro-ondas	T _{ar inicial} (°C)	<i>T_{ar}</i> (°C)	Р (W)	ΔE^*
1a	Contínua	-	30	100	$8,04 \pm 0,87^{\rm f}$
1b	Descontínua	80	30	100	$8,69 \pm 0,66^{f}$
2a	Contínua	-	30	300	12,80 ±0,67 ^{bc}
2b	Descontínua	80	30	300	$15,15 \pm 0,61^{a}$
3a	Contínua	-	50	100	$8,85 \pm 0,88^{\rm f}$
3b	Descontínua	80	50	100	$10,14 \pm 0,85^{\rm e}$
4a	Contínua	-	50	300	$10,79 \pm 0,76^{de}$
4b	Descontínua	80	50	300	$13,31 \pm 0,80^{b}$
5a (C)	Contínua	-	40	200	$10,24 \pm 0,66^{\rm e}$
5b (C)	Descontínua	80	40	200	$11,25 \pm 0,61^{de}$
6a (C)	Contínua	-	40	200	$10,47 \pm 0,45^{\rm e}$
6b (C)	Descontínua	80	40	200	$11,74 \pm 0,58^{cd}$
7a (C)	Contínua	-	40	200	$10,67 \pm 0,90^{de}$
7b (C)	Descontínua	80	40	200	$10,96 \pm 0,68^{de}$

Tabela 5.13: Diferença de cor total (ΔE^*) entre a cenoura *in natura* e seca para todas as condições de secagem.

* Médias com letras iguais na mesma coluna não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de *Tukey*. A letra **a** vinculada ao número do ensaio representa a secagem com aplicação contínua de micro-ondas e a letra **b** representa a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas (a partir dos 30 minutos iniciais da secagem – Planejamento B).

Pelos os resultados apresentados na Tabela 5.13 observa-se que os valores da diferença de cor total variaram entre 8,04 e 15,15. A Figura 5.39 ilustra os valores médios para a diferença de cor total das amostras submetidas nas condições de secagem dos Planejamentos A e B.



Figura 5.39: Diferença de cor total da cenoura em função do processo de secagem.

Pela Figura 5.39 e Tabela 5.13 analisa-se que as menores variações de cor total foram obtidas para as condições com menor potência de micro-ondas (*ensaios 1a, 1b e 3a*). Comparando-se os modos de aplicação de micro-ondas (contínuo e descontínuo) observa-se que apenas os *ensaios 1a* e *1b* foram estatisticamente iguais em relação à diferença de cor total. Adicionalmente, pode-se observar diferença de cor total mais acentuada para as amostras submetidas à secagem com maior potência de micro-ondas (300 W), tanto para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas quanto para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas.

Com relação a maior potência de micro-ondas (300 W) constatou-se que o tempo foi um fator limitante, visto que para o menor tempo de processo (*ensaio 4a*) os parâmetros de cor foram mais preservados, tornando esta condição interessante para a secagem de cenoura, caso a maior radiação seja utilizada na secagem contínua. A relação do tempo com a potência de micro-ondas para a conservação de cor de cenouras secas com aplicação de micro-ondas também foi reportada por SUMMU *et al.* (2005). Os autores constataram que um produto com coloração mais acentuada foi obtido com a utilização do nível máximo e intermediário de potência de micro-ondas, devido ao menor tempo de secagem obtido nestas condições.

Portanto, as amostras submetidas às condições mais brandas de secagem (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W - *ensaio 1a* e $T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, P: 100 W - *ensaio 1b*) apresentaram coloração mais estável, conferida pela menor diferença total de cor total (ΔE^*) e pela semelhança com o produto fresco, confirmado pelos valores dos parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) expostos anteriormente. Entretanto, pode-se considerar que as condições de secagem utilizadas no *ensaio 3a* (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) também foram adequadas, pois proporcionaram um valor de ΔE^* estatisticamente igual as condições dos *ensaios 1a* e *1b*. Além disso, o tempo de secagem no *ensaio 3a* foi de 140 minutos, sendo menor comparado ao tempo do *ensaio 1a* (160 minutos) e *ensaio 1b* (180 minutos). Adicionalmente, o teor de umidade final também foi menor, o que torna esta condição interessante no que se refere à conservação da coloração da cenoura.

Seguida dessas condições, têm-se o *ensaio 3b* que também apresentou baixos valores para a diferença de cor total. Portanto, considerado satisfatório para a conservação da cor total das amostras, conforme discutido anteriormente. Essa consideração também é válida, em segundo caso, para o *ensaio 4a* que apresentou bons resultados para os parâmetros de cor dentre as condições com maior potência de micro-ondas.

Pressupõe-se que para as condições empregadas nos *ensaios 1a*, *1b*, *3a*, *3b* e *4a* ocorreram menores perdas de carotenóides, resultando em menor perda da coloração, visto que a cor das cenouras é atribuída, em grande parte, a presença de carotenóides. A maioria dos ensaios do ponto central (Planejamentos A e B) apresentaram resultados para a diferença de cor total estatisticamente iguais aos *ensaios 1b* e *4a*.

A Figura 5.40 ilustra a variação da cor entre a cenoura *in natura e* seca nas condições dos *ensaios 1a, 3a, 1b* e *4a*.



Figura 5.40: Variação da coloração para a cenoura seca nas condições do *ensaio 1a* (T_{ar} : 30 °C, *P*: 100 W) (a), *ensaio 3a* (T_{ar} : 50 °C, *P*: 100 W) (b), *ensaio 1b* ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 30 °C, *P*: 100 W) (c) e *ensaio 4a* (T_{ar} : 50 °C, *P*: 300 W) (d).

5.7.3 Determinação da textura

A textura das cenouras foi avaliada pelo atributo de dureza através do teste de compressão, pelo qual mediu-se a resistência que o material oferece ao ser comprimido por uma carga de prova. Para tanto, foram consideradas como desejáveis as amostras que apresentaram dureza menor ou intermediária, conforme descrito no *item 4.8.3*. A dureza intermediária foi determinada como sendo o valor intermediário entre a maior e a menor força de compressão.

Pela Figura 5.41 é possível comparar os resultados da dureza, representado pela força máxima de compressão, expressa em Newton (N), das amostras secas nos dois modos de aplicação de micro-ondas em relação à cenoura *in natura*. Para o ponto central de cada planejamento é apresentada a média obtida para trinta determinações (dez para cada repetição do ponto central) e o seu respectivo desvio padrão.



Figura 5.41: Valores da dureza das cenouras representados pela força máxima de compressão para as diferentes condições de secagem em relação à cenoura *in natura*.

Os resultados para a força máxima de compressão (média e desvio padrão) obtidos para cada ensaio e para a cenoura *in natura* são apresentados na forma numérica na

Tabela 5.14. Por esta tabela e pela Figura 5.41 é possível observar que a maioria das condições de secagem resultou em amostras significativamente mais macias que a cenoura *in natura*. Este resultado pode ser atribuído à danos ocasionados na membrana celular do vegetal, isso porque, durante o processamento térmico os constituintes da parede celular e da lamela média da cenoura podem sofrer alteraçãoes, o que resulta em menor firmeza do tecido (VERVOORT *et al.*, 2012).

