

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

## **Secagem de cenoura (*Daucus carota L.*) em microondas**

Juliana Gomes Rosa

Orientador: Prof. Ronaldo Guimarães Corrêa

Co-orientador: Prof. José Teixeira Freire

São Carlos – SP

Março de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

## **Secagem de cenoura (*Daucus carota L.*) em microondas**

Juliana Gomes Rosa

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Ronaldo Guimarães Corrêa

Co-orientador: Prof. José Teixeira Freire

São Carlos - SP

Março de 2010

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

R788sc

Rosa, Juliana Gomes.  
Secagem de cenoura (*Daucus carota L.*) em microondas /  
Juliana Gomes Rosa. -- São Carlos : UFSCar, 2010.  
78 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São  
Carlos, 2010.

1. Secagem. 2. Cenoura. 3. Microondas. I. Título.

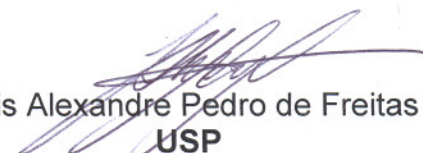
CDD: 660.28426 (20<sup>a</sup>)

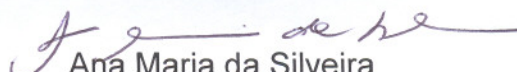
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE  
**JULIANA GOMES ROSA** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
SÃO CARLOS, EM 18 DE MARÇO DE 2010.

BANCA EXAMINADORA:

  
Ronaldo Guimarães Corrêa  
**Orientador, UFSCar**

  
José Teixeira Freire  
**Co-orientador, UFSCar**

  
Luis Alexandre Pedro de Freitas  
**USP**

  
Ana Maria da Silveira  
**UFSCar**

Ao meu pai João Rosa, com saudades

A minha mãe Mariza

## Agradecimentos

À Deus por me conceder a força necessária para a conclusão de mais uma etapa.

À minha mãe pelo apoio, incentivo, carinho e também pela compreensão das minhas crises e fraquezas durante este período.

A Marcel pelo amor, pela companhia, mesmo à distância e pela paciência.

Aos meus irmãos, Gustavo e Maria Tereza, pelos conselhos, pelo exemplo que são e por tornarem a volta pra casa em dias de folga ainda melhor e mais agitada.

Aos professores José Teixeira Freire e Ronaldo Guimarães Corrêa pela orientação, dedicação e pelos ensinamentos.

Aos professores do Centro de Secagem do DEQ/UFSCar pelas contribuições ao trabalho.

Aos técnicos do DEQ pela assistência e disposição em ajudar.

Aos colegas do Centro de Secagem pelos bons momentos de descontração e disponibilidade em ajudar.

Aos amigos que fiz em São Carlos, por amenizarem a saudade de casa e a falta da família.

Aos amigos de Viçosa, principalmente a Sissi pelo incentivo a me inscrever no programa e pelo abrigo em Campinas e a Shisa e a Luzia por ouvirem meus desabafos e pela força.

Aos amigos de Montes Claros em especial a Rafa por sempre estar disposta a me escutar e não negar nenhum convite.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

“E você aprende que realmente pode suportar,  
que realmente é forte, e que pode ir muito mais longe  
depois de pensar que não se pode mais.”

(William Shakespeare)

## Resumo

Cenoura é a raiz da planta de mesmo nome, *Daucus carota L.*. Este vegetal apresenta elevado consumo “in natura” e a sua utilização como ingrediente na formulação de produtos industrializados tem se elevado nos últimos anos. O principal atrativo da cenoura é o seu alto teor de  $\beta$ -caroteno. No momento da colheita a cenoura tem entre 80 e 90% de umidade e este alto teor de umidade a torna um produto com pequena vida de prateleira. Para aumentar a vida de prateleira da cenoura, a secagem é uma alternativa; além de ser necessária para preparar este vegetal para participar de diversas formulações em produtos industrializados. O estudo da secagem de cenoura tem sido realizado em diversos secadores e a qualidade do produto obtido relacionada aos diferentes processos. A secagem em secador de microondas tem se destacado na secagem de alimentos, pois o seu modo de aquecimento é diferente da secagem convectiva por ar quente, o que pode melhorar a qualidade do produto final obtido. Este estudo, então, tem como objetivo a análise da secagem de cenoura em microondas e também a avaliação da qualidade final do produto obtido e a verificação se a associação de vácuo a este modo de secagem gera aumento na qualidade da cenoura seca. Para tanto o acompanhamento da cinética de secagem em microondas e em microondas a vácuo foi realizado, bem como a relação entre esta cinética e as condições do processo, como a forma de corte e a potência utilizada. A influência do processo na qualidade do produto final foi avaliada através da determinação da densidade aparente, densidade real, porosidade, encolhimento, teor de  $\beta$ -caroteno e características de reidratação. Foram determinadas as isotermas de desorção da cenoura às temperaturas de 40°C e 50°C. Os dados de cinética de secagem e das isotermas de desorção foram ajustados a modelos sugeridos na literatura a fim de se descrever estes processos. Os resultados obtidos mostraram que a velocidade de secagem de cenoura em microondas foi influenciada pela forma de corte da amostra. Além disso, a associação ao vácuo resulta em um menor encolhimento e produto final mais poroso, porém estas características não foram garantia de melhor capacidade de reidratação. A degradação do  $\beta$ -caroteno aumentou com o aumento da potência utilizada. Dentre os modelos utilizados, o modelo de Page foi o que melhor descreveu a cinética de secagem e o modelo de Peleg foi o que melhor descreveu a cinética de reidratação de cenouras submetidas aos dois modos de secagem, microondas e microondas a vácuo.



## Abstract

Carrot is a root plant of the same name, *Daucus carota* L.. This vegetable has a high consumption and its use as an ingredient in the formulation of industrial products has increased in recent years. The main appeal of the carrot is its high content of  $\beta$ -carotene. During harvest the carrots have 80 to 90% humidity and this high moisture content makes it a product with a short shelf life. Drying is an alternative to increase the shelf life of carrot. In addition, a drying operation is required to prepare the plant to participate in various formulations of industrial products. The study of carrot drying has been performed in several dryers and the quality of the product related to different processes. Drying in a microwave dryer has stood out in the drying of food, as its heating mode is different from conventional drying by hot air. Microwave drying can improve the quality of the final product. The purpose of this study is to analyze the drying of carrots in a microwave dryer, to evaluate the quality of the final product and to check whether the combination of vacuum drying will lead to an increase in the quality of the dried carrots. The monitoring of the kinetics of microwave drying and microwave vacuum drying was conducted and the relationship between the kinetics and process conditions, such as the carrot shape and the power used, was investigated. The influence of such processes in the characteristics of the final product was evaluated by determining the apparent density, real density, porosity, shrinkage, total  $\beta$ -carotene and rehydration. Also the desorption isotherms of carrots were determined at temperatures of 40°C and 50°C. The data of drying kinetics and desorption isotherms were fitted to models suggested in the literature in order to describe these processes. The results showed that the drying rate of carrot in a microwave dryer was affected by the carrot shape. The content of  $\beta$ -carotene was reduced with the increase of power applied. The microwave drying in vacuum produced carrots with higher porosity and lower shrinkage, but this characteristic was not reflected in the ability of rehydration, which was independent of the drying process. Of the models fitted to the experimental results, the Page model gave the best fit to the kinetics of drying and Peleg model gave the best fit to the kinetics of rehydration of carrots dried in a microwave dryer and a microwave drying in vacuum.

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Elementos morfológicos que compõe a cenoura. ....	4
<b>Figura 2.2:</b> Representação esquemática do fenômeno de histerese na sorção de umidade. Adaptado de Kaminski e Kudra (2000). ....	17
<b>Figura 2.3:</b> Isotermas de adsorção e dessorção para celulose micro-cristalina e Agar a 25 °C. Adaptado de Kaminski e Kudra (2000). ....	18
<b>Figura 3.1:</b> Equipamento adaptado para a secagem em microondas a vácuo. ....	28
<b>Figura 3.2:</b> Formas de corte utilizadas. ....	30
<b>Figura 3.3:</b> Esquema do recipiente utilizado na determinação das condições de equilíbrio (Barrozo,1995). ....	37
<b>Figura 4.1:</b> Isotermas de equilíbrio da cenoura para as temperaturas de 40°C e 50°C e os desvios padrões de cada ponto experimental. ....	40
<b>Figura 4.2:</b> Umidade de equilíbrio em função da atividade de água para cenoura a 40°C (• pontos experimentais e — curva de ajuste da equação de GAB). ....	42
<b>Figura 4.3:</b> Umidade de equilíbrio em função da atividade de água para cenoura a 50°C (• pontos experimentais e — curva de ajuste da equação de GAB). ....	42
<b>Figura 4.4:</b> Energia absorvida pela água em função da potência aplicada. ....	43
<b>Figura 4.5:</b> Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para as formas de cubo, palito e discos e potência de 2,0 W/g. ....	45
<b>Figura 4.6:</b> Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para as formas de cubo, palito e discos e potência de 1,0 W/g. ....	45
<b>Figura 4.7:</b> Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para discos de 8 mm de espessura e cubo em estufa de convecção forçada. ....	47
<b>Figura 4.8:</b> Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para cubo e secagem em microondas em diferentes potências. ....	49
<b>Figura 4.9:</b> Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para discos de 8 mm de espessura e secagem em microondas em diferentes potências. ....	49
<b>Figura 4.10:</b> Taxa de secagem em função da umidade adimensional para a secagem de cenoura, na forma de cubo, em microondas e diferentes potências. ....	50
<b>Figura 4.11:</b> Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para diferentes potências durante a secagem em microondas (M) e em microondas a vácuo (MV), com cenouras cortadas em palito. ....	50

<b>Figura 4.12:</b> Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para diferentes potências durante a secagem em microondas (M) e em microondas a vácuo (MV), com cenouras cortadas em discos de 4 mm de espessura. ....	51
<b>Figura 4.13:</b> Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para a secagem de cenoura em estufa a temperatura de 70°C com e sem uso de vácuo. ....	52
<b>Figura 4.14:</b> Densidade aparente em função da umidade adimensional ( $X/X_0$ ) para secagem de cenoura em microondas (M) e em microondas a vácuo (MV) a 2,0 W/g de potência. ....	56
<b>Figura 4.15:</b> Densidade aparente em função da umidade adimensional ( $X/X_0$ ) para secagem de cenoura em microondas a vácuo (MV) a 2,0 W/g e 1,0 W/g de potência. ....	57
<b>Figura 4.16:</b> Densidade real em função da umidade adimensional ( $X/X_0$ ) para secagem de cenoura em microondas (M) e em microondas a vácuo (MV) a 1,0 W/g de potência. ....	58
<b>Figura 4.17:</b> Densidade real em função da umidade adimensional ( $X/X_0$ ) para a secagem de cenoura em microondas (M) a 2,0 W/g e 1,0 W/g de potência. ....	58
<b>Figura 4.18:</b> Coeficiente de encolhimento em função da umidade adimensional ( $X/X_0$ ) para secagem de cenoura em microondas e 2,0W/g de potência. ....	60
<b>Figura 4.19:</b> Coeficiente de encolhimento em função da umidade adimensional ( $X/X_0$ ) para secagem de cenoura em microondas a vácuo e 2,0W/g de potência. ....	60
<b>Figura 4.20:</b> Razão de reidratação em função do tempo para cenoura em diferentes modos de secagem e potências. ....	64
<b>Figura 4.21:</b> Capacidade de absorção de água e porosidade em função do modo de secagem e potência utilizada. Sendo (M) microondas e (MV) microondas a vácuo. ....	68

## Lista de Quadros e Tabelas

<b>Tabela 2.1:</b> Composição de 100g de cenoura crua. ....	6
<b>Tabela 2.2:</b> Concentração média de $\alpha$ e $\beta$ -carotenos em diferentes vegetais. ....	6
<b>Quadro 2.1:</b> Equações semi-empíricas de secagem. ....	16
<b>Quadro 2.2:</b> Equações para umidade de equilíbrio de materiais biológicos. ....	20
<b>Quadro 2.3:</b> Equações semi-empíricas para cinética de reidratação. ....	27
<b>Tabela 3.1:</b> Relação entre as fases A e B utilizadas como eluente. ....	33
<b>Tabela 3.2:</b> Umidade relativa das soluções salinas em função da temperatura. ....	37
<b>Tabela 4.1:</b> Umidade de equilíbrio da cenoura nas temperaturas de 40°C e 50°C e seus respectivos desvios padrões. ....	39
<b>Tabela 4.2:</b> Parâmetros estimados para as equações de equilíbrio da cenoura nas temperaturas de 40°C e 50°C. ....	41
<b>Tabela 4.3:</b> Valores de $R^2$ referentes aos dados de cenoura para as temperaturas de 40°C e 50°C. ....	41
<b>Tabela 4.4:</b> Área superficial, volume e relação volume/área para formas utilizadas na secagem por convecção forçada. ....	48
<b>Tabela 4.5:</b> Desvio relativo médio entre o teor de umidade ao longo da secagem por microondas e microondas a vácuo, para as diferentes formas utilizadas. ....	51
<b>Tabela 4.6:</b> Parâmetros para a equação de Lewis. ....	53
<b>Tabela 4.7:</b> Parâmetros para a equação de Page. ....	53
<b>Tabela 4.8:</b> Teor de umidade, base úmida, para a cenoura antes do processo de secagem. ....	54
<b>Tabela 4.9:</b> Teor de umidade, base úmida, para a cenoura após o processo de secagem. ....	55
<b>Tabela 4.10:</b> Volume final em relação ao volume inicial da cenoura para diferentes modos de secagem. ....	59
<b>Tabela 4.11:</b> Coeficiente de correlação entre os valores experimentais observados e o modelo linear proposto por Lozano <i>et al.</i> (1998). ....	60
<b>Tabela 4.12:</b> Porosidade final da cenoura para secagem em microondas e em microondas a vácuo nas potências de 1,0 W/g e 2,0 W/g. ....	61
<b>Tabela 4.13:</b> Teor de $\beta$ -caroteno ao final de diferentes processos de secagem. ....	62
<b>Tabela 4.14:</b> Razão de reidratação e desvios para diferentes condições de secagem. ....	65
<b>Tabela 4.15:</b> Parâmetros da equação exponencial. ....	65

<b>Tabela 4.16:</b> Parâmetros da equação de Peleg.....	66
<b>Tabela 4.17:</b> Parâmetros da equação de Weibull.....	66
<b>Tabela 4.18:</b> Índices de reidratação para cenoura seca em microondas e em microondas a vácuo.....	67

## Nomenclatura

$a_w$	Atividade de água	[-]
$c_p$	Calor específico da água	$[L^{-2}T^{-2}\Theta^{-1}]$
$k$	Constante de secagem	$[T^{-1}]$
$L$	Espessura do material	[L]
$m$	Massa	[M]
$P_w$	Pressão parcial de vapor	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$P_w^0$	Pressão de saturação a temperatura utilizada	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$Q_{abs}$	Energia absorvida pela amostra	$[ML^2T^2n^{-1}]$
$S$	Coefficiente de encolhimento	[-]
$t$	Tempo	[T]
$T_s$	Temperatura ambiente	$[\Theta]$
UR	Umidade relativa	[-]
$V$	Volume	$[L^3]$
$X$	Umidade inicial do material	$[MM^{-1}]$
$X_m$	Umidade corresponde a monocamada de água	$[MM^{-1}]$
$Y$	Valor observado	
$y$	Valor previsto	

## Símbolos gregos

$\delta_p$	Profundidade de penetração da onda	[L]
$\varepsilon''$	Fator de perdas relativo	[-]
$\varepsilon'$	Constante dielétrica relativa	[-]
$\varepsilon$	Porosidade	[-]
$\lambda_0$	Comprimento de onda no vácuo	[0,1224m para 2450Hz]
$\rho$	Densidade	$[ML^{-3}]$

## Subscritos

0	Inicial
a	Ar
ap	Aparente
eq	Equilíbrio
r	Real
rh	Reidratada
s	Matriz sólida
w	Água

## Parâmetros de equações

a, b, c, C, M, N, $k_{GAB}$	Parâmetros relacionados às equações de equilíbrio, dimensional ou adimensional de acordo com a equação
B, E	Parâmetros da equação linear de encolhimento, adimensionais
k, $k_1$ , $k_2$ , a, d, n, $K_1$ , $K_2$ , w, $RR_e$ $\Theta$ , $\psi$	Parâmetros relacionados às equações semi-empíricas de secagem, dimensional ou adimensional de acordo com a equação

## Siglas e abreviações

b.s.	Base seca
b.u.	Base úmida
DHC	Capacidade de retenção de matéria seca
DVM	Desvio relativo médio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
M	Microondas

MV	Microondas a vácuo
RA	Capacidade de reidratação
RR	Razão de reidratação
SQR	Soma dos quadrados dos resíduos
WAC	Capacidade de absorção de água



## Sumário

AGRADECIMENTOS	-----	ii
RESUMO	-----	iv
ABSTRACT	-----	v
SUMÁRIO	-----	xiii
LISTA DE FIGURAS	-----	vi
LISTA DE QUADROS E TABELAS	-----	viii
NOMENCLATURA	-----	ix
1. INTRODUÇÃO	-----	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	-----	4
2.1 Cenoura	-----	4
2.1.1 Aspectos gerais	-----	4
2.1.2 Aspectos nutricionais	-----	5
2.2 Secagem	-----	8
2.2.1 Secagem de hortaliças	-----	8
2.2.2 Processo de secagem	-----	8
2.2.3 Secagem em microondas	-----	11
2.2.4 Modelos da cinética de secagem	-----	14
2.3 Caracterização física	-----	16
2.3.1 Isotermas de sorção	-----	16
2.3.2 Propriedades estruturais	-----	20
2.4 Reidratação	-----	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	-----	28
3.1 Material	-----	28
3.2 Equipamentos	-----	28
3.3 Procedimento experimental	-----	29
3.3.1 Preparo das amostras	-----	29
3.3.2 Verificação da potência do equipamento	-----	30
3.3.3 Cinética de secagem	-----	31
3.3.4 Caracterização das amostras	-----	33

3.4	Reidratação-----	36
3.5	Isotermas de equilíbrio -----	36
3.6	Tratamento de dados-----	38
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	39
4.1	Isotermas de sorção -----	39
4.2	Secagem -----	43
	4.2.1 Verificação da potência do equipamento -----	43
	4.2.2 Cinética de secagem -----	44
4.3	Caracterização das amostras -----	54
4.4	Reidratação-----	63
	4.4.1 Cinética de reidratação -----	63
	4.4.2 Índices de reidratação -----	66
5.	CONCLUSÕES-----	70
6.	SUGESTÕES -----	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	73

## 1. Introdução

A secagem, que é a retirada de substâncias voláteis dos materiais, tem grande importância no processamento de alimentos. A maioria das frutas e vegetais possui alto teor de umidade quando “in natura”, o que os torna perecíveis. O pequeno tempo de vida de prateleira de alimentos com elevado teor de umidade é consequência da disponibilidade de água para a propagação de microorganismos deterioradores e reações químicas indesejáveis. Por isso, a secagem, por propiciar a redução do teor de umidade, é uma forma comum de conservação de alimentos.

Além do aumento de vida útil desses produtos, a secagem diminui os custos com armazenamento e transporte. As frutas e vegetais desidratados não só dispensam a necessidade de armazenamento sob condições especiais, como baixa temperatura e alta umidade relativa do ar, exigidas pela maioria destes produtos “in natura”, como também possuem volume relativamente menor. Contudo, a secagem pode ter consequências negativas como a deterioração de componentes nutricionais, escurecimento e obtenção de produtos com baixa capacidade de reidratação.

As limitações da qualidade de alimentos desidratados têm impulsionado grande número de pesquisas científicas, uma vez que é crescente a utilização de frutas e vegetais desidratados na formulação de diversos produtos industrializados como sopas, massas, sucos, suplementos alimentares e cosméticos. O principal intuito da adição destes produtos nestas formulações é agregar valor às mesmas, seja pelo aumento do valor nutricional ou pela atratividade devido à coloração que na maioria das vezes lhes são peculiar.

O interesse na obtenção de alimentos desidratados de qualidade é incentivado pela crescente demanda deste tipo de produto. Só o mercado de sopas desidratadas, por exemplo, cresceu 80% entre os anos de 2005 e 2007 e ainda existe espaço para crescimento maior, já que o consumo de sopas desidratadas é tímido se comparado ao de macarrões instantâneos. Sendo assim, a preocupação em reunir especificações de qualidade e conservação da energia incentiva à busca de uma profunda compreensão do funcionamento e dos problemas relacionados com a concepção e operação de desidratação e reidratação de vegetais (Krokida e Marinus-Kouris, 2003).

A cenoura é um vegetal sobre o qual se tem especial interesse, já que é altamente nutritiva. Ela contém apreciáveis quantidades de vitaminas do complexo B (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>6</sub> e B<sub>12</sub>) e também importantes minerais (Górnicki e Kaleta, 2007). Este vegetal se destaca

principalmente no teor de  $\beta$ -caroteno chegando a ser citado por alguns autores, entre eles Bao e Chang (1994) e Bureau e Bushway (1986), como o alimento da dieta humana com maior teor deste nutriente.