Ensaios	Secagem com micro-ondas	T _{ar inicial} (°C)	<i>T_{ar}</i> (°C)	P (W)	F (N)
			IN		$98,68 \pm 5,38^{a}$
1a	Contínua	-	30	100	$34,16 \pm 3,58^{g}$
1b	Descontínua	80	30	100	$36,81 \pm 3,94^{g}$
2a	Contínua	-	30	300	$89,77 \pm 3,69^{bcd}$
2b	Descontínua	80	30	300	$83,75 \pm 4,68^{cde}$
3a	Contínua	-	50	100	$40,37 \pm 5,25^{g}$
3b	Descontínua	80	50	100	$61,\!48 \pm 5,\!54^{\rm f}$
4a	Contínua	-	50	300	$96,62 \pm 4,54^{ab}$
4b	Descontínua	80	50	300	$99,80 \pm 5,46^{a}$
5a (C)	Contínua	-	40	200	$79,81 \pm 4,26^{e}$
5b (C)	Descontínua	80	40	200	$85,28 \pm 5,32^{cde}$
6a (C)	Contínua	-	40	200	$84,19 \pm 4,43^{cde}$
6b (C)	Descontínua	80	40	200	$88,28 \pm 3,23^{cd}$
7a (C)	Contínua	-	40	200	$82,67 \pm 3,77^{de}$
7b (C)	Descontínua	80	40	200	$90,95 \pm 4,15^{bc}$

Tabela 5.14: Valores	da dureza	para a ce	enoura <i>ii</i>	n natura (e seca i	nas c	condições	de proc	esso	dos
		Plan	ejament	tos A e B						

IN: in natura.* Médias com letras iguais na mesma coluna não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de *Tukey*. A letra **a vinculada ao número do ensaio representa a secagem com aplicação contínua de micro-ondas e a letra **b** representa a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas (a partir dos 30 minutos iniciais da secagem).

Para as condições mais brandas de secagem (*ensaios 1a* e *1b*) foram obtidos os cubos de cenoura mais macios, com valores estatisticamente iguais entre si ao nível de confiança de 95%. Também, não foram encontradas diferenças significativas entre essas duas condições e a secagem contínua do *ensaio 3a* (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W). Os menores valores de dureza observados nestas condições podem estar relacionados com a maior umidade das amostras que foram de 14,42% (*ensaio 1a*), 14,57% (*ensaio 1b*) e 10,94% (*ensaio 3a*), em base seca.

É possível constatar que a potência de micro-ondas afetou significativamente a dureza das amostras, para ambos os modos de aplicação de micro-ondas. Isso porque o endurecimento do produto ocorreu de forma mais intensa quando a maior potência de micro-ondas foi aplicada e a umidade foi removida mais rapidamente. As condições de secagem mais intensas (T_{ar} : 50 °C, P: 300 W - *ensaio 4a* e $T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 50 °C, P: 300 W - *ensaio 4b*) apresentaram valores de dureza estatisticamente igual ao da cenoura *in natura*. Porém este fato não representa um resultado satisfatório em termos de textura, visto que o material seco nestas condições apresentou os menores conteúdos de umidade em relação aos outros experimentos, o que pode conferir a característica de um produto significativamente duro, influenciando na sua mastigabilidade. Essa suposição foi baseada em resultados reportados na literatura, em que a maior força de compressão para alimentos secos representou em um produto mais difícil de ser mastigado, portanto não desejável (GUINÉ e BARROCA, 2010).

Os valores do ponto central para ambos os planejamentos experimentais mostraram reprodutibilidade dos resultados.

Observa-se também que apenas as condições empregadas nos *ensaios 3a* (T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) e **3b** ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) foram estatisticamente diferentes. Neste caso, o material seco com aplicação descontínua de micro-ondas resultou em maior força de compressão, o que representa um produto mais duro. Este resultado pode ser atribuído à secagem inicial puramente convectiva (80 °C), que foi suficiente para alterar as características do material fresco antes da aplicação de micro-ondas ser iniciada. Deste modo, o maior tempo de secagem aliado ao ar quente aplicado no período inicial do processo, conferiu ao material endurecimento mais acentuado, oferecendo maior resistência à compressão. Durante a secagem convectiva o líquido se difunde do interior para a superfície da cenoura transportando os solutos presentes no material. Como a umidade da superfície evapora, os solutos concentram-se e precipitam deixando uma crosta seca e dura, o que resulta no endurecimento do produto. Por outro lado, durante a secagem com micro-ondas o calor é gerado no interior do material ocasionando uma vaporização da água *in situ*, que difunde-se rapidamente para fora do produto carregando menores quantidades de solutos dissolvidos, o que pode resultar em menor endurecimento (LIN *et al.*, 1998).

Avaliando a influência da temperatura do ar, constatou-se que na secagem com aplicação descontínua de micro-ondas (Planejamento B), para o menor nível de potência de micro-ondas ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 100 W - *ensaio 1b* e $T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W - *ensaio 3b*), o aumento da temperatura resultou em um produto significativamente mais duro com força de compressão de 61,48 N, enquanto que para o *ensaio 1b* a força de compressão foi de 36,81 N. O mesmo efeito da temperatura do ar não foi observado quando realizou-se a secagem com aplicação contínua de micro-ondas (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W - *ensaio 1a* e T_{ar} : 50 °C, P: 100 W -

ensaio 3a), em que os valores de força de compressão foram estatisticamente iguais (34,16 N - *ensaio 1a* e 40,37 N - *ensaio 3a*).

Da mesma maneira, para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas, no maior nível de potência de micro-ondas (T_{ar} : 30 °C, P: 300 W - *ensaio 2a* e T_{ar} : 50 °C, P: 300 W *ensaio 4a*) o aumento da temperatura não apresentou diferença significativa na dureza do produto. Já, na secagem com aplicação descontínua de radiação ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 300 W - *ensaio 2b* e $T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 300 W - *ensaio 4b*) a elevação da temperatura originou um produto significativamente mais duro.

Por meio do diagrama de *Pareto*, Figura 5.42, é possível confirmar a influência das condições de secagem na dureza do produto final, para os Planejamentos A e B. Os efeitos estatisticamente significativos localizam-se à direita do limiar de significância ($p \le 0.05$).



Figura 5.42: Diagrama de *Pareto* para a resposta dureza final da cenoura, Planejamento A (a) e Planejamento B (b).

Observando a Figura 5.42 verifica-se que para o Planejamento A apenas a potência de micro-ondas apresentou efeito significativo, sendo este positivo o que significa que com o aumento da potência de micro-ondas a dureza final do produto aumentou. Para o Planejamento B, observa-se que a temperatura do ar e a potência de micro-ondas tiveram efeitos significativos e positivos para a dureza final do produto, sendo o efeito da potência de micro-ondas mais pronunciado. A temperatura do ar apresentou efeito significativo para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas, diferente do resultado obtido para a secagem contínua, assim como discutido anteriormente.

É importante ressaltar que as amostras secas com o maior nível de potência de microondas (300 W) apresentaram maior dureza e também menor encolhimento, para os dois planejamentos experimentais. Isto confirma que o encolhimento é reduzido quando forma-se uma crosta dura na superfície do material.

De um modo geral, para os dois modos de aplicação de micro-ondas, a força de compressão tende a descrecer quando menores potências de micro-ondas são aplicadas, conferindo maior maciez ao material. Em oposição, esta força apresentou maiores valores com a aplicação da maior potência de micro-ondas, proporcionando elevada dureza das amostras.

Portanto, as amostras secas com menor potência de micro-ondas (T_{ar} : 30 °C, P: 100 W ensaio 1a, $T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 30 °C, P: 100 W - ensaio 1b e 50 °C, P: 100 W - ensaio 3a) foram as mais macias. Por sua vez, as condições do ensaio 3b ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 50 °C, P: 100 W) proporcionaram amostras com dureza intermediária. Estas condições de secagem foram consideradas as que proporcionaram cenouras com melhor qualidade em relação à dureza.