Na cenoura desidratada a conservação do teor de  $\beta$ -caroteno é importante para preservação da sua aparência e também do seu valor nutricional (Prakash *et al.*, 2004). Por ser um fator determinante no valor nutricional de cenouras, a conservação do  $\beta$ -caroteno tem sido escolhida como índice primário de qualidade. Já a reidratação pode ser considerada como índice secundário, uma vez que este fator é um dos principais índices sensoriais (Pan *et al.*, 1999).

Diante deste cenário, torna-se interessante a busca por métodos alternativos para a secagem de cenouras. A utilização de microondas associada ou não à convecção forçada ou ao vácuo apresenta crescimento na indústria de alimentos. As suas principais vantagens baseiam-se no rápido aquecimento do material e na absorção de energia diretamente pela umidade presente no mesmo. Este fato tende a evitar o super aquecimento, além de diminuir os danos estruturais e nutricionais causados por altas temperaturas. Porém, caso a secagem em microondas seja feita de maneira inadequada, o produto final obtido terá a sua qualidade comprometida. A produção de cenoura seca em microondas, de forma a manter o máximo de similaridade com aquela “in natura”, depende então da compreensão deste processo de secagem e da relação entre condições de processamento e a qualidade do produto final.

Alguns trabalhos encontrados na literatura, a respeito da secagem de cenoura, relacionam as características da cinética de secagem, propriedades estruturais e características de reidratação do material a diversos métodos de secagem, desde a secagem ao sol, que é a mais primária, até a liofilização. Entre estes trabalhos o de Krokida e Maroulis (1997) acompanhou a evolução das propriedades estruturais de cenoura seca por convecção forçada, estufa a vácuo, microondas, liofilização e desidratação osmótica. Os mesmos autores, em 1999, compararam as propriedades estruturais da cenoura para secagem em microondas e microondas a vácuo. Lin *et al.* (1998) fizeram uma comparação entre as propriedades nutricionais e estruturais de cenouras secas em microondas a vácuo, ao sol e liofilizadas. Cui *et al.* (2004) estudaram a cinética de secagem de cenouras em microondas a vácuo e Prakash *et al.* (2004), além da cinética de secagem, compararam a retenção de  $\beta$ -caroteno e reidratação para cenoura seca em leito fluidizado, microondas e ao sol. Wang e Xi (2005) investigaram o efeito da espessura da amostra e potência utilizada no secador na cinética de secagem e de reidratação de cenouras.

No entanto, observa-se uma carência de uma comparação entre os aspectos da cinética de secagem, propriedades físicas e qualidade nutricional, para a secagem de cenoura em microondas e em microondas associada ao vácuo.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é a análise da secagem de cenoura em microondas e em microondas a vácuo. Para tanto, ele é composto de estudos experimentais da cinética de secagem e da influência que certas condições de operação do processo, como a forma de corte da amostra e da potência aplicada, afetam o mesmo. Estudos do efeito da associação de vácuo a microondas na cinética de secagem também são objetos de investigação. E de que forma as propriedades estruturais da cenoura (densidade real, densidade aparente e porosidade) se relacionam com o teor de umidade e o modo de secagem utilizado. Finalmente, as características finais do material em relação às propriedades de reidratação e retenção de  $\beta$ -caroteno e sua relação com o método e condições de secagem, também foram avaliadas neste trabalho.

## 2. Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais tópicos relacionados ao desenvolvimento desse trabalho. Nesta revisão são abordados: a cenoura, em seus aspectos gerais e nutricionais; a secagem, em seus fundamentos e métodos mais utilizados para o processamento de vegetais; caracterização física comum aos processos de secagem e, por fim, a característica de reidratação de vegetais, um importante parâmetro de qualidade para produtos secos.

### 2.1 Cenoura

#### 2.1.1 Aspectos gerais

A cenoura, vegetal do grupo das raízes tuberosas, é botanicamente classificada como *Daucus carota L.*, da família *Apliaceae* e originária da Europa e da Ásia (EMBRAPA, 2009). A produção brasileira de cenouras no ano de 2008 foi de aproximadamente 784 mil toneladas, sendo Minas Gerais, Bahia, Paraná e São Paulo os principais estados produtores (EMBRAPA, 2009).

A Figura 2.1 apresenta os principais elementos morfológicos da cenoura. A principal diferenciação está entre o córtex e o coração, o que torna a parte comestível da cenoura, e conseqüentemente a parte industrialmente processada, um material heterogêneo.

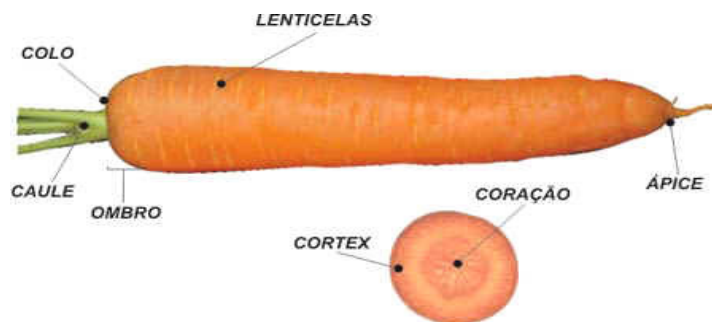


Figura 2.1: Elementos morfológicos que compõe a cenoura.

No grupo das hortaliças, a cenoura é classificada como legume, pois sua parte utilizada para a alimentação é a raiz (Murayama, 1972). As cenouras são ainda classificadas em diferentes variedades de acordo com a forma, coloração e comprimento. De um modo

geral, enquadram-se no grupo de alimentos semiperecíveis, uma vez que mesmo tendo apreciável conteúdo de líquido, apresentam estabilidade a alterações, por causa da estreita ligação da água nela contida com a sua matriz sólida. No entanto, limitações de durabilidade estão relacionadas a cuidados de manuseio e armazenamento (Evangelista, 1992). Quando “in natura”, a cenoura deve ser armazenada à temperatura de 0°C e à umidade relativa do ar de 90 a 95%. Murcha com baixa umidade, mesmo à temperatura recomendada (Murayama, 1972). Além disso, quando não armazenada corretamente está sujeita a várias formas de apodrecimento (*Alternaria rancidina*), com cores negra, cinzenta e amolecimento e, às vezes apresenta desprendimento de líquido (Evangelista, 1992).

O transporte de cenouras deve ser feito observando, além da temperatura adequada, a profundidade dos recipientes, pois ela se deteriora facilmente pela pressão exercida pelas camadas superiores sobre as inferiores (Evangelista, 1992).

A cenoura apresenta grande consumo “in natura”, principalmente pelo seu alto valor nutritivo e relativa disponibilidade. No entanto, ultimamente, com a mudança no estilo de vida das pessoas é grande a procura por alimentos práticos, previamente modificados industrialmente, mas que possuam qualidade nutritiva.

Devido a isto, aumenta a utilização da cenoura como matéria-prima na indústria de alimentos para a obtenção de uma vasta quantidade de produtos como, por exemplo, alimentos infantis, pães e biscoitos, “snacks”, sopas, patês e sucos e também na indústria cosmética. O acréscimo deste vegetal na formulação de alimentos agrega valor nutricional aos mesmos, além de torná-los mais atrativos visualmente pela sua coloração. Na formulação de cosméticos, a cenoura atribui aos produtos propriedades funcionais. A cenoura é também utilizada em cápsulas e suplementos vitamínicos.

Entretanto, para serem utilizadas industrialmente, geralmente as cenouras devem ser previamente tratadas e a secagem é um dos processos mais utilizados (Hiranvarachat *et al.*, 2008).

### **2.1.2 Aspectos nutricionais**

A cenoura destaca-se na dieta humana pelo seu alto valor nutricional. Ela é rica em vitaminas, tais como as do complexo B (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>6</sub> e B<sub>12</sub>), e também em alguns minerais como fósforo, cloro, potássio, cálcio e sódio que são ingredientes reguladores de processos

vitais no organismo humano (Evangelista, 1992; Prakash *et al.*, 2004). A Tabela 2.1 relaciona a composição nutricional da cenoura crua.

Tabela 2.1: Composição de 100g de cenoura crua.

<b>Componente</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
Calorias	42	kcal
Gorduras	0,19	g
Carboidratos	10,14	g
Fibras	1,1	g
Proteínas	1,2	mg
Sódio	50	mg
Potássio	300	mg
Cálcio	39	mg
Fósforo	37	mg
Ferro	1,2	mg
Cobre	0,14	mg
Zinco	0,3	mg
Magnésio	15	mg
Iodo	0,009	mg
Manganês	0,6	mg
Tiamina (vitamina B <sub>1</sub> )	0,06	mg
Riboflavina (vitamina B <sub>2</sub> )	0,06	mg
Carotenóides ativos	2 a 10	mg
Ácido ascórbico (vitamina C)	9	mg
Vitamina E	0,46	mg

Fonte: Riambau (1998) e Embrapa (2008).

Além de sua composição abranger uma vasta quantidade de importantes nutrientes é interessante ressaltar a presença de carotenos na cenoura. Estes carotenos são o  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\zeta$ -caroteno, licopeno e  $\beta$ -zeacaroteno. Alguns trabalhos como os de Bureau e Bushway (1986) e Bao e Chang (1994) relatam ser a cenoura o alimento com maior teor de  $\beta$ -caroteno. A Tabela 2.2 apresenta a concentração média de  $\alpha$  e  $\beta$ -carotenos em diferentes vegetais.

Tabela 2.2: Concentração média de  $\alpha$  e  $\beta$ -carotenos em diferentes vegetais.

<b>Vegetais</b>	<b><math>\beta</math>-caroteno (<math>\mu\text{g}/100\text{g}</math>)</b>	<b><math>\alpha</math>-caroteno (<math>\mu\text{g}/100\text{g}</math>)</b>
Brócolis	4	-
Cenoura	7.900	3.700
Aspargo	449	9
Alface	1.900	1
Tomate	520	-
Abóbora	3.100	3.800

Fonte: Mahan e Escott-Stump (1996).



Dentre os carotenos, o  $\beta$ -caroteno é de especial interesse por possuir maior atividade vitamínica A, ou seja, maior capacidade de ser convertido em vitamina A. Bauernfeind (1972) considerou o  $\beta$ -caroteno como tendo 100% de atividade vitamínica A e relacionou a sua atividade vitamínica à atividade vitamínica dos outros carotenos. Para ele o  $\alpha$ -caroteno é o que possui a segunda maior atividade vitamínica e esta representa apenas em torno de 50% da atividade vitamínica do  $\beta$ -caroteno. Outra importante função dos carotenos que tem sido recentemente discutida é a ação protetora contra o câncer e doenças cardiovasculares, devido à ação antioxidante. Entretanto, ainda existem controvérsias sobre este assunto.

Além do valor nutricional e possível ação preventiva a algumas doenças, os carotenos são corantes naturais responsáveis pelas cores amarelo, laranja e vermelho. Estes compostos são sensíveis à luz, à temperatura e à acidez em decorrência da presença de insaturações em sua molécula e são insolúveis em água e solúveis em acetona, álcool e clorofórmio (Ambrosio *et al.*, 2006).

Ao longo dos anos, estudos foram feitos para avaliar o efeito do processamento de cenouras no teor de  $\beta$ -caroteno. Lin *et al.* (1998) concluíram que a etapa de branqueamento não interfere na concentração deste componente e que, quando uma comparação é feita entre secagem em ar quente, microondas e liofilização, a secagem por ar quente ocasiona maior degradação de  $\beta$ -caroteno e a liofilização não causa efeito significativo na sua concentração.

A secagem intermitente de cenouras em leite vibro-fluidizado, ou seja, secagem até o ponto crítico de umidade seguida de um período de temperamento a temperatura ambiente, para posterior continuidade do processo, foi realizada por Pan *et al.* (1999). Eles observaram que este tipo de secagem reduziu a degradação de  $\beta$ -caroteno, quando comparada à secagem contínua. Já Prakash *et al.* (2004) compararam a degradação do  $\beta$ -caroteno em cenouras para a secagem ao sol, em leite fluidizado e em microondas. Eles observaram grande perda de nutriente durante a secagem de cenouras ao sol, o que pode ser atribuído ao longo tempo de secagem e exposição à luz, induzindo a oxidação desse nutriente. Para Hiranvarachat *et al.* (2008), a quantidade de  $\beta$ -caroteno na secagem por convecção forçada pouco depende da temperatura utilizada e diminui continuamente com a quantidade de umidade.

## **2.2 Secagem**

### **2.2.1 Secagem de hortaliças**

A retirada de água da matriz sólida é uma parte integrante do processamento de uma grande variedade de alimentos. Dentre os principais objetivos dessa desidratação estão o prolongamento da vida de prateleira, a diminuição de custos de manuseio e preparo para processamentos futuros. O prolongamento da vida de prateleira deve-se à diminuição da atividade de água, o que resulta em menor susceptibilidade a ação de microorganismos e inibição da deterioração química, uma vez que várias enzimas que causam mudanças químicas indesejáveis em alimentos são inativadas diante da escassez de água.

A diminuição dos custos de manuseio deve-se ao fato de que, após a secagem, os alimentos terão menor volume e menor peso o que acarreta maior facilidade de transporte e armazenamento e dispensa da necessidade de armazená-los sob refrigeração.

Contudo, a secagem de alimentos não apresenta apenas vantagens. Durante o processo podem ocorrer mudanças na cor, textura e valor nutricional dos alimentos. Segundo Hiranvarachat *et al.* (2008), a secagem por ar quente é a mais utilizada na indústria de alimentos, embora este método acarrete considerável degradação da qualidade nutricional dos produtos. Esta constatação é um contraponto, levando-se em consideração que a exigência dos consumidores por produtos que apresentam características próximas às suas características originais é crescente.

Portanto, a fim de aumentar a qualidade dos alimentos desidratados, é importante o estudo e desenvolvimento de processos que aperfeiçoem a qualidade de vegetais e frutas secas.

### **2.2.2 Processo de secagem**

A secagem pode ser definida como o processo de remoção de substâncias voláteis (umidade) através do uso de energia térmica, para se obter um produto sólido (Keey, 1975).

Quando um sólido úmido é submetido ao processo de secagem, geralmente ocorrem simultaneamente fenômenos de transferência de calor e de massa, que podem ser divididos em dois mecanismos (Mujumdar e Menon, 1995). O primeiro é a transferência de

calor do ambiente para o sólido, causando evaporação da umidade superficial, enquanto o segundo é a migração da umidade do interior do sólido para a superfície e sua posterior evaporação devido ao primeiro mecanismo.

A transferência de calor do meio externo para o material a ser seco pode ocorrer por condução, convecção ou radiação e em alguns casos por uma combinação desses três modos. Na maioria das vezes é feita primeiramente para a superfície do material e daí por condução até o seu interior. Mas quando ocorre uso da energia de microondas, por exemplo, ocorre a geração de calor no interior do material e este é transferido para a superfície externa (Mujumdar e Menon, 1995).

O fenômeno de transferência de umidade no interior do material pode ocorrer por diferentes mecanismos de transporte de vapor de água e de transporte de água líquida.

De acordo com Keey (1975), em materiais porosos ocorre, no início da secagem quando os poros ainda estão cheios, a difusão de água líquida devido ao gradiente de concentração. Com o avanço da secagem, bolsas de ar ocupam o lugar da umidade retirada e tem início o escoamento de água líquida ao longo das paredes dos capilares, chamado de escoamento capilar, e a migração por evaporação/condensação. Por fim, quando os poros estão vazios ocorre difusão de vapor.

- **Cinética de secagem**

A cinética de secagem é a relação entre o teor de umidade do material e o tempo. Ela é freqüentemente utilizada para descrever os mecanismos macro e microscópicos de transferência de calor e massa envolvidos no processo de secagem.

Segundo a teoria clássica da secagem, a curva de cinética de secagem de um material pode ser dividida em dois períodos diferentes denominados de período de taxa de secagem constante e período de taxa de secagem decrescente, sendo que o período de taxa decrescente pode ainda ser subdividido em dois ou mais períodos distintos.

No período de taxa constante, a temperatura do material permanece à temperatura de bulbo úmido e à pressão parcial de vapor da umidade. Na superfície do material, esta é igual à pressão de saturação do gás secante. Acontece então a vaporização a partir da superfície. Sendo assim, a taxa de secagem é controlada pela difusão do vapor de água através do filme de ar que envolve o material. Ao final do período de taxa constante, a umidade necessita ser transportada do interior da matriz sólida para a superfície por forças capilares. O término deste período é alcançado quando a migração interna de água não

conseguir mais suprir a taxa de evaporação da água livre da superfície, sendo o valor de umidade neste ponto denominado de umidade crítica. O valor da umidade crítica é característico de cada material e de fatores que determinam o comportamento da transferência de umidade como: a forma e área superficial da amostra, temperatura, velocidade e umidade relativa do ar de secagem.

Caso ocorra o avanço da secagem a partir desse ponto, inicia-se o período de taxa de secagem decrescente. Nele, a taxa de secagem passa a ser controlada pela velocidade em que a umidade movimenta-se através do sólido por gradiente de concentração. A transferência de energia agora será do ar para a superfície e desta superfície, por condução, ao interior do material. Como a condutividade térmica do material seco é relativamente baixa, a taxa de secagem é crescentemente influenciada pela taxa de condução de calor. Entretanto, para produtos com alta densidade e pequeno volume de vazios, a resistência à difusão interna exerce maior influência na taxa de secagem do que a taxa de condução de calor. A taxa de secagem diminui cada vez mais rápido até que a umidade de equilíbrio seja atingida (Mujumdar, 2006).

A maioria dos alimentos apresenta curvas de secagem com o período de taxa constante muito curto ou até mesmo inexistente. Neste caso, o movimento de umidade é lento e ocorre, provavelmente, pela difusão de líquido através da estrutura do sólido, terminando em valores elevados do teor crítico de umidade.

No processo de secagem de cenoura, a difusão é geralmente aceita como o principal mecanismo de transporte de umidade para a superfície de evaporação (Doymaz, 2004 e Prakash *et al.*, 2004). Esta hipótese pode ser comprovada pelos resultados obtidos por diversos autores para a secagem de cenoura em diferentes secadores. Kopany *et al.* (1993) encontraram pouca dependência entre a taxa de secagem e a pressão aplicada, na secagem de cenouras a vácuo. Pinedo (2003) também estudou a secagem de cenouras a vácuo e segundo ele, para este modo, a secagem de cenoura ocorre principalmente no período de taxa decrescente. Predominância do período de taxa de secagem decrescente também foi encontrada para a secagem de cenoura em forno microondas associado à convecção forçada por Prabhanjan *et al.* (1995), secagem de cenoura ao sol, em microondas e leiteo fluidizado por Prakash *et al.* (2004) e em microondas por Wang e Xi (2005).

Em estudos da secagem de cenoura em leiteo fixo, fluidizado e vibro-fluidizado, Sato (2004) observou que a velocidade do ar, para a secagem em leiteo fixo, e a vibração, para a secagem em leiteo vibro-fluidizado, exerceram pouca ou nenhuma influência sobre taxa de

secagem deste vegetal. Estes resultados evidenciam que mecanismos internos controlam a transferência de massa entre a cenoura e o meio externo.

Este comportamento da cenoura durante a secagem pode ser explicado pelo fato de que, mesmo contendo apreciável quantidade de água, a água presente neste vegetal tem estreita ligação com a polpa do alimento (Evangelista, 1992).

### **2.2.3 Secagem em microondas**

Quando o aquecimento é feito por ondas eletromagnéticas, os termos microondas e aquecimento dielétrico se confundem. O termo aquecimento dielétrico é aplicado para a utilização de ondas eletromagnéticas de todas as frequências e comprimentos. No entanto, o aquecimento é classificado como sendo por microondas quando são utilizadas ondas eletromagnéticas com frequência entre 300 MHz e 300 GHz e comprimento de onda na faixa de  $10^{-3}$  a  $10^0$  m. Já o aquecimento é dito dielétrico quando são utilizadas ondas eletromagnéticas com frequência entre 1 e 100 MHz e comprimento de até vários metros (Schiffmann, 1995).

Na secagem por microondas, o principal mecanismo de aquecimento envolvido é a rotação das moléculas polares, também chamado de aquecimento por rotação dipolar. Neste processo, a orientação randômica de moléculas polares é desfeita com a incidência do campo elétrico. Quando este campo elétrico diminui, as moléculas retomam a orientação original. Mas logo são perturbadas novamente em sentido contrário ao anterior com a incidência do campo elétrico de polaridade inversa. Esta alternância da polaridade do campo elétrico leva ao alinhamento e desalinhamento de dipolos milhões de vezes por segundo. Com isso, a energia do campo elétrico é convertida em energia potencial e posteriormente em energia térmica no material.

A interação entre as ondas eletromagnéticas e os materiais depende das propriedades dielétricas dos mesmos e estas por sua vez dependem da potência do campo aplicado, da composição e da estrutura do material (Pereira, 2007). Dentre os vários fatores que determinam as propriedades dielétricas dos materiais destaca-se a constante dielétrica ( $\epsilon'$ ). Ela determina a capacidade do material de armazenar energia elétrica por unidade de volume. Para alimentos, a quantidade de água é fator determinante no valor da constante dielétrica, uma vez que a água tem alta constante dielétrica, aproximadamente 78 à temperatura ambiente, enquanto que este valor em outros materiais está em torno de 2

(Schiffmann, 1995). A densidade do material, sua porosidade e volume dos poros também têm influência negativa na sua constante dielétrica, uma vez que o ar tem constante dielétrica igual a 1, sendo transparente às ondas eletromagnéticas.

Outra característica que também se associa a interação entre ondas eletromagnéticas e o material é a profundidade de penetração da onda ( $\delta_p$ ). Ela é definida como a distância em que a disponibilidade de microondas é diminuída a 37% da potência aplicada (Souraki *et al.*, 2009). A profundidade de penetração se relaciona com as propriedades dielétricas do material e com o comprimento de onda no vácuo ( $\lambda_0$ ) pela seguinte equação:

$$\delta_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{2}}{2\pi} \left[ \varepsilon' \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (2.1)$$

onde:

$\lambda_0$  - comprimento de onda no vácuo;

$\varepsilon'$  - constante dielétrica relativa;

$\varepsilon''$  - é o fator de perdas relativo.

Segundo Souraki *et al.* (2009) este efeito de redução de potência pode ser considerado desprezível caso a espessura ou raio da amostra seja muito menor que a profundidade de penetração de onda. Estes autores utilizando a equação 2.1 estimaram o valor desta profundidade de penetração, com frequência igual a 2450 MHz, para cenoura com diferentes teores de umidade e em diferentes temperaturas. O valor mais alto encontrado foi de 16,35 mm, para umidade igual a 90% (b.u.) e 20°C de temperatura. O valor mais baixo foi de 14,11 mm para umidade de 10% (b.u.) e temperatura igual a 80°C.

Devido ao seu mecanismo peculiar de aquecimento, a secagem em microondas é consideravelmente diferente da secagem por meios convencionais. Na secagem convencional, o transporte de umidade através do material é controlado pela velocidade de difusão da água até a superfície, impulsionada pelo gradiente de concentração entre o interior úmido e a superfície seca. E, a diferença de temperatura entre a superfície aquecida e o interior frio é o que impulsiona a transferência de energia entre a superfície e o interior do material. Este mecanismo, geralmente, implica em um processo lento de transferência de calor e massa e requer altas temperaturas externas.

Através da geração de calor interno, com a utilização de microondas, a transferência de massa ocorre devido à diferença de pressão estabelecida como consequência da rápida geração de vapor no interior do material. A maior parte da umidade é evaporada antes de deixar o material. Existe então uma espécie de bombeamento que força o líquido para a superfície na forma de vapor. Isto leva a uma secagem rápida sem que seja necessário superaquecimento da atmosfera e diminui o risco de superaquecimento do material.

Mujumdar e Menon (1995) listaram uma série de vantagens do uso da energia de microondas em processos de aquecimento e de secagem. Entre elas estão o aquecimento uniforme do material, a eficiência na conversão de energia e o aumento na qualidade do produto final, pois o superaquecimento e endurecimento da superfície podem ser evitados. Conjuntamente a essas características têm-se o menor tempo e espaço requerido e controle mais rápido e fácil do processo. Contudo, Wang e Xi (2005) ressaltaram que a secagem de alimentos em microondas pode ocasionar produtos de baixa qualidade quando feito de maneira inadequada.

Alguns estudos a respeito do aquecimento através de microondas relatam que a distribuição do aquecimento por microondas está relacionada com a geometria do material. Formas cilíndricas e esféricas, quando submetidas à ação de microondas, apresentam maior densidade volumétrica de potência absorvida, o que gera aquecimento maior no centro e na superfície, ao passo que para a forma de cubo a energia se concentra nos cantos e o centro representa um ponto frio (Yang e Gunasekaran, 2004; Ryyänen *et al.*, 2004; Campanone e Zaritzky, 2005).

A secagem em microondas tem ocorrido em associação com outras formas como, por exemplo, o vácuo ou a convecção forçada. Fumagali (2003) realizou experimentos comparativos para secagem de peras somente por microondas, somente por convecção e com os dois métodos associados e, encontrou que o modo combinado apresentou maiores taxas de secagem. Durante a secagem de cenouras, Prabhanjan *et al.* (1995) concluíram que a associação da convecção forçada a microondas acelerou ainda mais o processo, mas que em altas potências a temperatura do ar não exerce influência no tempo de secagem.

Para Lin *et al.* (1998), a secagem em microondas a vácuo combina a rápida transferência de energia das ondas eletromagnéticas às vantagens da transferência de massa sob vácuo, como a baixa temperatura e rapidez. Estes autores compararam a secagem de cenouras em microondas a vácuo com a secagem ao sol e a liofilização e concluíram que em alguns aspectos como sabor e textura a secagem em microondas a vácuo foi melhor do que a liofilização.

## 2.2.4 Modelos da cinética de secagem

Um modelo matemático que descreve a cinética de secagem é normalmente baseado nos mecanismos físicos de transferência de calor e massa no interior do material, nas condições externas de transferência de calor para o material, que controlam a resistência ao processo, e, também, nas considerações estruturais e termodinâmicas.

A modelagem do processo de secagem complica-se pelo fato de que mais de um mecanismo é responsável pela taxa total de transferência de massa e as contribuições dos diferentes mecanismos, geralmente, não são constantes durante todo o processo de secagem (Cui *et al.*, 2004). Alguns pesquisadores preferem tratar o problema utilizando equações semi-empíricas, geralmente derivadas do modelo difusivo, ou que possuam analogia com outros fenômenos (Barrozo, 1995).

Um importante modelo utilizado para a descrição da cinética de secagem em alimentos é o modelo exponencial proposto por Lewis (1921). Este modelo é uma analogia a lei de Newton do resfriamento e estabelece uma proporcionalidade entre a taxa de secagem e o teor de água disponível para a secagem no material. Ele é representado pela equação

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_{eq}) \quad (2.2)$$

onde:

$k$  – constante de secagem;

$X$  – umidade média do material no tempo  $t$ ;

$X_{eq}$  – umidade média do material no equilíbrio.

Integrando a equação 2.2 tem-se a equação

$$\left( \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right) = \exp(-kt) \quad (2.3)$$

onde  $X_0$  é a umidade média inicial do material.

Segundo Prakash *et al.* (2004) a equação proposta por Lewis representou bem a secagem de cenoura em leito fluidizado e em microondas, mas não foi obtido sucesso para a descrição da secagem de cenoura ao sol.



Duas importantes modificações da forma integrada do modelo de Lewis que apresentam a incorporação de parâmetros para melhor ajuste experimental são representadas pelas equações

$$\left( \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right) = a \exp(-kt) \quad (2.4)$$

$$\left( \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right) = \exp(-kt^n) \quad (2.5)$$

onde  $a$  e  $n$  são parâmetros dos modelos a serem determinados.

A equação 2.4, proposta por Brooker *et al.* (1974), é similar a solução do modelo difusivo de Fick para tempos de secagem longos, quando apenas o primeiro termo da solução da série é significativo. Esta correlação já foi utilizada por alguns pesquisadores para a determinação da difusividade efetiva a partir da constante de secagem para vegetais como nos trabalhos de Vaccarezza *et al.* (1974), para a raiz de beterraba açucareira, Yusheng e Poulsen (1988), para batata e Mazza e Lemaguer (1980) para cebola.

A equação 2.5 foi proposta por Page (1949 apud Barrozo, 1995) para que este descrevesse melhor a secagem de milho. Ela é frequentemente utilizada nos estudos de secagem de produtos agrícolas por apresentar excelentes resultados.

Segundo Pereira (2007) a equação proposta por Page (1949) tem apresentado bons ajustes para os dados experimentais de secagem de alimentos em microondas.

O Quadro 2.3 apresenta algumas das equações semi-empíricas de secagem mais utilizadas para produtos vegetais.

O modelo de Page Modificado, assim como o modelo de Page, é oriundo da equação de Lewis e foi proposto por Overhults *et al.* (1973). O modelo de duas exponenciais já foi utilizado por alguns autores para descrever a cinética de secagem de produtos alimentícios principalmente no final da secagem. Entre eles estão Dandamrongrak *et al.* (2002) e Lahsasni *et al.* (2004). Nesta equação  $k_1$  e  $k_2$  são constantes de secagem e  $X_1$  e  $X_2$  teores de umidade média do material associados a cada uma delas.

Quadro 2.1: Equações semi-empíricas de secagem.

Modelo	Equação
Page Modificado	$\left( \frac{\bar{X} - X_{eq}}{\bar{X}_0 - X_{eq}} \right) = \exp(-(kt)^n) \quad (2.6)$
Duas exponenciais	$\bar{X} = X_1 \exp(-k_1 t) + X_2 \exp(-k_2 t) \quad (2.7)$
Logarítmica	$\left( \frac{\bar{X} - X_{eq}}{\bar{X}_0 - X_{eq}} \right) = a \exp(-kt) + d \quad (2.8)$

## 2.3 Caracterização física

### 2.3.1 Isotermas de sorção

Uma isoterma de sorção é a curva que mostra a umidade de equilíbrio presente no material em função da umidade relativa do ar, quando a temperatura permanece constante (Fortes e Okos, 1980). A obtenção experimental de isotermas de sorção é uma forma de determinar a umidade de equilíbrio dos materiais em condições específicas e as suas características higroscópicas. A atividade de água ( $a_w$ ) ou fração de saturação é mais usada em lugar da umidade relativa, sendo definida pela seguinte equação:

$$a_w = \frac{P_w}{P_w^0} \quad (2.9)$$

onde:

$P_w$  - a pressão parcial de vapor e

$P_w^0$  - pressão de saturação a temperatura utilizada.

A umidade de equilíbrio de um material é atingida quando a pressão de vapor da água presente no mesmo é igual à pressão parcial de vapor no ambiente (Mujumdar e Menon, 1995) e corresponde ao líquido capilar, ou seja, a água que fica retida nos interstícios de um material poroso. Esta umidade será a mínima possível de ser atingida, teoricamente, quando submetido a condições específicas. O conhecimento desta característica do material é

de fundamental importância, uma vez que informa até que ponto é possível desidratá-lo e em quais condições deve ser armazenado depois de seco.

As isotermas de sorção podem ser de adsorção ou de dessorção. Na primeira, o material completamente seco é submetido a atmosferas com crescente atividade de água de modo que absorva umidade. Na segunda, é utilizado material úmido e atmosferas com atividade de água decrescentes de modo que haja perda de umidade. Em ambas, a massa do material é acompanhada até que fique constante, o que indica a condição de equilíbrio.

A umidade de equilíbrio de um material pode variar se o mesmo está sendo umedecido (adsorção) ou desidratado (dessorção). Uma pequena diferença é encontrada em quase todos os materiais higroscópicos (Mujumdar e Menon, 1995). Esta diferença ou deslocamento existente entre as curvas de dessorção e adsorção é chamada de histerese (Fortes e Okos, 1980). Algumas teorias explicam o fenômeno de histerese, mas não foi encontrada uma explicação definitiva para tal fenômeno. A Figura 2.2 representa este fenômeno.

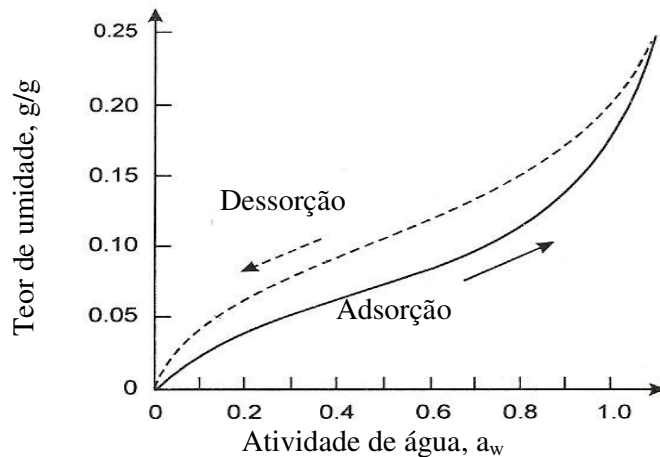


Figura 2.2: Representação esquemática do fenômeno de histerese na sorção de umidade. Adaptado de Kaminski e Kudra (2000).

Uma hipótese sugere que os fenômenos de condensação e evaporação nos interstícios da matriz sólida não sejam reversíveis. Durante o processo de dessorção os capilares estão cheios e suas paredes completamente úmidas. Por outro lado, durante a adsorção, à medida que o material se torna úmido, as paredes dos capilares são cobertas por uma camada de vapor liquefeito. Mas um menisco não é formado até que as camadas adsorvidas estejam próximas o suficiente para se tocarem e bloquearem os poros na sua seção mais estreita. Então, para uma mesma umidade relativa, a umidade de equilíbrio durante a dessorção será maior do que durante a adsorção (Keey, 1992).

Além de implicações teóricas a respeito da irreversibilidade do processo de sorção e da validade das funções termodinâmicas para este sistema, a histerese também tem implicações práticas. Entre elas estão os efeitos da histerese na deterioração química e microbiológica de alimentos e produtos biológicos durante o processamento térmico e armazenamento (Kaminski e Kudra, 2000).

As isotermas são geralmente divididas em três regiões. A primeira é aquela para  $a_w$  abaixo de 0,2. Nesta região a curva é côncava para  $a_w$  e a água adsorvida representa a primeira camada de vapor de água na superfície do material. As moléculas de água são adsorvidas pelas moléculas polares e com o aumento da umidade serão adsorvidas por moléculas maiores como proteínas e polissacarídeos. Mas ainda não é iniciado o processo de dissolução e a água não está disponível para reações. A segunda região está situada entre  $a_w$  igual a 0,2 e pouco maior que 0,7. Ela é caracterizada pela adsorção polimolecular. Nesta região, a curva tem desenho crescente o que é atribuído à condensação, estando a água disponível para reações químicas e bioquímicas. Na terceira região, quando os valores de  $a_w$  são mais altos, a água se deposita em sucessivas camadas e preenche os poros da estrutura do material.

Materiais biológicos geralmente apresentam curvas de isoterma com forma sigmóide. Mas existem variações entre isotermas de materiais com propriedades higroscópicas distintas. A Figura 2.3 evidencia esta diferença. Nela estão esquematizadas as isotermas de Agar, que é um material altamente higroscópico, e de celulose micro cristalina que é insolúvel e tem capacidade de absorção de água relativamente pequena.

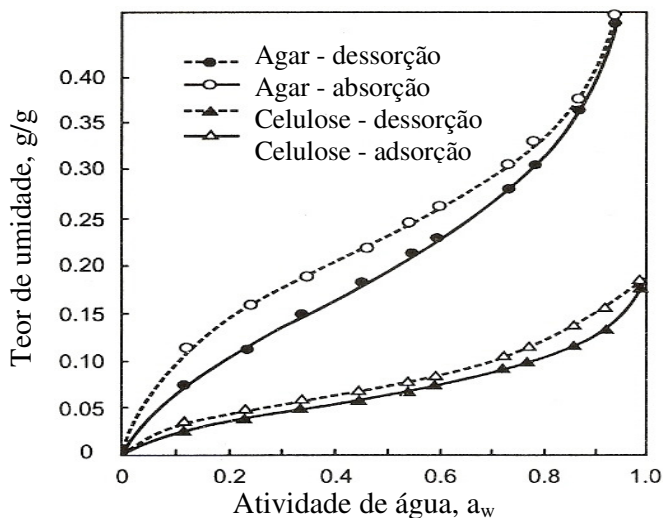


Figura 2.3: Isotermas de adsorção e dessorção para celulose micro-cristalina e Agar a 25 °C. Adaptado de Kaminski e Kudra (2000).

As isotermas de sorção também sofrem influência da temperatura. As forças de ligação diminuem com o aumento da temperatura (Mujumdar e Menon, 1995), o que aumenta a mobilidade das moléculas de água. Isto é, para uma mesma  $a_w$ , caso haja aumento da temperatura, a quantidade de água adsorvida será menor (Kaminski e Kudra, 2000). Exceção existe para açúcares e moléculas de pequeno peso molecular que se tornam mais higroscópicas em maiores temperaturas devido ao aumento de sua solubilidade em água (Kaminski e Kudra, 2000).

Diversas equações já foram propostas para estimar a umidade de equilíbrio de materiais biológicos. Entre elas destaca-se o modelo de Brunauer, Emmet e Teller (BET), que se limita a faixa de  $a_w$  de 0,3 a 0,5, sendo descrito pela seguinte equação:

$$\frac{X}{X_m} = \frac{Ca_w}{(1-a_w)(1-a_w+Ca_w)} \quad (2.10)$$

onde:

$X_m$  – teor de umidade corresponde à monocamada de água (kg/kg)

$C$  – constante a ser determinada.

O modelo de BET foi modificado sendo obtido o modelo de Guggenheim-Anderson-Boer (GAB), que pode ser bem aplicado para qualquer  $a_w$  abaixo de 0,9. Este modelo é descrito segundo a equação

$$\frac{X}{X_m} = \frac{Ck_{GAB}a_w}{(1-ka_w)(1-ka_w+Cka_w)} \quad (2.11)$$

onde:

$k_{GAB}$  – constante a ser determinada.

O Quadro 2.2 apresenta mais duas das principais equações de isotermas utilizadas para materiais biológicos.

Quadro 2.2: Equações para umidade de equilíbrio de materiais biológicos.

Modelo	Equação
Oswim (1946)	$X = M \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^N \quad (2.12)$
Hasley modificada	$X = \left[ \frac{-\exp(aT_s + c)}{\ln(a_w)} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (2.13)$

Na literatura, poucos dados foram encontrados a respeito das isotermas de dessorção de cenouras. Costa *et al.* (2003) determinaram a isoterma de adsorção para pó de cenoura a 25°C e verificaram que este material apresenta alta higroscopicidade e que os dados experimentais tiveram bom ajuste ao modelo de GAB. Já Singh *et al.* (2006) estudaram a influência da desidratação osmótica nas isotermas de adsorção da cenoura nas temperaturas de 10°C, 25°C, 40°C e 50°C. Segundo eles o modelo modificado de Hasley é mais adequado para descrever o processo de sorção para cenouras tratadas osmoticamente em solução de açúcar, enquanto que o modelo exponencial modificado deve ser utilizado quando tratamento osmótico for feito em sais.

### 2.3.2 Propriedades estruturais

As propriedades estruturais dos alimentos tais como densidade aparente, densidade real e porosidade são significativamente afetadas pelo método de secagem e condições utilizadas. O conhecimento dessas propriedades e de como o processo de secagem as influencia é importante, uma vez que elas são responsáveis pela caracterização e qualidade do produto obtido. Outro fator relevante é que as características estruturais dos materiais influenciam as propriedades de transporte de umidade e de energia do mesmo.

O conhecimento do efeito do método de secagem sobre as propriedades estruturais dos alimentos é necessário para o desenvolvimento de novos produtos com a qualidade desejada. Através deste conhecimento é possível, por exemplo, controlar a porosidade e a densidade do produto obtido e desenvolver um processo de secagem flexível que possa resultar em produtos com propriedades estruturais de acordo com o uso a que se destinam (Krokida e Maroulis, 2000).

- **Densidade aparente**

De acordo com Zogzas *et al.* (1994), a densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ), também chamada de densidade “bulk”, é definida considerando-se a massa e volume total, incluindo os espaços vazios, da amostra de acordo com a equação:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_t} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w + V_a} \quad (2.14)$$

onde,  $m$  é massa e  $V$  é o volume e os subscritos  $t$ ,  $s$ ,  $w$  e  $a$  são relativos ao volume total, à matriz sólida, à água e ao ar, respectivamente.

Estes mesmos autores observaram a variação da densidade aparente de maçã, cenoura e batata durante a secagem e verificaram que esta propriedade não foi dependente nem da temperatura e nem da umidade relativa do ar de secagem, quando estes vegetais são secos por convecção forçada. Além disso, observaram que para batata e cenoura, à medida que ocorre redução no teor de umidade, observa-se também o aumento da densidade aparente. No entanto, para maçã foi observado comportamento inverso.

Lin *et al.* (1998) relataram que, quando seca em microondas a vácuo, a cenoura apresenta densidade aparente intermediária entre aquelas submetidas à secagem por convecção forçada e a liofilização. Sendo a cenoura liofilizada a de menor densidade aparente. Krokida e Maroulis (1997) observaram as propriedades estruturais para alguns vegetais durante a secagem em microondas, liofilização, convecção forçada e desidratação osmótica e concluíram que a densidade aparente é a mais afetada pelo método de secagem. Para eles a cenoura seca em microondas apresentou densidade aparente menor do que cenoura seca em estufa a vácuo. Em outro trabalho, Krokida e Maroulis (1999) observaram que a secagem em microondas a vácuo produziu cenoura com menor densidade aparente do que a secagem em somente microondas.

- **Densidade real**

A densidade real ( $\rho_r$ ), também chamada de densidade da partícula, é a razão entre a massa e o volume da amostra excluindo-se o volume dos poros (Zogzas *et al.*, 1994), de acordo com a equação

$$\rho_r = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w} \quad (2.15)$$

Zogzas *et al.* (1994) relataram o aumento da densidade real de cenoura e batata para a secagem por convecção forçada. Krokida e Maroulis (1997) também observaram aumento da densidade da partícula com a redução de umidade para a secagem em convecção forçada em microondas, desidratação osmótica e liofilização. Segundo Krokida e Maroulis (1997), a densidade real é um valor intermediário entre a densidade da água e do sólido seco.