5.8 Análise das curvas de nível e estudo da função desejabilidade global

Neste item serão apresentadas as interpretações realizadas para as curvas de nível das variáveis de resposta: umidade final, encolhimento, diferença de cor total e dureza, referentes aos dois planejamentos. Em conseguinte, será apresentado o estudo da função desejabilidade global, através do qual foi possível obter as melhores condições de secagem, dentro do domínio experimental estudado, para cada planejamento.

5.8.1 Análise das curvas de nível e estudo da função desejabilidade global - Planejamento A

A Figura 5.43 apresenta as curvas de nível referentes às respostas umidade final (b.u.%), encolhimento (V/V_0), diferença de cor total (ΔE^*) e dureza (N) referentes as condições de secagem utilizadas no Planejamento A.



Figura 5.43: Curvas de nível para as respostas umidade final (% b.u.) (a); encolhimento (b); diferença de cor total (c) e dureza (d) – Planejamento A.

Na Figura 5.43a tem-se uma visualização das melhores condições de secagem para a obtenção da umidade final aceitável ($\leq 12\%$ b.u.). Pode ser observado que quando a maior potência de micro-ondas é aplicada a umidade final é a desejada em qualquer temperatura do ar. Entretanto, para a aplicação da menor potência de micro-ondas a umidade é a desejável somente quando é utilizada a maior temperatura do ar (+1), inclusive para esta temperatura a umidade final é a requerida para qualquer nível de potência de micro-ondas.

Na Figura 5.43b é possível analisar que para a maior potência de micro-ondas (+1), independente das condições de temperatura do ar, o encolhimento é menor (representado pelo maior valor do coeficiente de encolhimento). Porém, à medida que menores potências são aplicadas faz-se necessária a utilização de maiores temperaturas do ar para que o encolhimento não seja tão pronunciado.

Pelas Figura 5.43c e 5.43d observa-se que a aplicação da menor potência de micro-ondas proporciona baixos valores de dureza e de diferença de cor total, independente da temperatura do ar de secagem. No entanto, para a maior potência de micro-ondas são atingidos altos valores de dureza e diferença de cor total.

De uma maneira geral, para que os parâmetros de cor e dureza apresentem valores desejáveis é necessário que seja utilizado baixo nível de potência de micro-ondas. De forma que, para esta condição o emprego de alta temperatura do ar é fundamental para a obtenção de valores desejáveis para o encolhimento e para a umidade final.

Na Tabela 5.15 são apresentadas as condições atribuídas na otimização das respostas via função desejabilidade global, em que as variáveis de entrada proporcionaram bons resultados. Na atribuição das condições (0 ou 1) foram consideradas as avaliações discutidas anteriormente para cada resposta, ou seja, umidade final aceitável, valores baixos de diferença de cor total, valores de dureza menores ou intermediários e valores menores ou medianos para o encolhimento. Os valores dos expoentes foram s = t =1 para todas as respostas, em ambos os planejamentos.

	-	-						
	Condições para as respostas							
Valor atribuído	Umidade Final (% b.u.)	Cor (ΔE*)	Dureza (N)	Encolhimento (V/V ₀)				
Baixos	14,42 (0)	12,80 (0)	94,62 (0)	0,44 (1)				
Médios	10,80 (1)	10,42 (1)	65,39 (0,5)	0,37 (1)				
Altos	7,19(1)	8,04 (1)	34,16(1)	0,31 (0)				

Tabela 5.15: Valores atribuídos na investigação das melhores condições de processo via função desejabilidade – Planejamento A.

(0): corresponde aos valores considerados inaceitáveis; (0,5): corresponde aos valores considerados menos desejáveis que 1; e (1): corresponde aos valores considerados desejáveis (valores ótimos).

A Figura 5.44 apresenta a função desejabilidade global utilizada para a otimização das respostas referentes às condições de secagem do Planejamento A. Observa-se que a função desejabilidade atendeu de forma satisfatória as características estabelecidas, pois apresentou um resultado de desejabilidade global (*D*) igual a 0,93468, valor considerado aceitável e excelente (AKHNAZAROVA e KAFAROV, 1982).



Figura 5.44: Gráficos da função desejabilidade para as variáveis de resposta umidade final, cor, dureza e encolhimento – Planejamento A.

Na Figura 5.44 são apresentadas as melhores condições da secagem na forma codificada, obtidas via função desejabilidade global que representam os seguintes valores reais: temperatura do ar de secagem de 50 °C e potência de micro-ondas de 100 W, confirmando os valores observados na análise prévia das curvas de nível.

5.8.2 Análise das curvas de nível e estudo da função desejabilidade global - Planejamento B

Da mesma forma que para o Planejamento A, foram obtidas as curvas de nível para as respostas umidade final (b.u.%), encolhimento (V/V_0), diferença de cor total (ΔE^*) e dureza (N) referentes às condições de secagem utilizadas no Planejamento B, que estão ilustradas na Figura 5.45.



Figura 5.45: Curvas de nível para as respostas umidade final (% b.u.) (a); encolhimento (b); diferença de cor total (c) e dureza (d) – Planejamento B.

Pela Figura 5.45a verifica-se que para a maior potência de micro-ondas independente da temperatura do ar, obtém-se uma umidade final aceitável. No caso da aplicação de baixas potências, o emprego de maiores temperaturas do ar é essencial para que a umidade requerida seja alcançada. Comportamento semelhante foi obtido na análise da umidade final para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas.

Na Figura 5.45b observa-se que a aplicação da maior potência de micro-ondas proporciona o menor encolhimento do material. Contudo, para baixas potências é preciso utilizar elevada temperatura do ar para que seja obtido um encolhimento menos pronunciado.

Nas Figura 5.45c e 5.45d verifica-se que a diferença de cor total e a dureza seguiram as mesmas tendências da secagem com aplicação contínua de micro-ondas. Observa-se que a aplicação de maiores níveis de potência de micro-ondas, independente da temperatura do ar, resultou em altos valores de diferença de cor total e dureza, portanto indesejáveis. Porém,

mantendo a potência de micro-ondas nas condições mínimas constata-se que, para toda a faixa de temperatura do ar, menores valores de diferença de cor total e dureza são alcançados.

De um modo geral, da mesma forma que avaliado para o Planejamento A, baixo nível de potência de micro-ondas é requerido para que os parâmetros de cor e dureza apresentem valores desejáveis. Porém, a utilização de alta temperatura do ar é imprescindível para a obtenção de valores desejáveis para a umidade final e principalmente para o encolhimento.

Na Tabela 5.16 são apresentadas as condições atribuídas na otimização das respostas via função desejabilidade global, em que as variáveis de entrada proporcionaram bons resultados, de acordo com os mesmos requisitos adotados para o Planejamento A.

Tabela 5.16: Valores atribuídos na investigação das melhores condições de processo via função desejabilidade – Planejamento B.

	Condições para as respostas							
Valor atribuído	Umidade Final (% b.u.)	Cor (Δ <i>E</i> *)	Dureza (N)	Encolhimento (V/V ₀)				
Baixos	14,57 (0)	15,15 (0)	99,80 (0)	0,46 (1)				
Médios	11,26 (1)	11,92 (1)	68,30 (0,5)	0,37 (1)				
Altos	7,96 (1)	8,69 (1)	36,81 (1)	0,29 (0)				

(0): corresponde aos valores considerados inaceitáveis; (0,5): corresponde aos valores considerados menos desejáveis que 1; e (1): corresponde aos valores considerados desejáveis (valores ótimos).