- **Porosidade**

A porosidade ( $\varepsilon$ ) é a porção de espaços vazios em relação ao volume total do material. Ela é calculada a partir da densidade aparente e da densidade real, sendo fortemente afetada pelo teor de umidade, método e condições de secagem (Krokida e Maroulis, 2000). Segundo Krokida e Maroulis (1997), a escolha do método de secagem é uma forma de se atingir a porosidade desejada.

A porosidade do material seco estará diretamente relacionada ao encolhimento sofrido por este material durante o processo de secagem. Além do que, esta propriedade estrutural influenciará as características de reidratação do produto. A porosidade pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_r} \quad (2.16)$$

Zogzas *et al.* (1994) observaram a variação da densidade de maçã, batata e cenoura com a secagem convectiva e propuseram uma seqüência de equações para a determinação do coeficiente de encolhimento volumétrico, densidade e porosidade. Em seu trabalho, Krokida e Maroulis (1997) verificaram que a secagem por convecção forçada resulta em produto com porosidade mais baixa e a liofilização em produto com maior porosidade. Quando uma comparação é feita entre a secagem em microondas e microondas a vácuo e a secagem por ar quente, o material seco pelos dois primeiros modos apresenta maior porosidade (Krokida e Maroulis, 1999).



- **Encolhimento**

Durante a desidratação, alimentos geralmente apresentam uma importante redução no volume. A perda de água e o aquecimento, durante a secagem, induzem a um “stress” na estrutura celular do alimento o que modifica a sua microestrutura e causa encolhimento.

A estrutura da material seco é fortemente dependente da natureza do material e também do processo de secagem utilizado (Krokida e Maroulis, 1997). Um processo lento de secagem leva a um encolhimento mais uniforme, porém mais pronunciado, enquanto que uma secagem muito rápida pode resultar em um encolhimento menor. Mas rachaduras e fissuras podem surgir na estrutura do material em decorrência da tensão permanente que preserva as dimensões do material, sendo estabelecida durante a secagem rápida.

Quando a redução no volume do material durante a secagem é proporcional à perda de água, o encolhimento é chamado ideal. Por outro lado, se a redução do volume é menor que o da água retirada, o encolhimento é chamado de não-ideal e o processo de secagem gera aumento na porosidade do material (Madiouli *et al.*, 2007). O encolhimento igual ao volume de água removido também pode ser chamado de encolhimento total.

Este encolhimento (S) pode ser avaliado pela razão entre o volume do material (V) ao longo da secagem e o seu volume antes dela iniciar ( $V_0$ ). Madiouli *et al.* (2007) definiram esta razão como sendo o coeficiente de encolhimento dado pela equação:

$$S = \frac{V}{V_0} \quad (2.17)$$

Lozano *et al.* (1983) analisaram o encolhimento de frutas e, segundo eles, a redução do volume das frutas sofrida durante a secagem é uma função da umidade perdida durante o processo. Eles modelaram a mudança no coeficiente de encolhimento como uma função linear da umidade presente no alimento ( $X/X_0$ ) da seguinte forma:

$$S = E \frac{X}{X_0} + B \quad (2.18)$$

onde B e E são parâmetros do modelo a serem determinados.

Krokida e Maroulis (1997) estudaram o encolhimento de alguns vegetais, dentre eles a cenoura, para a secagem em diversos secadores. Para eles o encolhimento foi

mais intenso para a secagem por ar quente e menos intenso para a secagem em microondas, seguida da secagem em estufa a vácuo. Nos produtos liofilizados praticamente não foi detectado encolhimento.

Pinedo (2003) ajustou os dados experimentais da secagem de cenoura e abóbora ao modelo uniforme proposto por Suzuki *et al.* (1976). Este modelo considera o encolhimento ideal, quando a redução do volume é igual ao volume de água removida. Os dados experimentais se ajustaram bem ao modelo testado. Comportamento linear do volume em função do teor de umidade, ou seja, encolhimento ideal foi observado por Zogzas *et al.* (1994) para a secagem de cenouras por convecção forçada. O mesmo comportamento foi encontrado para o encolhimento sofrido por cenoura, quando esta foi submetida à secagem em estufa a vácuo por Kompany *et al.* (1993) e à secagem por infravermelho por Mihoubi *et al.* (2009).

## 2.4 Reidratação

A reidratação é um processo complexo no qual água é absorvida pelo material seco com o intuito de restaurar as mesmas características que o material possuía antes da sua secagem. Neste processo a água é absorvida pelo tecido vegetal, mas, ao mesmo tempo, observa-se uma saída de componentes solúveis de matéria seca. Krokida e Marinos-Kouris (2003) dividiram a reidratação em três processos distintos que são a embebição do material em água, seguida do intumescimento dos materiais hidrofílicos e a lixiviação dos sólidos solúveis.

As propriedades de reidratação de alimentos desidratados são de crucial importância (Nijhuis *et al.*, 1998), uma vez que a maioria dos produtos desidratados é geralmente reidratada durante a sua utilização (Krokida e Marinos-Kouris, 2003).

Teoricamente, a reidratação é o processo inverso ao processo de secagem, mas na realidade o produto seco não está apto para absorver toda a água que foi retirada no processo de secagem (Stępień, 2008). Este fenômeno se explica já que o processo de secagem pode causar danos na estrutura do material como a destruição da estrutura celular e encolhimento dos capilares que impossibilitam a reidratação completa.

Diante desta informação, as características de reidratação podem ser utilizadas como uma medida da extensão dos danos causados à estrutura do material, pelos processos de secagem e pelos tratamentos que os antecederam (Lewicki, 1998).

Vários são os fatores que podem afetar a qualidade dos alimentos desidratados durante a reidratação. Podem-se citar o período de tempo de imersão, a temperatura da água e a razão entre a quantidade de água utilizada e a de produto. Pequenas quantidades de água diminuem a razão de absorção, em consequência da menor área superficial de contato, e o excesso aumenta as perdas de nutrientes solúveis. Elevadas temperaturas da água aumentam a razão de absorção, reduzindo o tempo total necessário para ela ocorrer (Meloni, 2003).

Apesar disso os experimentos de reidratação não são padronizados. Assim como os resultados desses experimentos são expressos de diferentes maneiras. Segundo Lewicki (1998) é interessante que a forma de expressar os resultados da reidratação seja padronizada. Para isso, propôs que a reidratação fosse expressa por três índices de modo que o processo fosse completamente caracterizado. Os índices propostos por ele foram a capacidade de absorção de água (WAC), a capacidade de retenção de matéria seca (DHC) e a capacidade de reidratação (RA).

O índice WAC informa a capacidade que o material seco tem de absorver água. Ele é calculado pela razão entre a massa de água absorvida, durante a reidratação, e a massa de água perdida, durante a secagem, pela equação:

$$WAC = \frac{m_r(100 - s_{rh}) - m_s(100 - s_s)}{m_o(100 - s_o) - m_s(100 - s_s)} \quad (2.19)$$

onde  $m$  é a massa da amostra (g),  $s$  é o teor de sólidos da amostra (%) e os subscritos 0, s e rh representam o material antes da secagem, o material seco e o reidratado, respectivamente. O valor da capacidade de absorção de água varia entre 0 e 1 e quanto maior o dano sofrido pela estrutura do material durante a secagem, maior será a perda da capacidade de absorver água e menor será este valor.

O DHC é uma medida da capacidade que o material tem de reter sólidos solúveis durante a reidratação e, portanto, mostra a extensão dos danos ao tecido e à sua permeabilidade aos solutos. Este índice é calculado da seguinte maneira:

$$DHC = \frac{m_{rh} \cdot s_{rh}}{m_s \cdot s_s} \quad (2.20)$$

Assim como o WAC, o DHC varia entre 0 e 1 e quanto maior o dano causado ao material menor será o seu valor.

Por fim, a capacidade de reidratação (RA), que é calculada a partir dos dois índices anteriores, informa sobre a capacidade do material seco reidratar-se e a extensão dos danos causados pelo processo de secagem e de reidratação no material. O índice RA é dado pelo produto dos dois índices anteriores:

$$RA = WAC \times DHC \quad (2.21)$$

Lin *et al.* (1998) analisaram a taxa e a razão de reidratação para cenoura seca por liofilização, em estufa a 70°C e em microondas a vácuo. A cenoura liofilizada apresentou maior valor de taxa e razão de reidratação. Stepień (2008) comparou a perda relativa de matéria seca durante a reidratação para cenoura submetida aos mesmos três métodos de secagem. Ele observou que o método de secagem não interferiu nesta característica.

Prakash *et al.* (2004) obteve a razão de reidratação para cenoura seca ao sol, em leito fluidizado, em três temperaturas diferentes, e microondas, a três potências diferentes. A secagem ao sol produziu cenoura com menor razão de reidratação e a secagem em leito fluidizado e em microondas resultou em razões de reidratação semelhantes. O aumento da potência e da temperatura de secagem influenciou positivamente nessa propriedade.

O efeito da temperatura da água utilizada para reidratação nas características do processo foi estudado Krokida e Marinos-Kouris (2003), para diferentes frutas e vegetais, dentre eles a cenoura. Segundo eles, a temperatura afeta positivamente a quantidade de água e a velocidade de reidratação.

Já Wang e Xi (2005) estudaram o efeito da espessura da cenoura seca em microondas na sua reidratação. Segundo eles, o aumento na espessura da amostra diminui a razão de reidratação.

A cinética de reidratação tem sido descrita por modelos teóricos e semi-empíricos. O Quadro 2.3 apresenta as equações mais frequentemente utilizadas para a descrição da reidratação de alimentos.

Quadro 2.3: Equações semi-empíricas para cinética de reidratação.

Modelo	Equação	Referência
Exponencial	$RR = RR_e - (RR_e - 1)\exp(-wt)$ (2.22)	Krokida e Marinos-Kouris (2003)
Peleg	$RR = \left( RR_e - \frac{1}{K_2} \right) + \frac{t}{K_1 + K_2 t}$ (2.23)	Peleg (1988)
Weibull	$RR = RR_e + (1 - RR_e) \exp\left[ -\frac{t}{\theta} \right]^\psi$ (2.24)	Machado <i>et. al.</i> (1999)

Na equação (2.22), modelo exponencial,  $w$  é um parâmetro do modelo a ser determinado. Krokida e Marinos-Kouris (2003) obtiveram bons resultados ao aplicarem este modelo na descrição do processo de reidratação de vegetais.

Na equação proposta por Peleg (1988), equação (2.23),  $K_1$  (h.g de matéria seca/g de água) é a constante cinética e  $K_2$  (g de matéria seca/g de água) é o parâmetro relacionado à máxima capacidade de reidratação. Para o modelo de Weibull, equação (2.24),  $\psi$  é o parâmetro de forma de Weibull (adimensional) e  $\theta$  é o parâmetro de escala. Este último modelo foi utilizado por Marabi *et al.* (2003) para descrever o processo de reidratação de cenoura.

Diante do exposto, verifica-se a importância de um estudo das características do processo de secagem de cenoura em microondas. É identificada a necessidade de relacionar diretamente as condições de secagem com as características físicas e nutricionais desse vegetal.

A literatura é rica em estudos que relacionam diferentes modos de secagem de cenouras à secagem em microondas. Porém, não há um estudo que reúna uma comparação do processo feito em microondas e em microondas a vácuo no tocante a velocidade de desidratação, às propriedades físicas e nutricionais e às características de reidratação.

É preciso, a partir desta comparação das características do processo de secagem de cenoura em microondas e em microondas a vácuo, estabelecer os efeitos da associação do vácuo a secagem por microondas e, além disso, analisar se esta associação oferece vantagens práticas ao processamento de cenouras.

### 3. Materiais e métodos

#### 3.1 Material

A cenoura (*Daucus carota L.*) foi escolhida como material de secagem por apresentar interesse industrial, ser de baixo custo e também ter boa disponibilidade.

A variedade de cenoura utilizada no trabalho foi adquirida no mercado da cidade de São Carlos-SP, com o cuidado de adquirir o material sempre do mesmo estabelecimento e, conseqüentemente, do mesmo fornecedor ou horta, tentando reduzir assim a sua variabilidade.

#### 3.2 Equipamentos

- **Secagem**

Para a secagem de cenouras foi utilizado forno de microondas laboratorial da marca Saírem S.A., modelo 0/600 W EL1098 com 600 W de potência e frequência de 2450 Hz. O mesmo forno foi adaptado para o modo de secagem microondas a vácuo. A adaptação foi feita pela inserção de um dessecador de vidro da marca Pirex. Uma bomba de vácuo com motor de potência 0,33 cv foi conectada ao dessecador como mostra a Figura 3.1.



Figura 3.1: Equipamento adaptado para a secagem em microondas a vácuo.

Além do forno de microondas, experimentos de secagem foram feitos em uma estufa com convecção forçada e em estufa a vácuo. A estufa com convecção forçada é do

modelo MA 037 da Marconi. A estufa a vácuo é da marca Shel Lab modelo 1410 com volume da câmara de secagem igual a  $6 \times 10^{-2} \text{ m}^3$  e duas bandejas separadas 6 cm uma da outra. O vácuo neste equipamento foi mantido por uma bomba de vácuo da marca IBAV modelo BRS4, acionada por um motor WEG de 0,33 cv de potência.

### 3.3 Procedimento experimental

As etapas de obtenção de cenoura seca compreenderam o preparo das amostras e a secagem propriamente dita. A caracterização do material foi feita após o preparo da amostra, durante e após a secagem. Amostras foram retiradas de tempos em tempos ao longo do processo para as medidas durante a secagem. Foram determinados o teor de caroteno, a umidade, as densidades aparente e real, o volume e a porosidade. Além das etapas de obtenção da cenoura seca, este item também trata do procedimento experimental para obtenção das isotermas de equilíbrio.

#### 3.3.1 Preparo das amostras

A etapa do preparo das amostras consistiu em lavagem, descascamento, corte e branqueamento. As etapas de lavagem, descascamento e corte foram feitas manualmente. A etapa de corte foi feita com o auxílio de uma lâmina fixada a uma base de acrílico. A distância entre a lâmina e a base era estabelecida de acordo com a espessura desejada. A cenoura era então fatiada longitudinalmente e a partir destas fatias eram obtidos os discos, através de um molde, e os palitos e cubos. As formas de corte utilizadas para comparação do efeito da forma de corte no processo de secagem foram as seguintes:

- discos de 4 e 8 mm de espessura e 25 mm de diâmetro;
- cubos de 8 mm de aresta e
- palito de dimensões 4x4x50 mm.

A escolha destas três formas foi concebida para verificar se a diferença de distribuição do aquecimento por microondas, relatada no Capítulo 2, causaria efeito na secagem de cenouras. A forma de disco foi escolhida como representante da forma cilíndrica, além de ser a forma mais facilmente obtida em uma operação industrial. A variação na espessura do disco foi utilizada para verificar, se esta exerce influência na secagem em

microondas. As formas de cubo e palito foram escolhidas como representantes da forma retangular, mas com diferentes áreas de exposição a microondas.

Alguns testes foram feitos com a cenoura ralada. Porém ela queimava-se com muita facilidade quando utilizada nesta forma. Por isso, o uso de cenoura ralada foi descartado. A Figura 3.2 ilustra as formas efetivamente utilizadas.



Figura 3.2: Formas de corte utilizadas.

O branqueamento por imersão em água quente foi realizado como forma de inativar enzimas deterioradoras e fixar a cor da cenoura. Além do que, cenouras branqueadas apresentam maior velocidade de secagem que aquelas “in natura” (Pinedo e Murr, 2005). O branqueamento foi realizado por imersão em água a temperatura de 70°C por 3 minutos. Após este processo, para evitar que houvesse cozimento, as cenouras foram resfriadas rapidamente em água corrente e o excesso de água retirado com papel absorvente.

### 3.3.2 Verificação da potência do equipamento

A calibração da potência fornecida pelo forno microondas é uma etapa importante na realização dos experimentos de secagem. Esta calibração foi feita por calorimetria.

Para tanto, mediu-se a variação da temperatura de uma massa conhecida de água submetida a diferentes potências entre 20 W e 400 W. A massa de água variou entre 95 e 160 g, de acordo com a potência utilizada, como forma de diminuir a variação da temperatura e evitar que houvesse perda de massa por evaporação. Esta faixa de potência foi escolhida por abranger as potências utilizadas no trabalho, de acordo com a massa de amostra e densidade de potências a serem utilizadas. Assumindo-se que toda a potência fornecida pelo forno microondas foi transformada em energia térmica na água, calculou-se a quantidade de energia fornecida para cada potência pela equação a seguir:

$$Q_{abs} = \frac{m c_p \Delta T}{t} \quad (3.1)$$



onde:

$Q_{\text{abs}}$  - energia absorvida pela amostra (cal/min);

m - massa (g);

$c_p$  - calor específico da água (cal/g°C);

$\Delta T$  - variação da temperatura (°C);

t - tempo (min).

A fim de verificar a reprodutibilidade da energia fornecida para cada potência foram feitas seis medidas da variação de temperatura.

### 3.3.3 Cinética de secagem

Os experimentos de secagem em microondas foram divididos em três fases. Na primeira fase foi feita uma análise dos efeitos da forma de corte, da espessura das amostras e da potência e do modo de secagem utilizado na cinética de secagem de cenouras. A segunda fase consistiu no acompanhamento da evolução da densidade aparente, densidade real, porosidade e encolhimento em função da umidade do material. E, por fim, a terceira fase foi a repetição da secagem para determinar os efeitos do processo no teor de  $\beta$ -caroteno e as características de reidratação do produto final.

Nos ensaios da primeira fase, a massa fixada para todos os experimentos foi de 40g e as quatro formas de corte já citadas foram utilizadas. As potências usadas foram 40 W, 60 W e 80 W para que fosse mantida a proporção de 1,0 W/g, 1,5 W/g e 2,0 W/g, respectivamente. Esta relação potência por massa foi estabelecida com base nos experimentos feitos por Wang e Xi (2005), pois estes autores utilizaram potência entre 1,0 W/g e 2,6 W/g e concluíram que a potência 2,6 W/g era prejudicial à cenoura. Os dois modos de secagem em microondas e em microondas a vácuo foram utilizados. No último, manteve-se a pressão de vácuo constante em 20 inHg. As curvas da cinética de secagem para os diferentes experimentos foram construídas tomando-se medidas de massa das amostras em intervalos de tempo de 5 minutos, em balança de precisão igual a  $1 \times 10^{-6}$  kg. A variação de massa observada foi considerada como a quantidade de água perdida pela amostra durante o processo de secagem, sendo então calculada a umidade da amostra.

Diante dos resultados obtidos na primeira fase foi repetida a secagem de discos de 8 mm de espessura para acompanhamento das mudanças nas propriedades estruturais de

acordo com o teor de umidade, tanto para a secagem em microondas como para a secagem em microondas a vácuo.

Para estes experimentos foi utilizada uma massa fixa de 80g, já que haveria necessidade de material para os experimentos de caracterização, ao longo da secagem, e esta era a maior capacidade do recipiente utilizado. Foi verificado que se alterando a massa, mas mantendo-se a proporção de potência por massa constante, não ocorre alteração na cinética obtida. Amostras retiradas ao longo da secagem foram caracterizadas quanto ao volume, densidade aparente e real.

A terceira e última fase dos experimentos de secagem consistiu na secagem de discos de 8 mm de espessura em microondas e em microondas a vácuo. Assim como na segunda fase a massa inicial foi de 80g. A cenoura seca obtida em cada condição foi então submetida a testes para determinação do teor de  $\beta$ -caroteno e características de reidratação.

Após a obtenção dos resultados para os experimentos de secagem descritos e uma breve análise dos mesmos, decidiu-se realizar teste em estufa a vácuo e em estufa por convecção forçada.

Para os experimentos em estufa a vácuo, feitos em triplicata, utilizaram-se somente cenouras cortadas em discos de 8 mm de espessura, uma vez que esta forma é mais fácil de obtenção e apresentou cinética de secagem semelhante as demais. A forma cúbica, que apresentou cinética mais lenta, não foi utilizada em tais experimentos. A temperatura de secagem foi de 70°C e o equipamento foi operado com pressão de vácuo igual a 28 inHg. O mesmo experimento foi também realizado a pressão ambiente para análise do efeito do vácuo na cinética de secagem de cenouras.

Os experimentos em estufa por convecção forçada, também em triplicata, foram realizados a temperatura de 70°C e as formas de disco de 8 mm de espessura e cubo foram usadas. Com isso foi possível verificar a presença de comportamento diferente para formas diferentes durante a secagem por convecção forçada.

A temperatura de 70°C foi utilizada tanto para a secagem em estufa, como em convecção forçada, pois a esta temperatura a cinética de secagem é acelerada e ainda não ocorre queima da cenoura.

### 3.3.4 Caracterização das amostras

- **Teor de umidade**

A determinação do teor de umidade foi feita para as amostras “in natura” e ao final da secagem. Foi utilizado o método de estufa: uma massa conhecida de material foi submetida a  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Passado este tempo, a amostra foi pesada novamente. Esta última massa medida foi tomada como sua massa seca. A umidade da amostra foi então calculada pela seguinte equação:

$$X(b.u.) = \frac{m_0 - m_s}{m_0} \quad (3.2)$$

onde:

X - umidade em base seca (g de água/g de sólidos);

$m_0$  - massa da amostra (g), antes de ser submetida à estufa e

$m_s$  - massa da amostra (g), após 24 horas na estufa.

- **Teor de  $\beta$ -caroteno**

A perda do valor nutricional da cenoura após o processo de secagem foi medida em termos da degradação de  $\beta$ -caroteno. O teor deste nutriente foi medido nas amostras “in natura” e após a secagem através de cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE).

A quantificação de  $\beta$ -caroteno foi feita em uma coluna  $C_{12}$  da marca Synergi, modelo 4 $\mu$  MAX-RP 80A com dimensões de 250 mm x 4,5 mm, como fase estacionária. O eluente foi composto pela mistura de duas fases móveis (A e B). Sendo a fase A acetonitrila pura e a fase B metanol e acetato de etila na proporção 1:1. A Tabela 3.1 especifica as concentrações das duas fases utilizadas ao longo do experimento.

Tabela 3.1: Relação entre as fases A e B utilizadas como eluente.

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Fluxo (ml/min.)</i>	<i>%A</i>	<i>%B</i>
0	1	95	5
10	1	60	40
40	1	100	0
45	1	95	5

As concentrações apresentadas na Tabela 3.1 resultam em uma curva côncava para a relação entre A e B. Os experimentos foram feitos a temperatura ambiente (28°C).

Uma curva padrão, com as concentrações de 2, 4 e 8 mg/L de um padrão de  $\beta$ -caroteno foi construída previamente para o equipamento, tal que o teor de  $\beta$ -caroteno fosse quantificado nas amostras.

Para essa análise foi preciso realizar a sua extração. Para a extração de carotenos, uma pequena quantidade de cenoura em pó foi utilizada, em torno de 1g da amostra. Esta foi macerada com acetona até que a amostra ficasse incolor. O extrato de acetona foi, então, filtrado em papel de filtro para se eliminar a massa incolor do material. Este extrato foi então transferido para um balão de 100 ml e o seu volume completado. E, assim, uma alíquota desta solução foi filtrada novamente em membrana HV em PVDF de poro igual a 0,45  $\mu\text{m}$  e submetida ao aparelho de cromatografia. Um fotodetector da marca Waters modelo 996 foi utilizado, com comprimento de onda igual a 452 nm, para a determinação do teor de  $\beta$ -caroteno na amostra. A quantidade de  $\beta$ -caroteno por massa seca de cenoura foi então calculado.

- **Densidade aparente**

A densidade aparente da cenoura “in natura” e seca em microondas e em microondas a vácuo, para diferentes teores de umidade, foi determinada por picnometria líquida com hexano.

Este método consiste basicamente na tomada das massas do picnômetro seco ( $m_{pic}$ ), com água ( $m_{pic+água}$ ) e da temperatura da água, a partir da qual se tem a densidade da água, para a determinação do volume do picnômetro pela seguinte equação:

$$V_{pic} = \frac{m_{água}}{\rho_{água}} \quad (3.3)$$

Com o conhecimento do  $V_{pic}$  é determinada a densidade do hexano a partir da massa do picnômetro seco e do picnômetro com hexano ( $m_{pic+hexano}$ ):

$$V_{pic} = V_{hexano} = \frac{m_{pic+hexano} - m_{pic}}{\rho_{hexano}} \quad (3.4)$$

Em seguida a amostra é colocada no picnômetro completamente seco e toma-se a massa do picnômetro com amostra ( $m_{pic+amostra}$ ). O volume do picnômetro é então completado com hexano e a sua massa é medida ( $m_{pic+am+hex}$ ). O volume de hexano agora será igual a:

$$V_{hexano} = \frac{(m_{pic+amostra+hexano} - m_{pic+amostra})}{\rho_{hexano}} \quad (3.5)$$

A densidade aparente da amostra é então determinada, pois são conhecidos o volume da amostra e a sua massa:

$$V_{amostra} = V_{pic} - V_{hexano} \quad (3.6)$$

$$m_{amostra} = m_{pic+amostra} - m_{pic} \quad (3.7)$$

$$\rho_{amostra} = \frac{m_{amostra}}{V_{amostra}} \quad (3.8)$$

- **Densidade real**

A densidade real da cenoura foi medida durante a secagem, somente a partir do momento em que a umidade do material estivesse abaixo de 30% (b.u.), para evitar danos ao equipamento.

Esta densidade foi determinada em picnômetro a hélio, modelo *Ultrapycnometer* da marca *Quantachrome Instruments*.

- **Encolhimento**

Para determinar o encolhimento das amostras de cenoura ao longo da secagem foi medido o volume das mesmas.

O volume das amostras “in natura” foi medido tanto com paquímetro digital, com precisão de  $1 \times 10^{-5}$  m, como pela picnometria líquida com hexano, usada na determinação de densidade aparente, apenas para efeito de comparação. Já para amostras secas e para aquelas retiradas ao longo da secagem, o volume foi determinado apenas por picnometria líquida devido à deformação das amostras e a dificuldade de utilização do paquímetro para tal medida.

O encolhimento das amostras foi expresso em termos do coeficiente de encolhimento  $V/V_0$ , definido por Madiouli *et al.* (2007). Sendo  $V_0$  o volume da amostra úmida antes do início da secagem e  $V$  o volume da amostra medido ao longo da secagem.

- **Porosidade**

A porosidade da cenoura foi determinada a partir dos dados de densidades aparente e real. Por esta razão, a porosidade só foi calculada para aquelas amostras com teor de umidade abaixo de 30% (b.u.).

### 3.4 Reidratação

As cenouras secas foram reidratadas por imersão em água destilada a temperatura ambiente e em triplicata para cada condição de secagem. A massa de amostra utilizada em cada experimento foi de aproximadamente 1,5 g e a razão entre a massa e o volume de água utilizados foi 1:30. As amostras foram retiradas do banho de imersão em diferentes tempos e pesadas em balança com precisão de  $1,0 \times 10^{-5}$  kg. A razão de reidratação (RR) foi definida conforme Marques *et al.* (2008), sendo a razão entre a massa da amostra durante a reidratação e a sua massa seca, antes do início do processo de reidratação.

Além da razão de reidratação, os índices de capacidade de absorção de água (WAC), capacidade de retenção da matéria seca (DHC) e capacidade de reidratação (RA) propostos por Lewick (1998) também foram determinados a fim de se obter uma completa caracterização do processo de reidratação da cenoura.

### 3.5 Isotermas de equilíbrio

O método estático com utilização de soluções salinas saturadas foi o escolhido para determinação das isotermas de equilíbrio. A umidade de equilíbrio foi atingida através da dessorção de umidade pelas amostras de cenoura e os sais escolhidos foram tais que uma ampla faixa de umidade relativa fosse alcançada. A Tabela 3.2 enumera os sais utilizados e suas respectivas umidades relativas.

Tabela 3.2: Umidade relativa das soluções salinas em função da temperatura.

<i>Soluções salinas</i>	<i>UR- 40°C</i>	<i>UR- 50°C</i>
LiCl	0,112	0,111
CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> K	0,204	0,192
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0,318	0,312
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,432	0,433
NaNO <sub>2</sub>	0,616	0,616
NaCl	0,748	0,746
KCl	0,818	0,802

As isotermas de equilíbrio da cenoura foram determinadas para as temperaturas de 40°C e 50°C. Nestas temperaturas, o controle da concentração das soluções salinas é mais fácil em comparação a temperaturas mais altas. E também, o tempo de duração do experimento é reduzido em comparação a temperaturas mais baixas. Além disso, uma vez obtida a umidade de equilíbrio a determinada temperatura é possível, através de modelos que incluem este parâmetro, obter a umidade de equilíbrio para diferentes temperaturas. O modelo de Hasley modificado, equação 2.9, é um exemplo de equação para se determinar a umidade de equilíbrio em diferentes temperaturas.

Para a determinação das isotermas utilizou-se reservatórios cilíndricos de vidro, no interior dos quais foram colocadas as soluções salinas saturadas. Suportes plásticos com pequenas perfurações foram colocados no interior dos reservatórios cilíndricos a fim de acomodarem as amostras. A massa de amostra utilizada foi suficiente para formar uma monocamada no fundo do suporte plástico. A Figura 3.3 ilustra um esquema do recipiente utilizado.

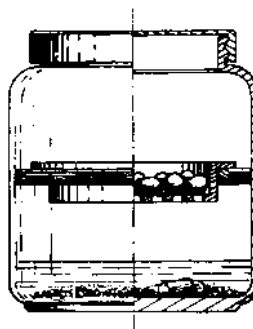


Figura 3.3: Esquema do recipiente utilizado na determinação das condições de equilíbrio (Barrozo,1995).

Após pesadas, as amostras foram colocadas no recipiente e este colocado em câmara climatizada, com sistema automático de controle de temperatura. A cada três dias, as massas das amostras foram medidas em balança analítica com precisão de  $1,0 \times 10^{-7}$  kg. Após atingir massa constante, a umidade de cada amostra foi então determinada pelo método de estufa. Os experimentos para cada umidade relativa foram feitos em triplicata.

### 3.6 Tratamento de dados

Os dados obtidos para as cinéticas de secagem, isotermas de equilíbrio e cinética de reidratação foram ajustados aos modelos apresentados no Capítulo 2. Para cada caso utilizou-se o “software” STATISTICA<sup>®</sup> na versão 7. O método de estimação linear dos mínimos quadrados foi aplicado e a qualidade do ajuste dos modelos testados determinada pelos valores de dois parâmetros estatísticos: o coeficiente de correlação,  $R^2$ , e a soma dos quadrados dos resíduos (SQR):

$$SQR = \sum (Y - y)^2 \quad (3.9)$$

O desvio relativo médio (DVM) também foi utilizado como critério para análise da diferença entre os valores apresentados para umidade adimensional ao longo da secagem em microondas e aqueles apresentados na secagem em microondas a vácuo. Este parâmetro também foi utilizado no ajuste das equações propostas para descrever a cinética de reidratação. Ele é obtido a partir da seguinte equação:

$$DVM = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{Y - y}{Y} \right| \quad (3.10)$$



## 4. Resultados e discussão

### 4.1 Isotermas de sorção

As isotermas obtidas pelo método estático descrito no Capítulo 2, para as amostras de cenoura, foram isotermas de dessorção. Isto porque as amostras submetidas a atmosferas controladas possuíam teor de umidade maior que a do ambiente de medida, de modo que houve perda de umidade até que entrassem em equilíbrio com o meio.

As amostras levaram entre 43 e 62 dias para atingirem o equilíbrio, em condições termodinâmicas constantes. As pesagens foram feitas de dois em dois dias e foi considerado atingido o equilíbrio quando as amostras apresentaram variação na massa inferior a  $1,0 \times 10^{-6}$  kg em três pesagens consecutivas.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados experimentais para as umidades de equilíbrio das amostras, b.s. (g de água/g de sólido), suas réplicas e desvios padrões nas temperaturas e umidades relativas utilizadas. Os desvios padrões médios para os dados das isotermas a 40°C e 50°C foram de 8% e 6%, respectivamente.

Tabela 4.1: Umidade de equilíbrio da cenoura nas temperaturas de 40°C e 50°C e seus respectivos desvios padrões.

<i>Soluções salinas</i>							
<i>Temperatura</i>	<i>LiCl</i>	<i>CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>K</i>	<i>MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O</i>	<i>K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></i>	<i>NaNO<sub>2</sub></i>	<i>NaCl</i>	<i>KCl</i>
<i>40°C</i>	0,225	0,226	0,269	0,247	0,331	0,418	
	0,243	0,244	0,211	0,237	0,261	0,378	0,358
	0,264	0,210	0,261	0,241	0,300	0,377	0,466
<i>Desvio Padrão</i>	0,016	0,014	0,026	0,004	0,028	0,019	0,054
<i>50°C</i>	0,109	0,109	0,120	0,124	0,165	0,300	0,328
	0,107	0,108	0,123	0,132	0,146	0,324	0,277
	0,113	0,152	0,113	0,136	0,156	0,278	0,314
<i>Desvio Padrão</i>	0,002	0,021	0,004	0,005	0,008	0,019	0,021

A Figura 4.1 representa a média das réplicas das umidades de equilíbrio obtidas para as temperaturas observadas e o desvio padrão referente a cada ponto experimental.

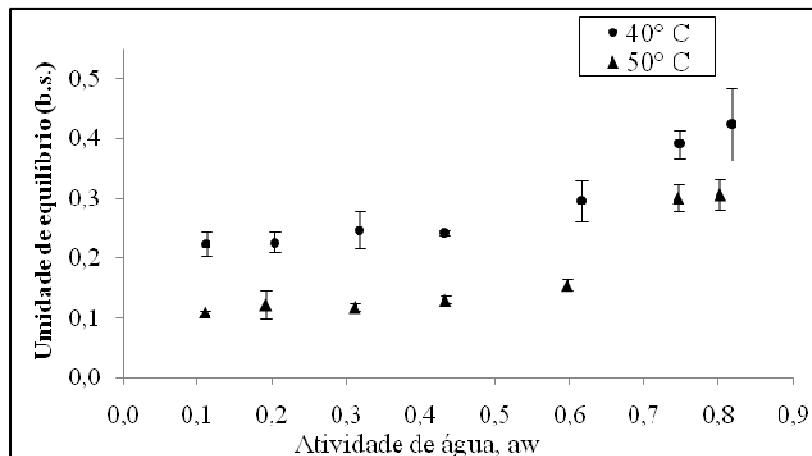


Figura 4.1: Isothermas de equilíbrio da cenoura para as temperaturas de 40°C e 50°C e os desvios padrões de cada ponto experimental.

Ao observar esta figura, observa-se que para valores de  $a_w$  menores que 0,5 a umidade de equilíbrio sofre pequena variação. E, para valores de  $a_w$  acima de 0,5 a quantidade de água absorvida sofre variação apreciável, que pode ser atribuída à condensação capilar. Este comportamento confere às isothermas representadas na Figura 4.1 uma tendência a forma sigmóide, típica de materiais biológicos. Para estes materiais, em baixa pressão de vapor ocorre a adsorção de água por moléculas polares e compostos hidrofílicos, mas o teor de umidade ainda não é elevado. Mas com o aumento da pressão de vapor, ocorre o preenchimento dos poros do material e rápido aumento na  $a_w$  decorrente da condensação capilar.

A Figura 4.1 também mostra o efeito da temperatura no teor de umidade de equilíbrio. No gráfico desta figura, verifica-se que, para uma mesma atividade de água, o teor de umidade de equilíbrio é menor quando a isoterma é determinada a temperatura de 50°C, em relação à umidade de equilíbrio para a temperatura de 40°C. Este comportamento é devido ao fato de que, em temperatura mais alta a força de ligação entre as moléculas de água será menor, aumentando mobilidades destas moléculas e, conseqüentemente, a quantidade de água adsorvida será menor.

Com o objetivo de encontrar, dentre aqueles modelos apresentados no Capítulo 2, o que melhor representasse o comportamento dos dados experimentais, procedeu-se ao tratamento estatístico deles, conforme descrito no item 3.6. Os valores estimados para os parâmetros das equações de equilíbrio estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros estimados para as equações de equilíbrio da cenoura nas temperaturas de 40°C e 50°C.

<i>Equação</i>	<i>Parâmetros</i>	<i>Temperatura</i>	
		<i>40°C</i>	<i>50°C</i>
<b>BET</b> (Equação 2.6)	w <sub>0</sub>	-	0,069
	C	-	47355,017
<b>GAB</b> (Equação 2.7)	w <sub>0</sub>	0,19	0,086
	C	35832,09	34480,388
	K	0,67	0,909
<b>Oswin</b> (Equação 2.8)	M	0,295	0,174
	N	0,216	0,399
<b>Hasley Modificada</b> (Equação 2.9)	a	-2,335	-2,598
	b	3,231	1,799
	C	88,989	126,284

Os dados experimentais obtidos para a temperatura de 40°C não se ajustaram à equação de BET. Após os ajustes das equações, foi feita uma análise dos valores do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e também da soma do quadrado dos resíduos (SQR), para avaliar qual dos modelos melhor descreve o processo de dessecção para cenouras.

A Tabela 4.3 apresenta os valores obtidos para o coeficiente de correlação e soma dos quadrados dos resíduos.

Tabela 4.3: Valores de  $R^2$  referentes aos dados de cenoura para as temperaturas de 40°C e 50°C.

<i>Equação</i>	<i>40°C</i>		<i>50°C</i>	
	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>SQR</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>SQR</i>
<b>BET</b> (Equação 2.6)	-	-	0,875	5,7 x 10 <sup>-3</sup>
<b>GAB</b> (Equação 2.7)	0,954	1,8 x 10 <sup>-2</sup>	0,935	2,9 x 10 <sup>-3</sup>
<b>Oswin</b> (Equação 2.8)	0,947	4,0x 10 <sup>-3</sup>	0,871	5,9 x 10 <sup>-3</sup>
<b>Hasley Modificada</b> (Equação 2.9)	0,901	2,1 x 10 <sup>-3</sup>	0,912	4,0 x 10 <sup>-3</sup>

Ao analisar os valores apresentados na Tabela 4.3 é possível observar que dentre os modelos ajustados aos dados experimentais, a equação de GAB descreveu melhor as curvas de umidade de equilíbrio para a cenoura nas temperaturas utilizadas. Esta equação foi a

que apresentou valor do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) maior e menor valor da soma dos quadrados dos resíduos (SQR), para as duas temperaturas em que a umidade de equilíbrio foi determinada.

A equação de Hasley modificada obteve coeficiente de correlação acima de 0,900 e pode ser usada para estimar a umidade de equilíbrio de cenouras, durante o processo de dessecção para diferentes temperaturas, dentro da faixa experimental para a qual que foi ajustada.

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam os ajustes ao modelo de GAB para as temperaturas de 40°C e 50°C, respectivamente.

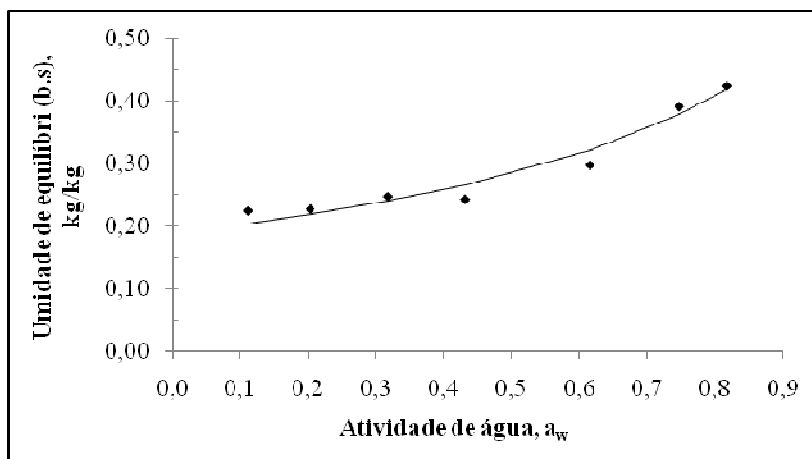


Figura 4.2: Umidade de equilíbrio em função da atividade de água para cenoura a 40°C (• pontos experimentais e — curva de ajuste da equação de GAB).

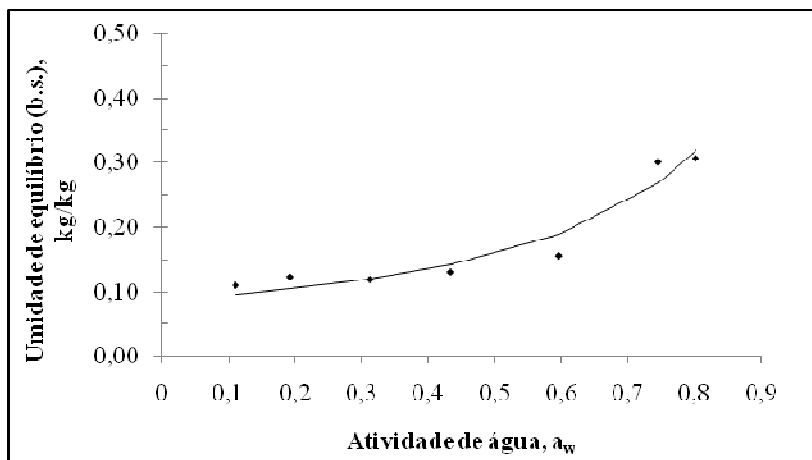


Figura 4.3: Umidade de equilíbrio em função da atividade de água para cenoura a 50°C (• pontos experimentais e — curva de ajuste da equação de GAB).

## 4.2 Secagem

### 4.2.1 Verificação da potência do equipamento

A verificação da potência fornecida pelo forno de microondas utilizado foi feita como descrito no Capítulo 2.