Na Figura 5.46 é apresentada a função desejabilidade global para a otimização das respostas referentes às condições de secagem do Planejamento B. A função desejabilidade atendeu de forma satisfatória as características estabelecidas, pois apresentou um resultado de desejabilidade global (D) igual a 0,87485, valor considerado aceitável e excelente (AKHNAZAROVA e KAFAROV, 1982).



Figura 5.46: Gráficos da função desejabilidade para as variáveis de resposta umidade final, cor, dureza e encolhimento – Planejamento B.

Pela Figura 5.46 observa-se que as melhores condições de processo, na forma codificada, obtidas para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas via função desejabilidade global, representam os seguintes valores reais: temperatura do ar de secagem de 45 °C e potência de micro-ondas de 100 W, confirmando os valores observados na análise prévia das curvas de nível.

Um fato importante de analisar é que para a secagem com aplicação descontínua de micro-ondas, a melhor temperatura do ar foi um pouco inferior a encontrada para a secagem com aplicação contínua de micro-ondas. Este resultado está relacionado com a secagem inicial puramente convectiva (80 °C) que atuou na estrutura do material como um "pré-tratamento", de forma que quando se iniciou a aplicação de micro-ondas os cubos de cenoura não apresentavam mais as propriedades de vegetal fresco. Portanto, a condição com temperatura do ar de 45 °C aliada à potência de micro-ondas de 100 W é considerada a mais adequada para obtenção de melhores respostas, mantendo a secagem inicial convectiva a 80 °C.

6 CONCLUSÕES

Tendo em vista os objetivos propostos, foi possível realizar a secagem convectiva de cubos de cenoura combinada com aplicação de micro-ondas em secador de leito fixo. De acordo com os dados experimentais obtidos e a discussão dos resultados apresentada, pôde-se concluir que:

- A aplicação de micro-ondas na secagem de cenoura demonstrou ser um método viável, pois acelerou a retirada da umidade do material reduzindo o tempo total da secagem. A secagem com aplicação contínua de micro-ondas proporcionou redução de pelo menos 60% no tempo total de processo em comparação com a secagem puramente convectiva a 80 °C. Para a secagem com aplicação de radiação somente a partir dos 30 minutos iniciais da secagem esta redução foi de pelo menos 50%.

- Pela comparação entre os Planejamentos A e B constatou-se que ambos proporcionaram amostras com conteúdo de umidade de acordo com o requerido para vegetais de produtos secos ($\leq 12\%$ b.u.). Também verificou-se que os maiores níveis de potência de micro-ondas e temperatura do ar de secagem resultaram em menores tempos de processo e menor conteúdo de umidade final da cenoura. Para ambos os modos de aplicação da radiação, a potência de microondas apresentou efeito mais pronunciado para a resposta umidade final em um mesmo tempo de processo, sendo o efeito da temperatura também significativo, porém menos pronunciado. Desta forma, em termos de processo, a secagem com aplicação contínua de micro-ondas apresentou-se mais viável do que a secagem com aplicação de radiação somente a partir de 30 minutos iniciais de processo, pois resultou em maiores taxas de secagem e em tempo total de operação consideravelmente menor.

- Em relação à qualidade do produto final observou-se que para as condições em que foi constatada diferença significativa entre os dois modos de aplicação de micro-ondas, a secagem com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais (Planejamento B – modo de aplicação de radiação descontínuo) foi menos adequada, pois resultou em maior degradação da cor, encolhimento mais acentuado e amostras de cenoura mais duras.

- Com relação às condições de secagem constatou-se que, para ambos os planejamentos, maiores níveis de potência de micro-ondas e temperatura do ar resultaram em menor encolhimento e teor de umidade final. No entanto, menores níveis de potência de micro-ondas e temperatura do ar resultaram em maior preservação da cor e amostras de cenoura mais macias. Portanto, para que os parâmetros de cor e dureza apresentem valores desejáveis é necessária a aplicação de menores níveis de potência de micro-ondas. Porém, nesta condição o emprego de alta temperatura do ar é imprescindível para obtenção de menor encolhimento e umidade final.

- No que se refere ao encolhimento volumétrico dos cubos de cenoura observou-se que a redução de volume das amostras, para ambos os planejamentos, apresentou valores na faixa de 54 a 71%. Para o encolhimento superficial a redução da área apresentou valores entre 46 a 62%, em relação à cenoura *in natura*. Os diferentes modos de secagem apresentaram diferenças significativas no encolhimento da cenoura somente para as condições de maior temperatura do ar (50 °C) e menor potência de micro-ondas (100 W). Constatou-se, que tanto a potência de micro-ondas quanto a temperatura do ar influenciaram significativamente no encolhimento, porém a temperatura do ar apresentou efeito menos pronunciado. Observou-se também um elevado encolhimento inicial com gradual estabilização no decorrer do processo de secagem, o que significa que o tamanho final das amostras foi fixado antes do final da secagem devido ao endurecimento da superficie do material. O encolhimento superficial seguiu a mesma tendência observada no encolhimento volumétrico. A evolução do encolhimento volumétrico durante a secagem apresentou uma relação quadrática com o conteúdo de umidade.

- Com relação à análise de cor verificou-se que a potência de micro-ondas e sua interação com a temperatura do ar apresentaram efeito significativo na coloração das amostras, para ambos os planejamentos experimentais. No que se refere ao parâmetros de cor, a secagem com aplicação de radiação somente a partir dos 30 minutos iniciais do processo (Planejamento B) diferiu da secagem com aplicação contínua de micro-ondas quando foi aplicado o maior nível de potência de micro-ondas (300 W). Neste caso, a coloração da cenoura foi mais escura e ocorreu maior perda da tonalidade vermelha e amarela.

- Por meio da análise de dureza verificou-se que as amostras submetidas às condições do Planejamento B foram mais duras em relação às amostras do Planejamento A somente quando foi aplicada a condição de menor potência de micro-ondas (100 W) e maior temperatura do ar de
secagem (50 °C). Pela análise estatística dos resultados foi verificado que a potência de microondas apresentou efeito significativo na dureza das amostras secas com aplicação contínua de micro-ondas, enquanto que, para as amostras secas com aplicação de micro-ondas a partir dos 30 minutos iniciais de processo, tanto a potência de micro-ondas quanto a temperatura do ar foram estatisticamente significativas para a dureza das amostras. Para as condições do Planejamento B, o efeito da temperatura também foi significativo, pois a secagem inicial foi realizada somente com ar quente a 80 °C. Para ambos os planejamentos, a força máxima de compressão tende a decrescer quando menores potências de micro-ondas são aplicadas, conferindo maior maciez ao material.

- Finalmente, conclui-se que as melhores condições de secagem, dentro do domínio experimental estudado, de acordo com a análise das curvas de nível e função desejabilidade global, para o Planejamento A foram: temperatura do ar de 50 °C e potência de micro-ondas de 100 W. Para o Planejamento B as condições ideais foram: temperatura do ar de 45 °C e potência de micro-ondas de 100 W, mantendo-se a secagem inicial (30 minutos) convectiva com temperatura do ar de 80 °C.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para dar continuidade ao estudo do processo de secagem de cenoura com aplicação de micro-ondas, as principais sugestões para trabalhos futuros são:

- Realizar adaptações no secador para que seja possível o acoplamento de uma balança no cesto do secador para monitorar a massa das amostras sem que haja a interrupção do processo de secagem e, também, a utilização de um sensor de fibra óptica ou infravermelho, a fim de monitorar o perfil de temperatura no interior do cesto durante os experimentos de secagem.

 A partir das informações expostas neste trabalho, estudar a eficiência energética dos processos com aplicação de micro-ondas (contínuo e descontínuo) a fim de comparar ambos os processos em termos energéticos. - Realizar análises das propriedades dielétricas do material seco a fim de avaliar a influência da secagem nestas propriedades e também correlacionar o comportamento do produto durante a secagem com as propriedades dielétricas para diferentes teores de umidade.

- Estudar o encolhimento do material durante o processo de secagem levando em consideração a densidade aparente do material e comparar com os resultados obtidos para o método de avaliação direta do encolhimento realizado neste trabalho.

- Avaliar as mudanças estruturais do material por meio de microscopia eletrônica de varredura, análise de densidade real e aparente e porosidade correlacionando estas propriedades com o encolhimento do material e com as condições de processo (potência de micro-ondas e temperatura do ar).

 Avaliar o teor de β-caroteno do produto seco com aplicação de micro-ondas a fim de verificar o valor nutricional da cenoura após o processamento com radiação e correlacionar os resultados com as variações de coloração do material.

- Realizar a análise de dureza por meio do método de perfuração e comparar com os resultados do teste em compressão expostos neste trabalho.

- Estudar o perfil de textura analisando os demais atributos deste parâmetro, além da dureza, para o produto seco nos diferentes modos de aplicação de micro-ondas e relacionar este perfil com análises sensoriais do produto seco.

- Avaliar o efeito da secagem com aplicação de micro-ondas na cinética de reidratação do material.

- Estudar o processo de secagem com aplicação de micro-ondas no modo intermitente (*on-off*, ou seja, desligando-se a radiação em períodos pré-determinados) e também com micro-ondas a vácuo a fim de avaliar a influência destes métodos na secagem de cenoura.

 Estudar a secagem com aplicação de micro-ondas para diferentes formas de corte, tais como fatias, palitos e flocos com o intuito de avaliar a influência da forma da cenoura na cinética de secagem.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, A.J. Quality measurement of fruits and vegetables. **Postharvest Biology and Technology**, vol. 15, p. 207-225, 1999.

AKHNAZAROVA, S. KAFAROV, V. Experiment optimization in chemistry and chemical engineering. Moscow: Mir, 1982.312p.

ALIBAS, I. Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. **LWT – Food Science and Technology**, vol. 40, p. 1445-1451, 2007.

AL-MUHTASEB *et al.* Shrinkage, density and porosity variations during the convective drying of potato starch gel. **14**° **Simpósio Internacional de Secagem (IDS 2004)**, São Paulo, Brasil, p.1604-1611, 2004.

ANDRADE, A.A. **Estudo do perfil sensorial, físico-químico e aceitação de queijo de coalho produzido no estado do Ceará**. 2006. 127 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

ANDRÉS, A. *et al.* Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air-microwave dehydration. **Journal of Food Engineering,** vol. 63, p. 71-78, 2004.

ARAÚJO, P. M. Estudo da desidratação osmótica da cenoura (*Daucus Carota L.*) em fatias. 2010. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

ARIKAN, M.F. *et al.* Drying characteristics and quality parameters of microwave-dried grated carrots. **Food Bioprocess Technology**, vol. 5, p. 3217–3229, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Análise sensorial dos alimentos e bebidas: terminologia – NBR 12806. Rio de Janeiro: ABNT.1993, 8 p.

BAKER, C. Industrial drying of foods. London: Chapman & Hall, 1997. 309p.

BARBOSA, W.C. Estudo do melhoramento da qualidade de cenoura (*Daucus carota L.*), desidratada através do processo de tratamento com solutos. 1980. 93 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1980.

BARREIRO, J.A. *et al.* Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. **Journal of Food Engineering**, vol. 33, p. 359–371, 1997.

BAUERNFEIND, J.C. Carotenoid vitamin A precursors and analogs in food and feeds. Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol. 20, p. 456-473, 1972.

BAYSAL, T. *et al.* Effect of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. **European Food Research and Technology**, vol. 218, p. 68-73, 2003.

BERTELI, M. N. Estudo comparativo de processos de secagem de sólidos granulados com e sem assistência de microondas. 2005. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F.O. **Química do processamento de alimentos**. 3. ed. São Paulo: Varela, 2001, 143p.

BRASIL. ANVISA. **Agência Nacional de Vigilância Sanitária**. Resolução-RDC nº 272, de 22 de setembro de 2005. Regulamento Técnico para Produtos de Vegetais, Produtos de Frutas e Cogumelos Comestíveis. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 set. 2005, Seção 1.

BUFFLER, C. R. Microwave cooking and processing: engineering fundamentals for the food scientist. New York: Van Nostrand Reinhold AVI, 1992, 169p.

CELESTINO, S.M.C. **Princípios de secagem de alimentos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010. 51p. (Embrapa Cerrados, Documentos, 276).

CHANGRUE, V. **Hybrid (osmotic, microwave-vacuum) drying of strawberries and carrots**. 2006. 190 p. [Ph. D. thesis] - Ste-Anne-de-Bellevue: McGill University, 2006.

CIVILLE, G. V., SZCZESNIAK, A. S. Guidelines to training a texture profile panel. Journal of Texture Studies, vol. 4, p. 204–223, 1973.

COOK, E.M.; DUMONT, H.D. Process drying practice. New York: Mc Graw-Hill, 1991.256p.

CRANK, J. The Mathematics of Diffusion, 2. ed. S.I Claredon Press Oxford, 1975, 414p.

CUI *et al.* Dehydration of garlic slices by combined microwave-vacuum and air drying. **Drying Technology**, vol. 21, p. 1173-1184, 2003.

DALL'OGLIO, E. L. **Reações da hexacloroacetona com o-diaminas aromáticas: efeitos de ultra-som e micro-ondas.** 2002. 159 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

DARVISHI, H. *et al.* Mathematical modeling and thin layer drying kinetics of carrot slices. **Global Journal of Science Frontier Research Mathematics and Decision Sciences**, vol. 12, p. 56-64, 2012.

DE ROECK *et al.*, Effect of high pressure/high temperature processing on cell wall pectic substances in relation to firmness of carrot tissue. Food Chemistry, vol. 107, p. 1225-1235, 2008.

DECAREAU, R. V.; PETERSON, R. A. Microwave processing and engineering. Chichester: Ellis Horwood, 1986, 224p.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. Journal of Quality Technology. vol. 12, p. 214-219, 1980.

EMBRAPA. Cultivo de Cenoura. Disponível em: http://www.cnph.embrapa.br/sistprod/cenoura/index.htm> Acesso em: 17/12/2012.

ENGELDER, D.; BUFFLER, C. Measuring dielectric properties of food products at microwave frequencies. **Microwave World**, vol. 12, p. 6-15, 1991.

ESAU, K. Anatomia das plantas com sementes. São Paulo: Edgard Blucher, 1974, 293 p.

EVANGELISTA, J. **Tecnologia de Alimentos**. 2ed. São Paulo: Livraria Atheneu Editora, 1992, 652p.

FELLOWS, P.J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. Porto Alegre: Artmed, 2006, 602p.