A Figura 4.4 mostra a relação entre a potência aplicada e a energia absorvida pela massa de água. Para cada potência foram feitas seis medidas de variação de temperatura da água e assim calculado o  $Q_{\text{abs}}$ . Observando-se a Figura 4.4, nota-se que houve reprodutibilidade da energia fornecida pelo equipamento em face da pequena variação de energia absorvida pela água por unidade de tempo para cada potência aplicada. O desvio padrão médio desta energia para cada potência programada foi de 4%, variando entre 1% e 4,2%. Com isso, garantiu-se que as condições experimentais foram mantidas constantes para potências programadas iguais. Além disso, o calor absorvido pela massa de água foi diretamente proporcional à potência aplicada. Através de regressão linear, os dados foram ajustados a uma reta e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) foi determinado. O valor de  $R^2$  foi 0,9946, muito próximo à unidade, indicando que o ajuste linear representa bem os dados experimentais.

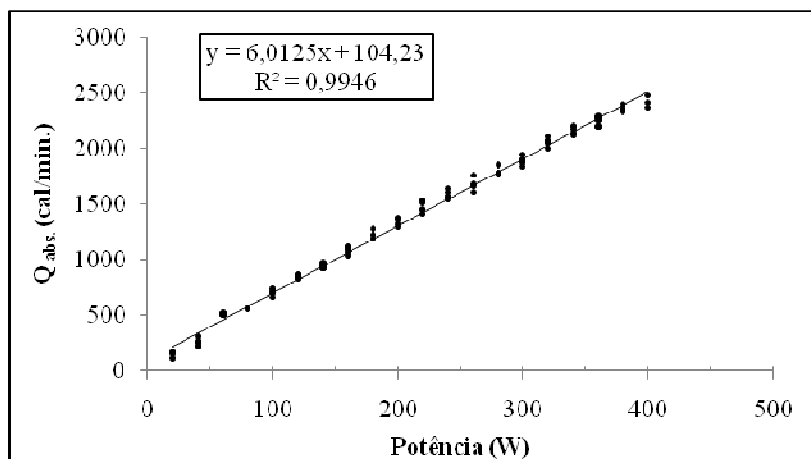


Figura 4.4: Energia absorvida pela água em função da potência aplicada.

### 4.2.2 Cinética de secagem

Como descrito no Capítulo 2, a primeira fase dos testes de secagem reuniu experimentos para que os efeitos da forma de corte e da espessura da amostra, da potência e do modo de secagem utilizados sobre a cinética de secagem de cenouras fossem determinados. Para todos os experimentos realizados a cinética de secagem de cenouras apresentou, predominantemente, um período de taxa de secagem decrescente, com um pequeno período inicial de taxa de secagem crescente, o que é atribuído ao tempo para aquecimento do material. Este resultado está de acordo com aquele encontrado por Prabhanjan *et al.* (1994), Prakash *et al.* (2004) e Wang e Xi (2005).

- **Efeito da forma de corte e espessura**

Para análise do efeito da forma procedeu a secagem das três formas: cubo, palito e disco. Diferentes espessuras da forma de disco, 8 mm e 4 mm, foram utilizadas para que fosse verificado o efeito da espessura durante a secagem em microondas e microondas a vácuo.

Através dos valores obtidos para o teor de umidade (b.s.) ao longo do tempo de secagem, traçaram-se as curvas do adimensional de umidade em função do tempo para as diferentes formas de corte utilizadas. A Figura 4.5 apresenta as curvas de secagem obtidas para estas formas, quando submetidas à secagem em microondas com potência igual a 2,0 W/g e a Figura 4.6 para potência igual a 1,0 W/g. Nestes gráficos é possível observar tanto o efeito da forma de corte como o efeito da espessura da amostra na cinética de secagem de cenouras em microondas. Ressalta-se que o efeito da forma e da espessura para a secagem em microondas a vácuo foi muito semelhante àquele apresentado para secagem em microondas.

Comparando-se o efeito da forma de corte, as formas de disco e palito apresentaram curvas de secagem praticamente sobrepostas, para os diferentes modos de secagem e diferentes potências utilizadas. O tempo de secagem para estas formas variou entre 95 e 150 minutos para a maior e menor potência, respectivamente. Enquanto que para a cenoura na forma de cubo, a cinética de secagem apresentada foi consideravelmente mais lenta do que para as outras duas formas. Nesta forma de corte o menor tempo de secagem observado foi de 155 minutos, para a maior potência utilizada, e o maior tempo foi superior a 240 minutos, para a menor potência utilizada. Entretanto, este tempo ainda é muito vantajoso

em relação à liofilização. Segundo Lin *et al.* (1998), são necessárias aproximadamente 72 horas para que a cenoura liofilizada atinja umidade adimensional próxima a 0,1.

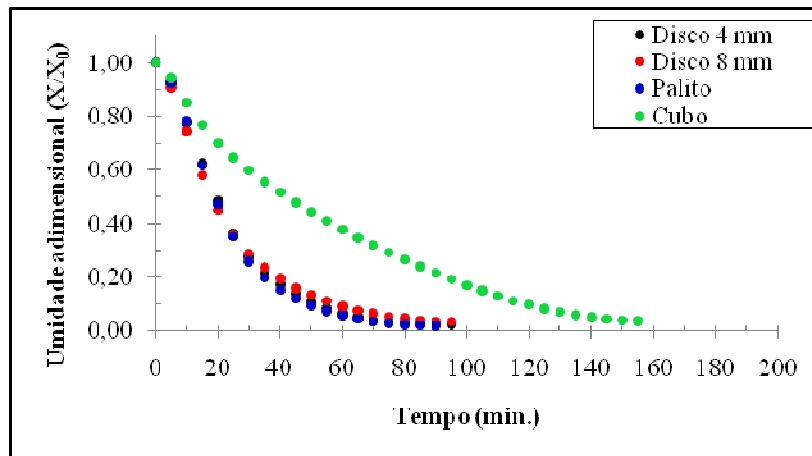


Figura 4.5: Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para as formas de cubo, palito e discos e potência de 2,0 W/g.

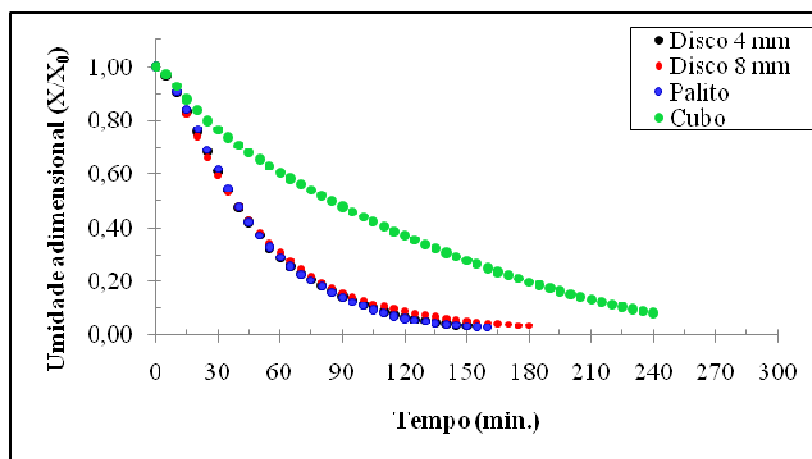


Figura 4.6: Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para as formas de cubo, palito e discos e potência de 1,0 W/g.

A menor velocidade de secagem apresentada pelo cubo pode ser explicada da seguinte maneira. Quando em comparação com formas cilíndricas e esféricas, as formas retangulares apresentam densidade de potência volumétrica absorvida menor. Para as formas retangulares, como exposto no Capítulo 2, o aquecimento por microondas se concentra nos cantos e o centro permanece à temperatura mais baixa. Com isso, não ocorre o rápido aquecimento do centro do cubo, o que prejudica a vaporização da umidade e conseqüentemente diminui a velocidade de secagem para esta forma.

A forma de palito, apesar de ser retangular, apresentou cinética de secagem semelhante à forma de disco, e conseqüentemente mais rápida do que a cinética de secagem da forma de cubo. Este comportamento pode estar relacionado ao fato de que a forma de palito possui área de exposição a microondas quase duas vezes maior do que o cubo. Para a forma de palito, nas dimensões utilizadas, a área superficial é de 632 mm<sup>2</sup> e para o cubo é de 320 mm<sup>2</sup>. A maior área de exposição ocasiona maior quantidade de microondas absorvida o que pode ter compensado a tendência do palito a ter menor densidade de potência volumétrica absorvida.

Quanto ao efeito da espessura, uma comparação da cinética de secagem de discos de 4 mm com a cinética obtida para discos de 8 mm, apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.6, permite dizer que, na secagem de cenoura em microondas, esta variação de espessura não teve influência significativa na cinética de secagem. As curvas de secagem para as diferentes espessuras foram muito semelhantes.

Esta independência da cinética de secagem de cenoura em microondas em relação à espessura da amostra explica-se pela geração de calor interno durante este processo. O calor gerado internamente vaporiza a água, ainda no interior do material, e a diferença de pressão estabelecida força o vapor d'água para a superfície. Sendo assim, a transferência de umidade tem pouca influência da difusão e ocorre, principalmente, pela diferença de pressão. Também devido à geração de calor interno, na secagem por microondas a transferência de calor não ocorre por condução. Portanto, o aumento da espessura não representa obstáculo para o aquecimento do interior da amostra, desde que a espessura seja menor que a profundidade de penetração de microondas. As diferentes espessuras utilizadas, neste trabalho, foram menores do que a profundidade de penetração de microondas para cenoura que varia entre 16,35 mm e 14,11 mm de acordo com a umidade.

A fim de verificar se o efeito da forma de corte na cinética de secagem era peculiar à secagem em microondas, um teste foi realizado para as formas de disco de 8 mm de espessura e cubo em estufa por convecção forçada.

A Figura 4.7 mostra o valor médio da umidade adimensional, que foi obtida em triplicata, em função do tempo para estes testes. Os valores dos desvios médios relativos foram de 3,3 % para o disco e de 10,2 % para o cubo e permitem dizer que os experimentos foram reprodutivos.



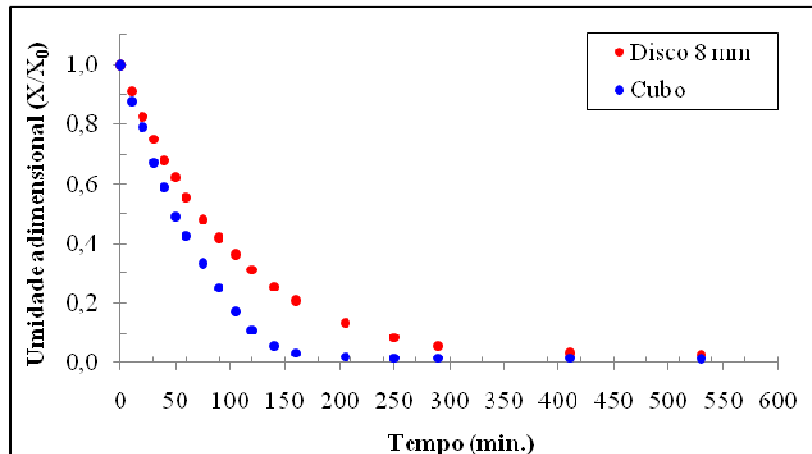


Figura 4.7: Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para discos de 8 mm de espessura e cubo em estufa de convecção forçada.

Pode-se observar nos gráficos da Figura 4.7, que para a secagem por convecção forçada, a perda de umidade para a cenoura cortada em cubo foi mais rápida que para a cenoura cortada em disco. Após 200 minutos de secagem as amostras em forma de cubo atingiram o equilíbrio, enquanto que para as amostras em forma de disco o equilíbrio só foi atingido após 400 minutos de secagem. Este comportamento é o inverso do apresentado na secagem em microondas, onde o cubo teve cinética de secagem muito mais lenta. A secagem mais lenta para a forma de disco, em comparação com a forma de cubo, nas dimensões utilizadas, quando submetidos à convecção forçada, pode ser explicada pelos princípios de transferência de calor e massa envolvidos neste processo.

Durante a secagem por ar aquecido ocorre, primeiramente, o aquecimento da superfície do material em contato com o ar quente, e também evaporação da umidade superficial. A partir deste ponto, a transferência de calor da superfície aquecida para o interior, ainda frio, acontece pelo processo de condução de calor devido ao gradiente de temperatura. Desta forma, a migração da umidade ocorre, principalmente, por difusão de umidade do interior para a superfície, impulsionada pela diferença de concentração.

Como o cubo apresenta uma relação área superficial/volume mais que duas vezes maior do que o disco, o aquecimento de todo o seu volume é favorecido em relação ao aquecimento de todo o disco. Além disso, a maior área superficial em relação ao volume, apresentada pela forma de cubo, implica em maior área de transferência de umidade do material para o ar de secagem. A Tabela 4.4 apresenta a área superficial, o volume e a razão entre área superficial/volume para o cubo e disco submetidos à secagem por convecção

forçada. Ressalta-se que a área da superfície em contato com a placa não foi considerada como área superficial, desprezando-se assim a troca de calor e umidade nesta superfície.

Tabela 4.4: Área superficial, volume e relação volume/área para formas utilizadas na secagem por convecção forçada.

	<i>Cubo</i>	<i>Disco 8 mm</i>
<i>Área superficial (mm<sup>2</sup>)</i>	320	1118,6
<i>Volume (mm<sup>3</sup>)</i>	512	3925,0
<i>Área superficial/volume</i>	0,625	0,285

Portanto, com base nos resultados apresentados, para cada secador é necessário observar como ocorrem os fenômenos de transferência para então determinar qual será o melhor modo de preparo do material a ser seco.

- **Efeito do modo de secagem**

#### *Potência*

Com o intuito de investigar os efeitos da potência de secagem e da associação do vácuo à secagem por microondas, as curvas da umidade adimensional em função do tempo foram traçadas para os dois modos de secagem e para as diferentes potências e formas utilizadas. As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam o efeito da potência sobre a cinética de secagem em microondas, para a cenoura cortada em cubo e em discos de 8 mm de espessura, respectivamente. Para as formas de disco de 4 mm de espessura e palito foram observados o mesmo comportamento mostrado nestas duas figuras.

O aumento da potência de microondas aplicada ocasionou aceleração na cinética de secagem de cenoura. Pode ser observado nas Figuras 4.8 e 4.9 que quando a potência de 1,0 W/g foi utilizada, a queda no teor de umidade foi mais lenta em comparação com as demais e que a secagem mais rápida ocorreu para os experimentos com a potência de 2,0 W/g, no caso, a potência mais alta. O mesmo resultado foi encontrado por Prakash *et al.* (2004). Eles observaram que o aumento da potência utilizada para a secagem de cenouras, em forno microondas, diminuiu o tempo de secagem e aumentou o coeficiente de difusão (K).

Este resultado é coerente com o fato de que, quanto maior a potência aplicada, maior será a quantidade de calor interno gerado no material. Conseqüentemente, a vaporização da umidade será mais rápida e a diferença de pressão estabelecida maior. Como,

segundo Schiffmann (1995), esta diferença de pressão é a força motriz que leva a umidade, em forma de vapor, para a superfície do material durante a secagem por microondas, a taxa de secagem será maior quando potências mais altas forem utilizadas.

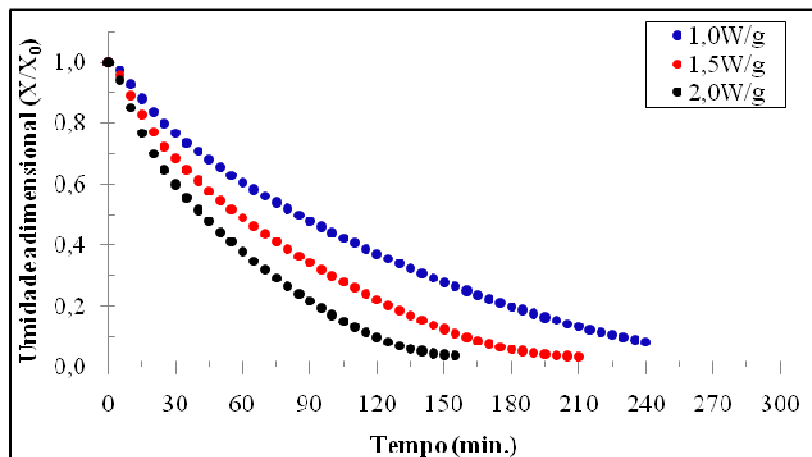


Figura 4.8: Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para cubo e secagem em microondas em diferentes potências.

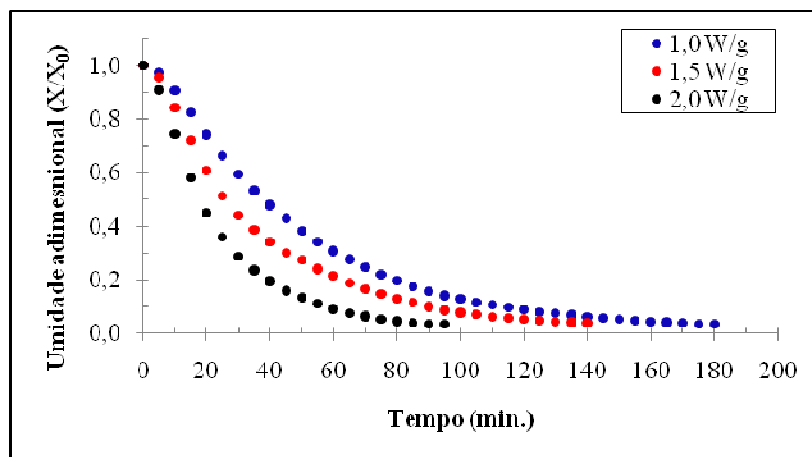


Figura 4.9: Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para discos de 8 mm de espessura e secagem em microondas em diferentes potências.

A Figura 4.10 apresenta os gráficos construídos para a taxa de secagem em função do teor de umidade para melhor visualização do efeito da potência aplicada na taxa de secagem de cenoura. Nota-se que a taxa de secagem mais alta foi atingida para a maior potência. Além disso, a taxa máxima atingida durante a secagem com potência de 2,0 W/g,  $0,25 \text{ (g.min}^{-1}\text{)}$ , foi quase o dobro da taxa máxima alcançada quando utilizada a potência de 1,0 W/g que foi igual a  $0,13 \text{ (g.min}^{-1}\text{)}$ .

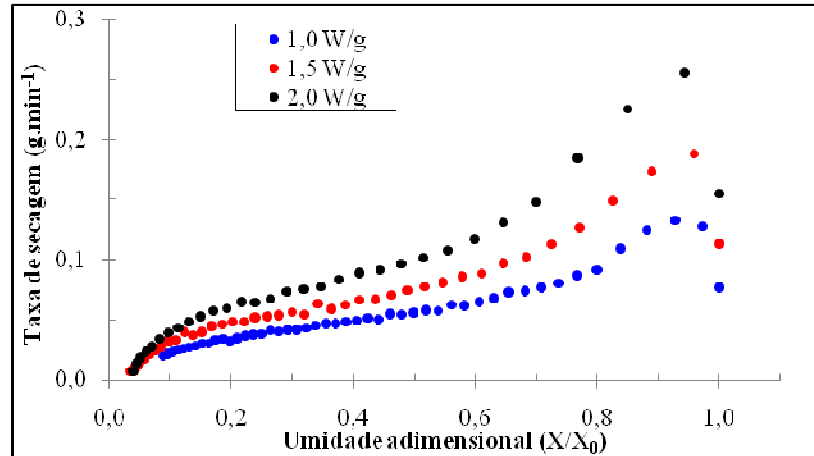


Figura 4.10: Taxa de secagem em função da umidade adimensional para a secagem de cenoura, na forma de cubo, em microondas e diferentes potências.

*Modo de secagem*

O efeito da associação do vácuo à secagem por microondas foi analisado a partir das curvas de cinética de secagem para os dois modos. As Figuras 4.11 e 4.12 ilustram o adimensional de umidade em função do tempo para os dois modos de secagem utilizados, com as formas de palito e discos de 4 mm de espessura, respectivamente.

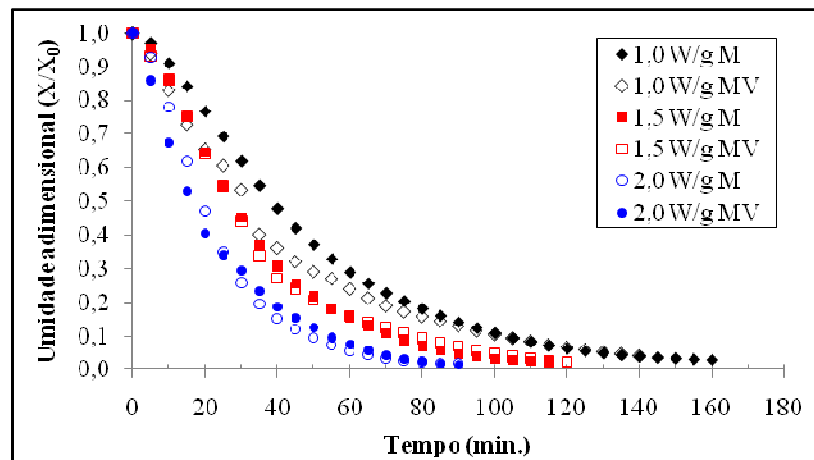


Figura 4.11: Umidade adimensional (X/X₀) em função do tempo para diferentes potências durante a secagem em microondas (M) e em microondas a vácuo (MV), com cenouras cortadas em palito.