FENG, H.; TANG, J. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. **Journal of Food Science**, v. 63, p. 679-683, 1998.

FENNEMA, O.R. *et al.* **Química de Alimentos de Fennema**. 4 ed. Porto Alegre: Artmed, 2010, 900p.

FERREIRA, V.L.P. Colorimetria em alimentos. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 1991, 43p.

FIGIEL, A. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. **Journal of Food Engineering**, v. 98, p. 461–470, 2010.

FILGUEIRA, F.A.R. **Manual de Olericultura: cultura e comercialização de hortaliças**. 2.ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 1982, 357p.

FOUST, A. S. *et al.* **Princípios das operações unitárias.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1982, 670p.

FUNEBO, T.; OHLSSON, T. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. **Journal of Food Engineering**, vol. 38, p. 353-367, 1998

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

GUINÉ, R.; BARROCA, M.J. Effect of drying on the textural attributes of bell pepper and pumpkin. **Drying Technology**, vol. 29, p.1911-1919, 2011.

HATAMIPOUR, M. S.; MOWLA, D. Shrinkage of carrots during in an inert medium fluidized bed. **Journal of Food Engineering**, vol. 55, p. 247-252, 2002.

HOLLAND, B. *et al.* Vegetables, Herbs and Spices. Cambridge: Royal Society of Chemistry and Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1991, 163p.

HORTIBRASIL. Instituto Brasileiro de Qualidade em Horticultura. **Programa Brasileiro para a Modernização da Horticultura. Normas de Classificação - Classificação de cenoura.** Centro de Qualidade em Horticultura (CQH) CEAGESP, 2000. Disponível em: <<u>http://www.hortibrasil.org.br/jnw/imagens/stories/folders/cenoura.pdf</u>>. Acesso em: 15/02/2012.

HUNTERLAB. CIE L*a*b* Color Scale. Applications note. vol. 8, n. 7, Jul 1-15, 1996. Reston:HunterAssociatesLaboratories.Disponívelem:<</td>http://www.hunterlab.com/appnotes/an07_96a.pdf>. Acesso em: 28/09/2012.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 3. ed. São Paulo: IMESP, 1985, 406p.

JONES, P. L. High frequency dielectric heating in paper making. **Drying Technology**, vol. 4, p. 103-107, 1986.

KALLUF, V.H. Desidratação da polpa de abóbora (*Cucurbita moschata*) e seus teores em betacaroteno. 2006. 68 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

KHRAISHEH, M.A.M. *et al.* Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. **Food Research International**, v. 37, p. 497-503, 2004.

KOÇ, B. *et al.* Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: the effect of drying method. **Journal of Food Engineering**, v. 85, p. 340-349, 2008.

KOUCHAKZADEH, A.; SHAFEEI S. Modeling of microwave-convective drying of pistachios. **Energy Conversion and Management**, vol. 51, p. 2012–2015, 2010.

KROKIDA, M.K. *et al.* Compression analysis of dehydrated agricultural products. **Drying Technology**, vol. 18, p. 395-408, 2000.

KROKIDA, M.K. *et al.* Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables. **Drying Technology**, vol. 16, p. 667-668, 1998.

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

KROKIDA, M.K.; MAROULIS, Z.B. Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products. **Drying Technology**, vol.17, p. 449-466, 1999.

LI, R. *et al.* Sensory and instrumental properties of smoked sausage made with mechanically separated poultry (MSP) meat and wheat protein. **Journal of Food Science**, v. 63, p. 923-929, 1998.

LIN, T. M. *et al.* Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. **Food Research International**, vol. 31, p. 111-117, 1998.

LOZANO, J.E. *et al.* Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture content. **Journal of Food Science**, vol. 48, p. 1497-1502, 1983.

MACDOUGALL, D. B. Colour in food: improving quality. Cambridge: CRC Press Woodhead Publishing, 2002, 378p.

MADIOULI, I. *et al.* A method for determination of porosity change from shrinkage curves of deformable materials. **Drying Technology**, vol. 25, p. 621-628, 2007.

MAHAN, L.K.; ESCOTT-STUMP, S. Krause: alimentos, nutrição e dietoterapia. 10 ed. São Paulo: Roca, 2002, 1157p.

MAROUELLI, W.A. *et al* **Irrigação da cultura da cenoura**. Circular Técnica 48, Brasília-DF, Janeiro, 2007.

MARSAIOLI Jr., A. **Desenvolvimento da tecnologia de aplicação de microondas em secador cilíndrico-rotativo combinado com ar quente para produtos granulados**. 1991. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos), UNICAMP, Campinas, 1991.

MASKAN, M. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 177–182, 2001.

MASKAN, M. Microwave/air and microwave finish drying of banana. Journal of Food Engineering, v. 44, p. 71–78, 2000.

MAY, B.K.; PERRE, P. The importance of considering exchange surface are reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, vol. 54, p. 271-282, 2002.

MAYOR, L.; SERENO, A.M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, vol. 61, p. 373-386, 2004.

MENON, A. S.; MUJUMDAR, A. S. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker Inc., 1987. cap. 1, p. 3-46.

METAXAS, A. C.; MEREDITH, R. J. Industrial Microwave Heating. Londres: Peter Peregrinus, 1983, 357p.

MIDILLI, A. *et al.* A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, vol. 20, p. 1503–1513, 2002.

MINOLTA. Chroma Meter CR-300/ CR- 310/ CR- 321/ CR331/ CR331C Instruction Manual. Oskada: Konica Minolta Co.Ltda. Japão. 1991, 92p.

MINOLTA. **Precise Color Communication Color Control from Perception to Instrumentation**. Oskada: Konica Minolta Sensing, Inc, 2007, 62 p. MOREIRA, R. *et al.* Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. **Drying Technology**, v. 18, p. 279-294, 2000.

MUDGETT, R. E. Microwave properties and heating characteristics of foods. **Food Technology**, v. 40, p. 84-93, 1986.

MURAYAMA, S. Hortaliças de Raízes: Cenoura. In: Horticultura - instituto campineiro de ensino agrícola. Campinas: Cia Brasileira de Impressão e Propaganda. 2 ed., 1973. cap. 3, p. 173-182.

NAHIMANA, H. *et al.* Drying and radial shrinkage characteristics and changes in color and shape of carrot tissues (*Daucus carota L*) during air drying. African Journal of Biotechnology, v. 10, p. 15327-15345, 2011.

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

NELSON S.O. Electrical properties of agricultural products (a critical review). St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1973, 21p.

NELSON, S.O.*et al.* Microwave permittivities of fresh fruits and vegetables from 0.2 to 20 GHz. **Transactions of the ASAE**,vol. 37, p. 183-189, 1994.

NEPA/UNICAMP. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação. **Tabela brasileira de composição de alimentos – TACO**. 4. ed. revisada e ampliada. Campinas: BookEditora, 2011. Disponível em: <<u>http://www.unicamp.br/nepa/taco</u>>. Acesso em: 17/04/2012.

NITZ, M. **Secagem de macarrão assistida por micro-ondas**. 1999. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999

OHLSSON, T.; RISMAN, P. O. Temperature distributions of microwave heating spheres and cylinders. Journal of Microwave Power, v. 13, p. 303-310, 1978.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. **1949**. 65f. [dissertation] - Purdue University, Lafayette, 1949.

PANYAWONG, S.; DEVAHASTIN, S. Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor. **Journal of Food Engineering**, vol. 78, p. 151–161, 2007.

PARRY, J. L. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 32, p. 1-29. 1985.

PEREIRA, N. R. **Estudo da aplicação de microondas na secagem de bananas tratadas osmoticamente**. 2007. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PINEDO, A.A. Secagem a vácuo de cenoura (*Daucus carota*) e abóbora (*Cucurbita máxima*): Estudo das características do processo. 2003. 195f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

PRABHANJAN, D. G. *et al.* Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. **Journal of Food Engineering**, vol. 25, p. 283-293, 1995.

PRAKASH, S. *et al.* Performance evaluation of blanched carrots dried by three different dries **Journal of Food Engineering**, vol. 62, p. 305-313, 2004.

RAGHAVAN, V.; SILVEIRA, A. M. Shrinkage characteristics of strawberries osmotically dehydrated in combination with microwave drying. **Drying Technology**, v. 19, p. 405-414, 2001.

RAMASWAMY, H.; MARCOTTE, M. Food processing: principles and applications. New York: CRC Press, 2006. 420p.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. Journal of Food Engineering, v. 23, p. 91-105, 1994.

RAVEN, P.H. et al. Biologia Vegetal. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001, 659p.

REYES, A. *et al.* Effect of processing conditions on drying kinetics and particle microstructure of carrot. **Drying Technology,** vol. 26, p. 1272-1285, 2008.

ROSA, G.S. Secagem de *PHB* – polímero biodegradável obtido da cana-de-açúcar – em leito fluidizado pulsado rotativo com aplicação de micro-ondas. 2012. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ROSA, J.G. **Secagem de cenoura** (*Daucus carota L.*) **em microondas.** 2010. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

ROSENTHAL, A.J. Food Texture: Measurement and Perception. Gaithersburg: Aspen Publishers, Inc, 1999. 311p

SCHANDA, J. **Colorimetry: understanding the CIE System**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Publication 2007, 499p.

SIMON, P.W.; WOLFF, X.Y. Carotenes in typical and dark orange carrots. Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol. 35, p. 1017-1022, 1987.

SMITH, D.S. *et al.* Carrots. In: SMITH, D.S. *et al.* **Processing vegetables: science and technology.** Lancaster: Technomic Publishing Company, Inc., 1997. cap. 5, p. 117-127.

SOYSAL, Y. *et al.* Intermittent microwave-convective drying of red pepper: drying kinetics, physical (colour and texture) and sensory quality. **Biosystems Engineering**, v. 103, p. 455-463, 2009.

STANLEY, E.; CHARM, Sc.D. Dehydration of Foods. In: STANLEY, E.; CHARM. The Fundamentals of Food Engineering. Westport: Avi Publishing Company, 1963. cap.8, p. 252-358.

STEPIÉN, B. Effect of vacuum-microwave drying on selected mechanical and rheological properties of carrot. **Biosystems Engineering**, vol. 99, p. 234-238, 2008.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986, 448p.

SUMMU, G. *et al.* Drying of carrots in microwave and halogen lamp–microwave combination ovens. **LWT - Food Science and Technology**, vol. 38, p. 549–553, 2005.

SUZUKI, K.*et al* Shrinkage in dehydration of root vegetables. **Journal of Food Science**, vol. 41, p. 1189-1193, 1976.

TRONCOSO, E.; PEDRESCHI, F. Modeling of textural changes during drying of potato slices. **Journal of Food Engineering**, vol. 82, p. 577–584, 2007.

TULASIDAS, T.N. *et al.* Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2450 Mhz - I: Drying Kinetics. **Drying Technology**, vol. 13, p. 1949-1971, 1995.

VAN ARSDEL, W.B. *et al.* Drying phenomena. In: VAN ARSDEL, W.B *et al.* Food dehydration: drying methods and phenomena. Westport: Avi Publishing Company, 1973. cap.22, p. 22-57.

VAN BUREN, J. P. The chemistry of texture in fruits and vegetables. Journal of Texture Studies, vol. 10, p. 1–23, 1979.

VANDIVAMBAL, R.; JAYAS, D.S. Changes in quality of microwave-treated agricultural products- a review. **Byosystems Engineering**, vol. 98, p. 1-16, 2007.

VENKATESH, M.S.; RAGHAVAN, G.S.V. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. **Biosystems Engineering**, vol. 88, p.1-18, 2004.

VERVOORT *et al.*, Thermal versus high pressure processing of carrots: a comparative pilot-scale study on equivalent basis. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, vol. 15, p.1-13, 2012.

VIEIRA, M. G. A. Análise da secagem de polpa de celulose para a obtenção de papel reciclado tipo cartão. 2006. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

WAGNER, L. A.; WARTHESEN, J. J. Stability of spray- dried encapsulated carrot carotenes. Journal of Food Science, vol. 60, 1048 – 1053, 1995.

WANG, J.; XI, Y.S. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. **Journal of Food Engineering**, vol. 68, p. 505-511, 2005.

WANG, N.; BRENNAN, J.G. Changes in structure, density and porosity potato during dehydration. Journal of Food Engineering, vol. 24, p. 61-76, 1995.

WANG, Z. *et al.* Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. **Journal of Food Engineering**, vol. 80, p. 536–544, 2007.

YADOLLAHINIA, A. *et al.* New method for determination of potato slice shrinkage during drying. **Computer and electronics in agriculture**, v. 65, p. 268-274, 2008.

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

ZIELINSKA, M.; MARKOWSKI, M. Drying behavior of carrots dried in a spout- fluidized bed dryer. **Drying Technology**, vol. 25, p. 261-270, 2007.

ZOGZAS, N.P.*et al.* Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. **Drying Technology**, v. 12, p. 1653-1666, 1994.

APÊNDICE A

Resultados da secagem convectiva de cenoura em secador de leito fixo



Figura A1: Temperatura do ar (a) e umidade relativa do ar (b) na entrada do secador.



Figura A2: Ajustes do modelo de Page - Secagem convectiva.

Ensaios	<i>T_{ar}</i> (°C)	а	$K(\min^{-1})$	n	b	R^2	SQR
1	70	0,9651	0,0041	1,21	0,00001	0,9998	0,0003
2	80	0,9168	0,0039	1,30	0,00004	0,9998	0,0002

Tabela A1: Parâmetros do modelo de Midilli - Secagem convectiva.

Tabela A2: Parâmetros do modelo de Henderson e Pabis - Secagem convectiva.

Ensaios	T_{ar} (°C)	A	<i>K</i> (min ⁻¹)	R^2	SQR
1	70	1,1238	0,0130	0,9991	0,0018
2	80	1,1119	0,0171	0,9990	0,0017



Figura A3: Ajustes do modelo de Midilli (a) e Henderson e Pabis (b) - Secagem convectiva.

APÊNDICE B

Resultados do Planejamento Experimental A



Figura B1: Umidade (b.s.) em função do tempo de secagem, ponto central (T_{ar} : 40 °C, P: 200 W) - Planejamento A.



Figura B2: Temperatura do ar na entrada do secador: condições de secagem do Planejamento A (a) e ponto central (T_{ar} : 40 °C, P: 200 W) (b).



Figura B3: Umidade relativa do ar na entrada do secador: condições de secagem do Planejamento A (a) e ponto central (T_{ar} : 40 °C, P: 200 W) (b).



Figura B4: Ajustes do modelo de Page: condições de secagem do Planejamento A (a) e ponto central (T_{ar} : 40 °C, P: 200 W) (b).