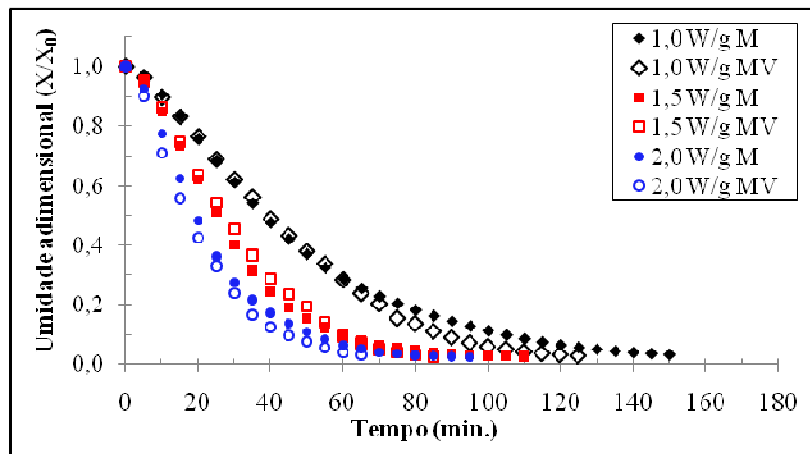


Figura 4.12: Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para diferentes potências durante a secagem em microondas (M) e em microondas a vácuo (MV), com cenouras cortadas em discos de 4 mm de espessura.

A partir da comparação entre o comportamento das cinéticas de secagem da cenoura submetida à secagem em microondas e microondas a vácuo, apresentadas nas Figuras 4.11 e 4.12, nota-se que, a associação do vácuo a microondas não resultou em mudança significativa nestas cinéticas. As cinéticas de secagem para os dois modos utilizados foram muito próximas, mantendo-se a potência constante. Para confirmar que esta interferência na velocidade de secagem não foi importante, calculou-se o desvio relativo médio entre o teor de umidade da cenoura para a secagem em microondas a vácuo e em microondas. A Tabela 4.5 apresenta estes valores para as quatro formas utilizadas.

Tabela 4.5: Desvio relativo médio entre o teor de umidade ao longo da secagem por microondas e microondas a vácuo, para as diferentes formas utilizadas.

	Desvio médio relativo (%)		
	1,0 W/g	1,5 W/g	2,0 W/g
<i>Disco 8 mm</i>	4,6	16,1	13,0
<i>Disco 4 mm</i>	1,4	1,2	1,9
<i>Palito</i>	6,3	7,3	8,1
<i>Cubo</i>	1,6	4,7	3,7

A grande maioria dos valores dos desvios médios relativos apresentados na Tabela 4.5 está abaixo de 10%. Apenas para os valores apresentados para a cinética de secagem de discos de 8 mm estão um pouco acima deste valor. Feita esta comparação, pode-se dizer que não houve diferença significativa entre as secagens por microondas e por microondas a vácuo.

Experimentos de secagem em estufa com e sem uso de vácuo, para cenouras cortadas em discos de 8 mm de espessura, foram realizados a fim de investigar se o vácuo exercia ou não influência sobre a transferência de umidade na cenoura durante este modo de secagem. Os valores de umidade ao longo do tempo foram determinados em duplicata para cada modo de secagem e são apresentados na Figura 4.13.

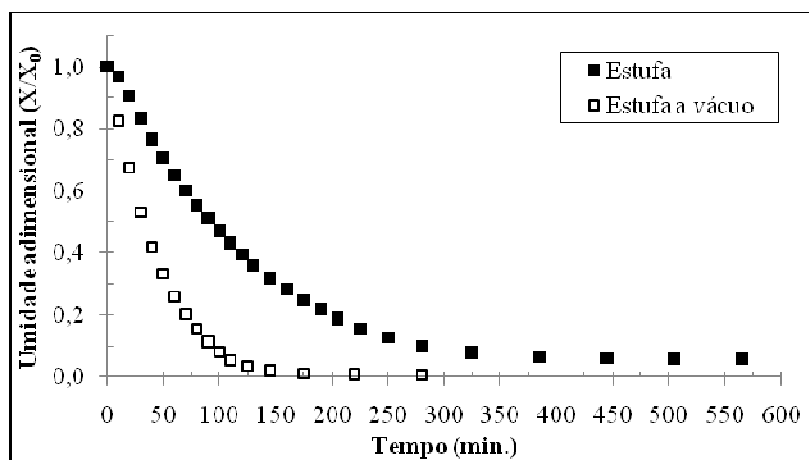


Figura 4.13: Umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo para a secagem de cenoura em estufa a temperatura de 70°C com e sem uso de vácuo.

Ao analisar a Figura 4,13, é notável que a cinética de secagem apresentada para estufa a vácuo foi consideravelmente mais acelerada do que aquela para a cenoura seca sem o uso de vácuo. Durante a secagem em estufa a vácuo o equilíbrio foi atingido com apenas 150 minutos de secagem. Enquanto que, para a secagem sem o uso do vácuo, as amostras só atingiram o equilíbrio após 400 minutos de secagem. A grande diferença da secagem entre esses dois modos também pode ser expressa pelo desvio relativo médio do teor de umidade, que teve valor igual a 262,5%. A pressão de vácuo, então, acelera a transferência de umidade para a secagem de cenoura em estufa, uma vez que este é um processo controlado pela difusão. A diferença de pressão criada então é uma força motriz extra para que a umidade migre do interior do produto até a sua superfície.

#### *Ajuste aos modelos*

Os dados experimentais obtidos para a secagem de cenoura em microondas e microondas a vácuo, a diferentes potências, foram ajustados aos modelos de Lewis e Page apresentados no Capítulo 2. As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os valores dos parâmetros das

equações, do coeficiente de correlação e da soma dos quadrados dos resíduos para a equação de Lewis e Page, respectivamente.

Através da observação dos valores expostos nas Tabelas 4.6 e 4.7, constata-se que para a equação de Page os valores do coeficiente de correlação foram mais próximos da unidade, em comparação com aqueles valores obtidos para o ajuste realizado para a equação de Lewis. Além disso, a soma dos quadrados dos resíduos foi menor para a equação de Page em relação aquela obtida para a equação de Lewis.

Tabela 4.6: Parâmetros para a equação de Lewis.

Modo de secagem	Potência (W/g)	k (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	SQR
<i>Microondas</i>	1,0	0,020	0,987	0,039
	1,5	0,027	0,993	0,018
	2,0	0,042	0,989	0,020
<i>Microondas a vácuo</i>	1,0	0,019	0,983	0,052
	1,5	0,030	0,978	0,049
	2,0	0,037	0,967	0,062

Tabela 4.7: Parâmetros para a equação de Page.

Modo de secagem	Potência (W/g)	k (min <sup>-1</sup> )	n	R <sup>2</sup>	SQR
<i>Microondas</i>	1,0	0,008	1,223	0,999	0,004
	1,5	0,017	1,222	0,997	0,009
	2,0	0,021	1,212	0,998	0,005
<i>Microondas a vácuo</i>	1,0	0,009	1,153	0,999	0,003
	1,5	0,015	1,172	0,997	0,005
	2,0	0,020	1,171	0,991	0,015

Avaliando-se os valores obtidos para a constante de secagem (k) tanto pela equação de Lewis quanto pela equação de Page, observa-se que a mudança no modo de secagem não implica em mudança característica desta constante. Além disso, a variação no modo de secagem utilizado representa uma variação média de apenas 9,0 % para a equação de Lewis e 9,2% para a equação de Page, na constante de secagem, o que indica não haver diferença expressiva entre a cinética de secagem em microondas e em microondas a vácuo.

### 4.3 Caracterização das amostras

#### Propriedades físicas

- **Teor de umidade**

O valor médio para o teor de umidade da cenoura, em base úmida, determinado antes do início de cada experimento, para as diferentes formas de corte, modo e potência de secagem, foi igual a 92,5 % (g de água/ g de produto). Os valores, máximo e mínimo, para o teor de umidade foram 93,5% e 91,2%. O desvio padrão foi de 0,6 %. A Tabela 4.8 apresenta os teores de umidade inicial para cada experimento de secagem.

Pode-se constatar a partir dos valores apresentados na Tabela 4.8, que a cenoura apresenta alto teor de umidade e que, apesar de ser um produto sem padronização, a variação do mesmo foi pequena.

Tabela 4.8: Teor de umidade, base úmida, para a cenoura antes do processo de secagem.

		<i>Teor de umidade %</i>		
		<b>1,0 W/g</b>	<b>1,5 W/g</b>	<b>2,0 W/g</b>
<b>Cubo</b>	<i>M</i>	93,4	93,2	93,2
	<i>MV</i>	91,7	92,1	92,3
<b>Palito</b>	<i>M</i>	92,7	92,6	92,7
	<i>MV</i>	93,2	93,1	92,3
<b>Disco 8 mm</b>	<i>M</i>	92,6	91,5	91,2
	<i>MV</i>	92,0	91,9	91,9
<b>Disco 4 mm</b>	<i>M</i>	93,2	93,5	93,3
	<i>MV</i>	92,3	92,3	91,9

A Tabela 4.9 apresenta os resultados para o teor de umidade final, em base úmida, para cada experimento de secagem. O teor de umidade médio foi de 2,7% e o desvio padrão de 0,7%. Como o valor do desvio padrão, em relação à média, foi elevado, isso pode indicar uma secagem não muito uniforme. Ressalva-se que a umidade final das amostras na forma de cubo, submetidas à secagem em microondas e em microondas a vácuo e 1,0 W/g de



potência, não foi considerada neste cálculo, pois o tempo de secagem não foi suficiente para que estas amostras atingissem o equilíbrio.

Tabela 4.9: Teor de umidade, base úmida, para a cenoura após o processo de secagem.

		<i>Teor de umidade %</i>		
		<b>1,0 W/g</b>	<b>1,5 W/g</b>	<b>2,0 W/g</b>
<b>Cubo</b>	<i>M</i>	7,6	3,1	3,5
	<i>MV</i>	7,5	2,9	1,8
<b>Palito 4</b>	<i>M</i>	2,7	2,1	1,7
	<i>MV</i>	3,9	2,2	1,3
<b>Disco 4mm</b>	<i>M</i>	3,2	2,4	2,2
	<i>MV</i>	2,8	2,4	2,9
<b>Disco 8mm</b>	<i>M</i>	3,2	3,7	3,1
	<i>MV</i>	3,4	2,9	2,0

- **Densidade**

As densidades tanto aparente ou “bulk” como real ou densidade da partícula foram determinadas pela média de dois experimentos para cada condição de secagem.

*Densidade aparente ou densidade “bulk”*

Para acompanhar a evolução da densidade aparente das amostras em função do teor de umidade e, assim, verificar se existe influência do modo e potência de secagem nesta propriedade física da cenoura, foram construídos os gráficos mostrados nas Figuras 4.14 e 4.15. O método usado para a medida de volume das amostras foi o método do picnômetro utilizando-se hexano, conforme descrito no Capítulo 2.

Para que o efeito do modo de secagem na densidade aparente da amostra fosse observado, foi construído o gráfico mostrado na Figura 4.14, que apresenta a evolução da densidade aparente em função do teor de umidade para a secagem em microondas e em microondas a vácuo a uma mesma potência.

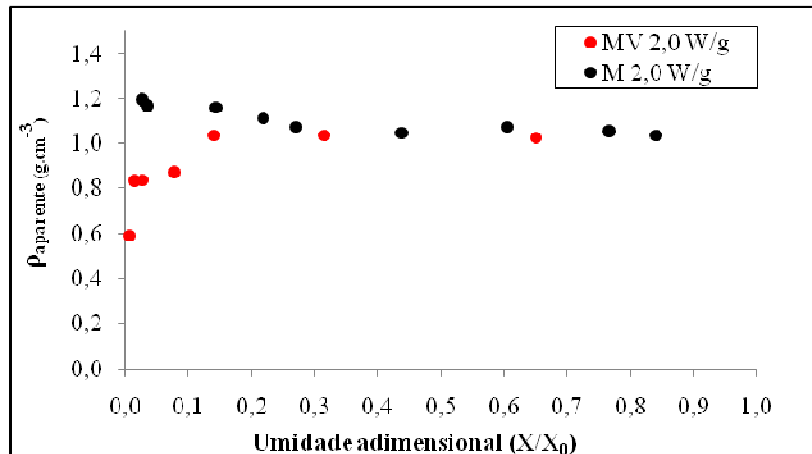


Figura 4.14: Densidade aparente em função da umidade adimensional ( $X/X_0$ ) para secagem de cenoura em microondas (M) e em microondas a vácuo (MV) a 2,0 W/g de potência.

Analisando a Figura 4.14, verifica-se que, inicialmente, a densidade aparente da cenoura é próxima à densidade da água, devido ao seu alto teor de umidade. Ao se observar a evolução da densidade aparente com o teor de umidade, nota-se que o modo de secagem exerceu influência sobre o comportamento da densidade aparente da cenoura. As amostras submetidas à secagem em microondas a vácuo apresentaram uma redução na densidade aparente ao final da secagem. Enquanto que, para as cenouras secas em microondas, a densidade aparente permaneceu praticamente constante com uma pequena elevação ao final da secagem. O mesmo resultado foi observado para a potência de 1,0 W/g.

Esta constatação está de acordo com Krokida e Maroulis (1997), segundo os quais a densidade aparente ou densidade “bulk” do material é fortemente influenciada pelo modo de secagem. A inclusão do vácuo ao processo tende a diminuir o valor desta propriedade, uma vez que a diferença de pressão imposta pelo vácuo pode causar uma expansão do material (Lin *et al.*, 1998).

A Figura 4.15 apresenta a evolução da densidade aparente para o mesmo modo de secagem e diferentes potências, mostrando o efeito da potência no processo.

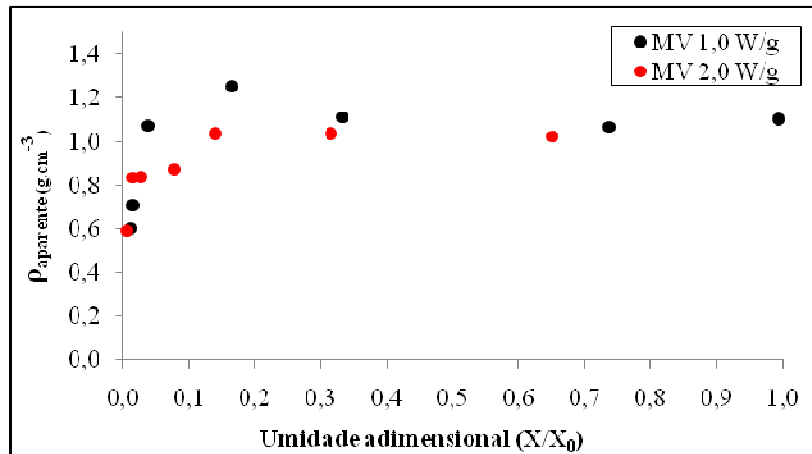


Figura 4.15: Densidade aparente em função da umidade adimensional ( $X/X_0$ ) para secagem de cenoura em microondas a vácuo (MV) a 2,0 W/g e 1,0 W/g de potência.

Esta figura mostra que a mudança de potência no processo de secagem em microondas a vácuo não refletiu em alteração do comportamento da densidade aparente em função do teor de umidade. A mudança na potência utilizada durante a secagem também não modificou a tendência de elevação da densidade aparente da cenoura, para este modo de secagem.

#### *Densidade real ou densidade da partícula*

Os efeitos, tanto do modo de secagem quanto da potência utilizada, na evolução da densidade real em função do teor de umidade foram semelhantes aos efeitos apresentados para a densidade aparente. Na Figura 4.16 são apresentados os valores da  $\rho_{real}$ , para secagem em microondas e em microondas a vácuo em função da umidade adimensional, para a potência de 1,0 W/g, a fim de se observar o efeito do modo de secagem no comportamento da  $\rho_{real}$ .

É observado uma diminuição da densidade real em função do teor de umidade para a secagem em microondas a vácuo, principalmente ao final do processo. Ao passo que, para a secagem em microondas ocorreu um leve aumento desta propriedade ao final da secagem.

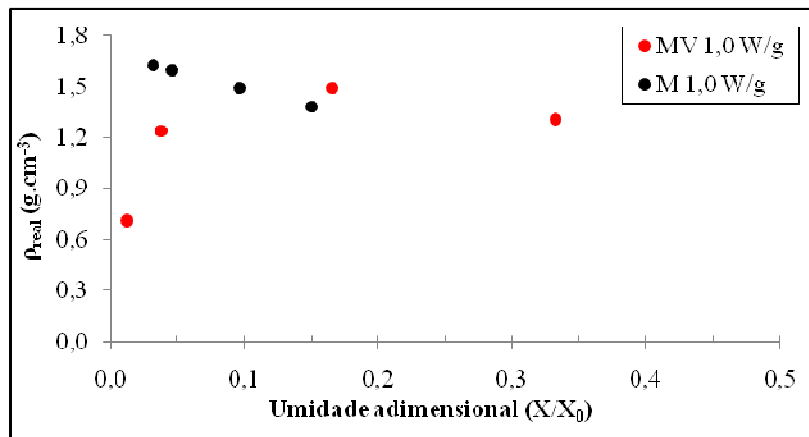


Figura 4.16: Densidade real em função da umidade adimensional ( $X/X_0$ ) para secagem de cenoura em microondas (M) e em microondas a vácuo (MV) a 1,0 W/g de potência.

A Figura 4.17 foi construída para a visualização do efeito da potência utilizada, durante a secagem em microondas, no comportamento da densidade real. Não foi observado efeito importante nesta avaliação, ou seja, para as duas potências utilizadas, 1,0 W/g e 2,0 W/g, a densidade real apresentou comportamento semelhante. Esta propriedade foi praticamente constante ao longo da secagem. Para a secagem em microondas a vácuo foi observado o mesmo comportamento, ou seja, o comportamento da densidade real não se alterou com a mudança na potência utilizada.

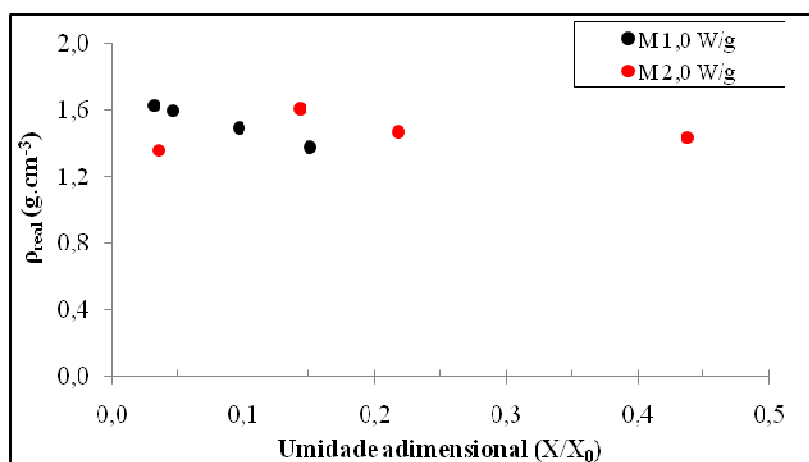


Figura 4.17: Densidade real em função da umidade adimensional ( $X/X_0$ ) para a secagem de cenoura em microondas (M) a 2,0 W/g e 1,0 W/g de potência.

- **Encolhimento**

O volume das amostras ao longo da secagem foi determinado por picnometria líquida, como descrito no Capítulo 3. A Tabela 4.10 apresenta o volume final médio em relação ao volume inicial.

Tabela 4.10: Volume final em relação ao volume inicial da cenoura para diferentes modos de secagem.

<i>Modo de secagem</i>	<i>Volume final (%)</i>	
<i>Microondas</i>	1,0 W/g	5,9
	2,0 W/g	8,9
<i>Microondas a vácuo</i>	1,0 W/g	7,6
	2,0 W/g	12,2

Analisando os números apresentados na Tabela 4.10, constata-se que com o aumento da potência, em um mesmo modo de secagem, ocorre uma pequena redução no encolhimento sofrido pela cenoura. Esta redução no encolhimento pode estar relacionada ao fato de que a secagem com potência de 2,0 W/g é mais rápida e para secagens mais rápidas o encolhimento é menos pronunciado do que para secagens lentas.

É possível notar também que uma pequena redução no encolhimento foi obtida quando a secagem foi em microondas a vácuo. Este fato se relaciona a expansão citada por Lin *et al.* (1998), quando a secagem é feita sobre condição de vácuo devido a diferença de pressão. Esta expansão é também chamada de efeito de “puffing”.

O coeficiente de encolhimento ( $V/V_0$ ) foi calculado a partir dos volumes obtidos ao longo da secagem. Os valores obtidos foram ajustados ao modelo linear em função da umidade proposto por Lozano *et al.* (1983).

A Tabela 4.11 apresenta os valores de correlação linear para cada condição de secagem. Para a secagem em microondas a vácuo, os valores do coeficiente de correlação foram um pouco menores do que os apresentados para a secagem em microondas. Mas de modo geral, os altos coeficientes de correlação indicam que o encolhimento de cenoura apresenta comportamento linear proporcional ao teor de umidade retirado durante a secagem.

Tabela 4.11: Coeficiente de correlação entre os valores experimentais observados e o modelo linear proposto por Lozano *et al.*(1998).