Ensaios	T_{ar} (°C)	P (W)	а	<i>K</i> (min ⁻¹)	n	b	R^2	SQR
1a	30	100	0,90	0,0023	1,56	-0,000018	0,9998	0,0003
2a	30	300	1,06	0,0089	1,39	-0,000007	0,9998	0,0001
3a	50	100	0,82	0,0031	1,58	-0,000002	0,9996	0,0003
4a	50	300	1,07	0,0134	1,41	-0,000002	0,9998	0,0005
5a(C)	40	200	1,19	0,0107	1,35	0,000090	0,9997	0,0002
6a(C)	40	200	1,04	0,0056	1,52	0,000009	0,9997	0,0001
7a(C)	40	200	1,15	0,0106	1,36	0,000007	0,9997	0,0001

Tabela B1: Parâmetros do modelo de Midilli – Planejamento A.



Figura B5: Ajustes do modelo de Midilli: condições de secagem do Planejamento A (a) e ponto central (T_{ar} : 40 °C, P: 200 W) (b).

Ensaios	T_{ar} (°C)	P (W)	а	$K(\min^{-1})$	R^2	SQR
1a	30	100	1,49	0,0325	0,9961	0,0055
2a	30	300	1,85	0,0534	0,9990	0,0006
3a	50	100	1,53	0,0440	0,9973	0,0019
4a	50	300	1,98	0,0764	0,9992	0,0003
5a(C)	40	200	1,95	0,0522	0,9992	0,0005
6a(C)	40	200	2,10	0,0579	0,9987	0,0007
7a(C)	40	200	1,96	0,0554	0,9992	0,0004

Tabela B2: Parâmetros do modelo de Henderson e Pabis - Planejamento A.



Figura B6: Ajustes do modelo de Henderson e Pabis: condições de secagem do Planejamento A (a) e ponto central (T_{ar} : 40 °C, P: 200 W) (b).

APÊNDICE C

Resultados do Planejamento Experimental B



Figura C1: Umidade (b.s.) em função do tempo de secagem, ponto central ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 40 °C, *P*: 200 W) - Planejamento B.



Figura C2: Temperatura do ar na entrada do secador: condições de secagem do Planejamento B (a) e ponto central ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 40 °C, P: 200 W) (b).



Figura C3: Umidade relativa do ar na entrada do secador: condições de secagem do Planejamento B (a) e ponto central (b).



Figura C4: Ajustes do modelo de Page: condições do Planejamento B (a) e ponto central (T_{ar} inicial: 80 °C, T_{ar} : 40 °C, P: 200 W) (b).

Ensaios	T_{ar} (°C)	P (W)	a	<i>K</i> (min ⁻¹)	n	b	R^2	SQR
1b	30	100	1,09	0,0160	1,08	-0,00007	0,9997	0,00031
2b	30	300	1,33	0,0057	1,45	-0,00009	0,9997	0,00009
3b	50	100	1,23	0,0066	1,39	0,00001	0,9997	0,00024
4b	50	300	1,03	0,0008	1,92	-0,00001	0,9989	0,00032
5b(C)	40	200	0,84	0,0008	1,88	0,00001	0,9991	0,00031
6b(C)	40	200	0,95	0,0008	1,90	0,00002	0,9991	0,00031
7b(C)	40	200	1,12	0,0017	1,73	0,00001	0,9992	0,00025

Tabela C1: Parâmetros do modelo de Midilli – Planejamento B.



Figura C5: Ajustes do modelo de Midilli: condições de secagem do Planejamento B (a) e ponto central ($T_{ar inicial}$: 80 °C T_{ar} : 40 °C, P: 200 W) (b).

						5
Ensaios	T_{ar} (°C)	P (W)	а	<i>K</i> (min ⁻¹)	R^2	SQR
1b	30	100	1,24	0,025	0,9988	0,00177
2b	30	300	3,15	0,052	0,9983	0,00055
3b	50	100	2,10	0,043	0,9989	0,00089
4b	50	300	4,98	0,063	0,9979	0,00062
5b(C)	40	200	3,03	0,051	0,9983	0,00059
6b(C)	40	200	3,62	0,055	0,9979	0,00070
7b(C)	40	200	3,88	0,057	0,9975	0,00084

Tabela C2: Parâmetros do modelo de Henderson e Pabis - Planejamento B.



Figura C6: Ajustes do modelo de Henderson e Pabis: condições de secagem do Planejamento B (a) e ponto central ($T_{ar inicial}$: 80 °C, T_{ar} : 40 °C, P: 200 W) (b).

APÊNDICE D

Resultados encolhimento do material

Ensaios	$T_{ar}(^{\circ}\mathrm{C})$	P (W)	A	В	R^2	E (%)
1a	30	100	0,719	0,399	0,9628	11,50
2a	30	300	0,660	0,434	0,9810	6,18
3a	50	100	0,714	0,410	0,9826	5,92
4a	50	300	0,686	0,448	0,9794	5,25
5a(C)	40	200	0,675	0,432	0,9855	5,22
6a(C)	40	200	0,695	0,430	0,9740	7,38
7a(C)	40	200	0,701	0,435	0,9781	6,16

Tabela D1: Parâmetros do modelo linear - Planejamento A.

Tabela D2: Parâmetros do modelo quadrático – Planejamento A.

Ensaios	$T_{ar}(^{\circ}\mathrm{C})$	P (W)	A	B	С	R^2	E (%)
1a	30	100	0,365	1,34	-0,77	0,9874	10,74
2a	30	300	0,415	1,06	-0,51	0,9950	3,10
3a	50	100	0,389	1,15	-0,57	0,9973	2,83
4a	50	300	0,426	1,13	-0,58	0,9965	2,23
5a(C)	40	200	0,414	1,05	-0,47	0,9962	3,17
6a(C)	40	200	0,408	1,21	-0,66	0,9941	4,21
7a(C)	40	200	0,414	1,16	-0,59	0,9940	4,23



Figura D1: Ajustes do modelo linear (a) e quadrático (b) referente ao ponto central (T_{ar} : 40 °C, P: 200 W) - Planejamento A.

Ensaios	$T_{ar}(^{\circ}\mathrm{C})$	P (W)	A	В	R^2	E (%)
1b	30	100	0,759	0,372	0,9629	10,20
2b	30	300	0,634	0,459	0,9765	6,01
3b	50	100	0,723	0,391	0,9759	7,34
4b	50	300	0,552	0,508	0,9767	6,14
5b(C)	40	200	0,695	0,413	0,9844	6,78
6b(C)	40	200	0,706	0,417	0,9774	8,64
7b(C)	40	200	0,708	0,416	0,9775	7,99

Tabela D3: Parâmetros do modelo linear - Planejamento B.

Tabela D4: Ajustes do modelo quadrático - Planejamento B.

Ensaios	$T_{ar}(^{\circ}\mathrm{C})$	P (W)	A	B	С	R^2	E (%)
1b	30	100	0,326	1,45	-0,84	0,9916	5,18
2b	30	300	0,437	1,11	-0,58	0,9933	3,39
3b	50	100	0,363	1,32	-0,73	0,9952	3,85
4b	50	300	0,485	0,96	-0,50	0,9930	3,32
5b(C)	40	200	0,394	1,11	-0,51	0,9951	3,95
6b(C)	40	200	0,394	1,24	-0,65	0,9933	4,73
7b(C)	40	200	0,392	1,29	-0,71	0,9963	3,62



Figura D2: Ajustes do modelo linear (a) e quadrático referente ao ponto central ($T_{ar inicial}$: 80, T_{ar} : 40 °C, *P*: 200 W) - Planejamento B.