<i>Modo de secagem</i>		<i>Coeficiente de correlação R<sup>2</sup></i>
<i>Microondas</i>	1,0 W/g	0,95
	2,0 W/g	0,97
<i>Microondas a vácuo</i>	1,0 W/g	0,92
	2,0 W/g	0,94

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam a localização dos dados experimentais em relação ao modelo linear ajustado, para a secagem a potência de 2,0 W/g em microondas e em microondas a vácuo, respectivamente. Nota-se que os dados experimentais, para a secagem em microondas apresentados na Figura 4.18, distanciam-se menos dos valores previstos pelo modelo linear de encolhimento do que os dados experimentais para a secagem em microondas a vácuo, apresentados na Figura 4.19, principalmente ao final da secagem com umidade inferior a 0,1.

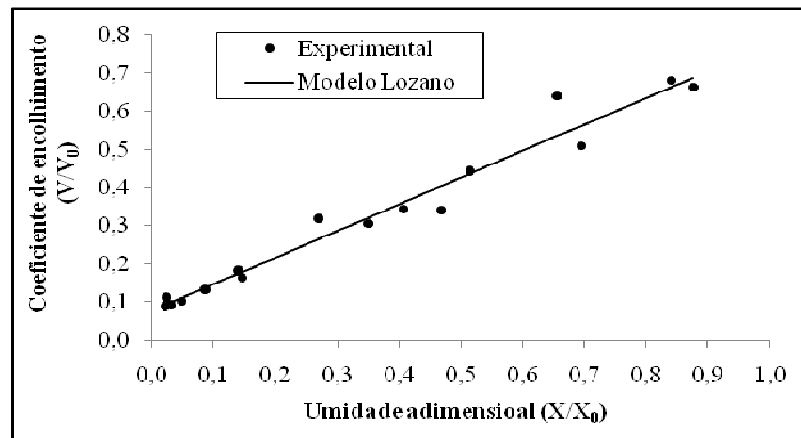


Figura 4.18: Coeficiente de encolhimento em função da umidade adimensional (X/X<sub>0</sub>) para secagem de cenoura em microondas e 2,0W/g de potência.

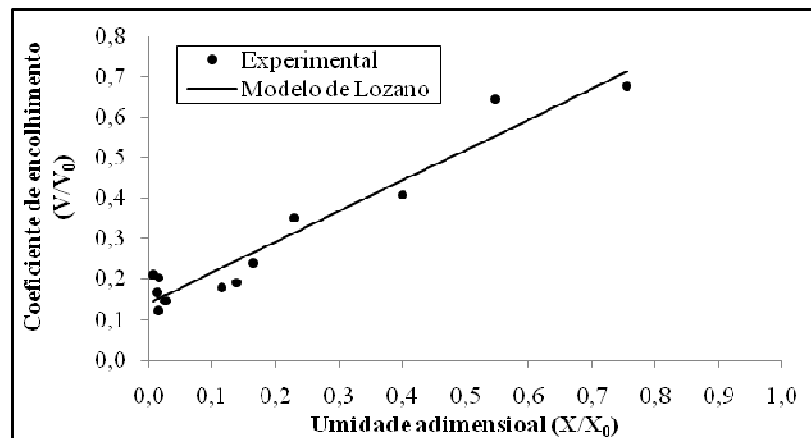


Figura 4.19: Coeficiente de encolhimento em função da umidade adimensional (X/X<sub>0</sub>) para secagem de cenoura em microondas a vácuo e 2,0W/g de potência.

Uma análise conjunta da diferença entre o comportamento do coeficiente de encolhimento, na secagem em microondas e em microondas a vácuo, e da diferença do comportamento da densidade aparente apresentado na Figura 4.14, indicam um pequeno desvio da linearidade de encolhimento da cenoura submetida à secagem em microondas a vácuo. Sendo assim, a redução no volume é menor do que a água removida e o surgimento de espaços vazios no interior da amostra ocasionam a redução da densidade aparente.

Os resultados obtidos para a porosidade da cenoura quando submetida à secagem também reforçam a teoria de que para a secagem em microondas a vácuo, ocorre um pequeno desvio da linearidade do coeficiente de encolhimento em função da umidade e serão discutidos no próximo tópico.

- **Porosidade**

Os valores experimentais obtidos para a porosidade da cenoura ao longo da secagem estão diretamente relacionados àqueles referentes às densidades aparente e real, uma vez que são calculados a partir de seus valores de acordo com a equação 2.12. Eles ainda fornecem informações a respeito do encolhimento sofrido pelo material no decorrer da secagem. Neste trabalho, foram calculadas as porosidades, ao longo da secagem, porém somente a partir do ponto em que a umidade das amostras era inferior a 30% (b.u).

A Tabela 4.12 apresenta os valores para a porosidade final em diferentes condições de secagem. Lembrando que estes valores são a média de duas determinações.

Tabela 4.12: Porosidade final da cenoura para secagem em microondas e em microondas a vácuo nas potências de 1,0 W/g e 2,0 W/g.

<i>Modo de secagem</i>	<i>Potência</i>	<i>Porosidade final</i>
<i>Microondas</i>	<i>1,0 W/g</i>	0,101
	<i>2,0W/g</i>	0,118
<i>Microondas a vácuo</i>	<i>1,0 W/g</i>	0,417
	<i>2,0 W/g</i>	0,321

Verifica-se, a partir da observação dos valores presentes na Tabela 4.12, que a variação da potência durante a secagem, praticamente não influenciou a porosidade final e que a secagem em microondas a vácuo proporcionou um produto final com maior porosidade quando comparada a secagem em microondas.

Esta observação está de acordo com o encolhimento observado e com a diminuição da densidade aparente para a secagem em microondas a vácuo. Ou seja, durante a

secagem em microondas a vácuo, o encolhimento é menor do que o volume de água retirada do material e a densidade aparente diminui, o que resulta em aumento da porosidade. Segundo Madiouli *et al.* (2007), durante a secagem, quando a redução do volume é menor do que a quantidade de água retirada, é gerado um aumento na porosidade do material. Esta afirmação reforça o deslocamento do coeficiente de encolhimento do comportamento linear, ao final da secagem por microondas a vácuo.

Além disso, a secagem em condição de vácuo pode gerar uma expansão no produto proporcionando um produto final mais poroso do que aquele obtido pela secagem em microondas, no qual não há expansão. O aumento da porosidade final do produto pode significar aumento da sua capacidade de reidratação. No entanto, Lozano *et al.* (1980) chamam a atenção para o fato de que, em materiais biológicos como a cenoura, podem haver dois tipos de poros, aqueles conectados externamente e poros fechados no interior da estrutura do material. A presença de poros fechados não implica em maior facilidade de reidratação.

- **Teor de  $\beta$ -caroteno**

O teor de  $\beta$ -caroteno foi determinado nas amostras de cenoura “in natura” e após os diversos experimentos de secagem. O objetivo desta análise foi avaliar os efeitos do aumento da potência e do modo de secagem na deterioração deste importante componente nutricional da cenoura.

A Tabela 4.13 apresenta os teores de  $\beta$ -caroteno por massa de matéria seca obtidos em cromatografia líquida de alta eficiência pelo método descrito no Capítulo 2.

Tabela 4.13: Teor de  $\beta$ -caroteno ao final de diferentes processos de secagem.

<i>Modo de secagem</i>		<i><math>\beta</math>-caroteno (mg/g de matéria seca)</i>	<i>% de degradação de <math>\beta</math>-caroteno</i>
<i>Microondas</i>	1,0 W/g	2,375	6,6
	2,0 W/g	1,478	41,9
<i>Microondas a vácuo</i>	1,0 W/g	2,032	20,1
	2,0 W/g	0,905	64,4
<i>"In natura"</i>	–	2,543	-

Com base no teor de  $\beta$ -caroteno da cenoura “in natura” apresentado na Tabela 4.13 e na sua umidade inicial, 93,7% b.u., foi calculado o teor de  $\beta$ -caroteno em mg /100 g de cenoura crua para efeito de comparação com os dados da literatura. O valor encontrado, que



foi igual a 16 mg/ 100 g de cenoura crua, está acima daquele registrado que é entre 2 e 10 mg/100 g de cenoura crua.

Ao analisar os valores apresentados na Tabela 4.13 para os diferentes modos de secagem, observa-se que o teor final de  $\beta$ -caroteno foi dependente da potência e do modo de secagem utilizados. A deterioração de  $\beta$ -caroteno aumentou com aumento da potência em um mesmo modo de secagem. Como exemplo, para microondas a 1,0 W/g de potência foi de 6,6% e a 2,0 W/g de potência foi igual a 41,9%. O aumento da deterioração do  $\beta$ -caroteno com o aumento da potência utilizada pode ser atribuído a maior oxidação da estrutura insaturada do  $\beta$ -caroteno com o aumento da temperatura. Além disso, a grande variação na degradação deste componente com o aumento da potência reforça a sua alta sensibilidade ao aumento da temperatura.

Comparando-se o modo de secagem, a secagem em microondas proporcionou um produto final mais rico em  $\beta$ -caroteno. Durante a secagem em microondas a 1,0 W/g de potência, a perda de  $\beta$ -caroteno foi de 6,6% enquanto que para a mesma potência em microondas a vácuo a perda deste nutriente foi de 20%. O mesmo comportamento foi observado para a potência de 2,0 W/g. Para esta potência, a secagem em microondas proporcionou 41,9% de deterioração e já a secagem em microondas a vácuo causou a perda de 64,4% do  $\beta$ -caroteno inicial.

## **4.4 Reidratação**

### **4.4.1 Cinética de reidratação**

A Figura 4.20 apresenta as curvas de reidratação obtidas para a cenoura submetida a diferentes modos de secagem, secagem em microondas e microondas a vácuo, em diferentes potências. Inicialmente, nas primeiras 10 horas de reidratação observa-se um significativo aumento na razão de reidratação e à medida que o processo se aproxima do equilíbrio, o aumento na razão de reidratação tende a diminuir. Este comportamento foi também observado por Krokida e Marinos-Kouris (2003) para diferentes vegetais e por Marques *et al.* (2009) para frutas tropicais.

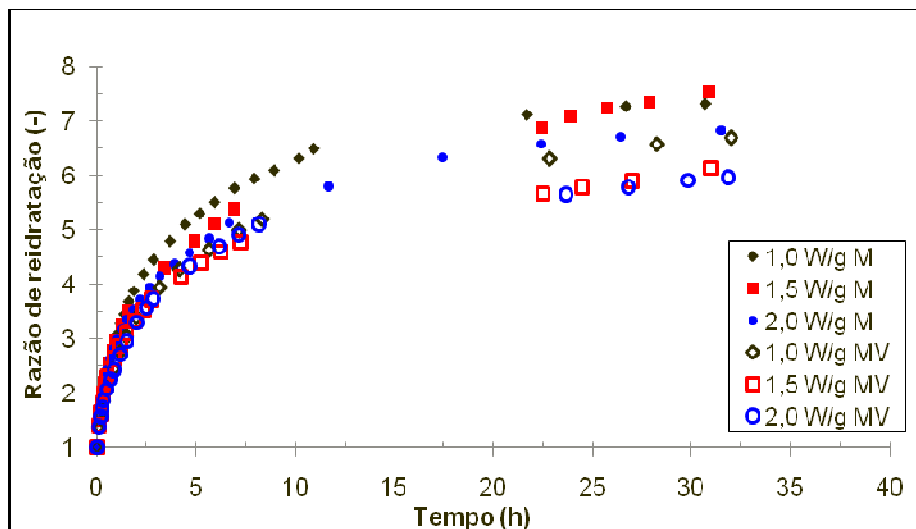


Figura 4.20: Razão de reidratação em função do tempo para cenoura em diferentes modos de secagem e potências.

Além disso, é possível observar nesta figura o efeito do modo de secagem e da potência utilizada na velocidade de reidratação. Não é verificada diferença significativa para a velocidade de reidratação nos diferentes modos de secagem e potência utilizados, especialmente nas dez horas iniciais. Apesar de a cenoura seca a vácuo apresentar maior porosidade, isto não foi refletido na sua habilidade de reidratar-se. Esta maior porosidade pode, então, estar relacionada com danos a estrutura celular. Durante a secagem é estabelecida uma tensão celular que torna a célula “rasgada” e com estrutura mais aberta e porosa (Zogzas *et al.*, 1994).

Comparando-se, na Figura 4.20, a cinética de reidratação para diferentes potências utilizadas, apesar de a diferença não ser expressiva, a potência de 2,0 W/g foi a que proporcionou menor velocidade de reidratação, tanto para a secagem em microondas como em microondas a vácuo. Este resultado pode ser um indicativo de que esta potência causa maiores danos à estrutura do material e o seu uso, apesar de proporcionar uma secagem mais rápida deve ser analisado com cautela.

A Tabela 4.14 apresenta a razão de reidratação (RR) final média para cada modo de secagem e potência utilizada.

Tabela 4.14: Razão de reidratação e desvios para diferentes condições de secagem.

<i>Modo de secagem</i>	<i>Potência (W/g)</i>	<i>RR (-)</i>
<i>Microondas</i>	<i>1,0</i>	<i>7,307 ± 0,150</i>
	<i>1,5</i>	<i>7,618 ± 0,098</i>
	<i>2,0</i>	<i>6,815 ± 0,064</i>
<i>Microondas a vácuo</i>	<i>1,0</i>	<i>6,687 ± 0,252</i>
	<i>1,5</i>	<i>6,135 ± 0,431</i>
	<i>2,0</i>	<i>5,964 ± 0,226</i>

A razão de reidratação variou entre 5,964 e 7,522. Estes valores estão próximos àqueles encontrados na literatura, mas o processo foi muito lento. A razão máxima de reidratação de cenoura liofilizada encontrada por Stępień (2008) foi de aproximadamente 6,4. No entanto, o equilíbrio foi atingido em apenas 5 horas. Isto é compreensivo, uma vez que a liofilização é tida como método de secagem que causa menos danos a estrutura dos materiais.

As equações semi-empíricas utilizadas para descrever o processo de reidratação e apresentadas no Quadro 2.4 foram ajustadas aos dados experimentais. Os resultados da estimação não linear dos parâmetros, do coeficiente de correlação entre os dados experimentais e os valores previstos pelas equações, a soma dos quadrados dos resíduos e o desvio relativo médio são colocados nas Tabelas 4.15, 4.16 e 4.17 para cada equação semi-empírica.

Tabela 4.15: Parâmetros da equação exponencial.

<b>Modo de secagem</b>	<b>Potência (W/g)</b>	<b>RR<sub>e</sub></b>	<b>w</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>SQR</b>	<b>DVM (%)</b>
<i>Microondas</i>	<i>1,0</i>	<i>6,615</i>	<i>0,364</i>	<i>0,959</i>	<i>3,965</i>	<i>3,3</i>
	<i>1,5</i>	<i>7,032</i>	<i>0,267</i>	<i>0,944</i>	<i>5,149</i>	<i>15,1</i>
	<i>2,0</i>	<i>6,334</i>	<i>0,354</i>	<i>0,919</i>	<i>4,549</i>	<i>12,6</i>
<i>Microondas a vácuo</i>	<i>1,0</i>	<i>6,260</i>	<i>0,260</i>	<i>0,963</i>	<i>2,239</i>	<i>9,4</i>
	<i>1,5</i>	<i>5,606</i>	<i>0,347</i>	<i>0,942</i>	<i>2,016</i>	<i>11,1</i>
	<i>2,0</i>	<i>5,638</i>	<i>0,334</i>	<i>0,974</i>	<i>1,423</i>	<i>8,3</i>

Tabela 4.16: Parâmetros da equação de Peleg.

Modo de secagem	Potência (W/g)	RR <sub>e</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	SQR	DVM (%)
<i>Microondas</i>	1,0	7,773	0,156	0,462	0,997	0,341	3,3
	1,5	8,070	0,153	0,651	0,989	0,955	7,6
	2,0	7,219	0,176	0,615	0,987	0,720	6,2
<i>Microondas a vácuo</i>	1,0	7,191	0,169	0,668	0,996	0,246	4,1
	1,5	6,313	0,203	0,607	0,991	0,439	5,1
	2,0	6,294	0,198	0,554	0,998	0,129	2,8

Tabela 4.17: Parâmetros da equação de Weibull.

Modo de secagem	Potência (W/g)	RR <sub>e</sub>	ψ	Θ	R <sup>2</sup>	SQR	DVM (%)
<i>Microondas</i>	1,0	6,615	0,029	0,079	0,959	3,965	9,8
	1,5	7,032	0,247	0,925	0,944	5,149	15,1
	2,0	6,133	0,267	0,755	0,919	4,549	13,4
<i>Microondas a vácuo</i>	1,0	6,268	0,303	1,165	0,963	2,239	11,3
	1,5	5,606	0,034	0,099	0,942	2,016	11,6
	2,0	5,639	0,071	0,213	0,974	1,423	8,6

Dentre as equações apresentadas a que melhor descreve o processo de reidratação de cenouras secas em microondas e microondas a vácuo é a equação de Peleg (equação 2.23). Para esta equação foram obtidos os maiores valores do coeficiente de correlação. Este valor foi muito próximo ou na maioria dos casos maior do que 0,990. Além disso, o ajuste dos dados experimentais a esta equação resultou em menor soma dos quadrados dos resíduos e também desvios relativos médios inferiores a 10%.

Pela análise dos parâmetros estimados percebe-se que os valores apresentados para k<sub>1</sub>, constante cinética (h.g matéria seca/g de água), e para k<sub>2</sub>, que relaciona-se a máxima capacidade de reidratação (g de matéria seca/g de água), em todas as condições de secagem foram próximos. Isto indica, como previsto anteriormente, que a variação do modo de secagem e da potência utilizada não exerce grande influência nem na velocidade de reidratação e nem na capacidade máxima de reidratação de cenoura.

#### 4.4.2 Índices de reidratação

As características da reidratação da cenoura foram observadas a partir dos experimentos de reidratação realizados como descrito no Capítulo 2. A razão de reidratação

(RR) e os índices WAC, DHC e RA foram calculados para verificar o comportamento da reidratação de cenouras e analisar os efeitos das diferentes condições de secagem utilizadas neste processo. Ao mesmo tempo, pode-se comparar a extensão dos danos causados à estrutura da cenoura para as secagens em microondas e em microondas a vácuo.

A Tabela 4.18 apresenta os valores médios e os desvios dos índices utilizados para verificar as características de reidratação da cenoura. A partir dos valores de WAC apresentados nesta tabela, é possível observar que a secagem, tanto em microondas como em microondas a vácuo, provoca danos a estrutura do material, uma vez que a cenoura seca não apresentou completa restituição da água retirada durante a secagem para nenhum dos modos de operação. A capacidade de restauração da quantidade de água perdida durante a secagem variou entre 79,3% e 54,6%, sendo o maior valor obtido para cenoura submetida à secagem em microondas e potência de 1,0 W/g. Já a menor capacidade de restauração ocorreu para o mesmo modo de secagem, mas com 1,5 W/g de potência.

Tabela 4.18: Índices de reidratação para cenoura seca em microondas e em microondas a vácuo.

<i>Modo de secagem</i>	<i>Potência</i>	<i>WAC</i>	<i>DHC</i>	<i>RA</i>
<i>Microondas</i>	<i>1,0 W/g</i>	$0,793 \pm 0,017$	$0,552 \pm 0,007$	$0,438 \pm 0,015$
	<i>1,5 W/g</i>	$0,546 \pm 0,036$	$0,527 \pm 0,019$	$0,288 \pm 0,025$
	<i>2,0 W/g</i>	$0,618 \pm 0,007$	$0,420 \pm 0,008$	$0,260 \pm 0,003$
<i>Microondas a vácuo</i>	<i>1,0 W/g</i>	$0,592 \pm 0,024$	$0,528 \pm 0,009$	$0,313 \pm 0,017$
	<i>1,5 W/g</i>	$0,598 \pm 0,020$	$0,422 \pm 0,003$	$0,252 \pm 0,010$
	<i>2,0 W/g</i>	$0,626 \pm 0,027$	$0,508 \pm 0,005$	$0,318 \pm 0,015$

O esperado seria que as amostras submetidas à secagem em microondas a vácuo apresentassem maior capacidade de absorção de água devido a sua estrutura mais porosa. No entanto, isto não foi observado. Ao construir gráficos de barras com os valores de WAC e da porosidade para os diferentes modos de secagem, não foi possível estabelecer nenhuma relação direta entre a porosidade e a capacidade de absorção de água. Estes gráficos são mostrados na Figura 4.21. Neles estão os valores médios observados para a capacidade de absorção de água (WAC) e porosidade para secagem em microondas e microondas a vácuo nas potências de 1,0 e 2,0 W/g e seus respectivos desvios padrões.

A falta de relação entre a porosidade apresentada pela cenoura e a sua capacidade de reidratação pode ser atribuída à presença de poros fechados, no interior da

estrutura do material, e que não têm ligação com o meio externo. Estes poros diferentemente dos poros conectados externamente, não favorecem o processo de reidratação. A baixa capacidade de restauração da água perdida durante a secagem, apesar da porosidade relativamente alta, indica que a estrutura mais aberta, portanto mais porosa, da cenoura seca é resultante das fissuras na estrutura do material causadas pela tensão celular que ocorre durante a secagem, conforme descrito por Zogzas *et al.* (1994).

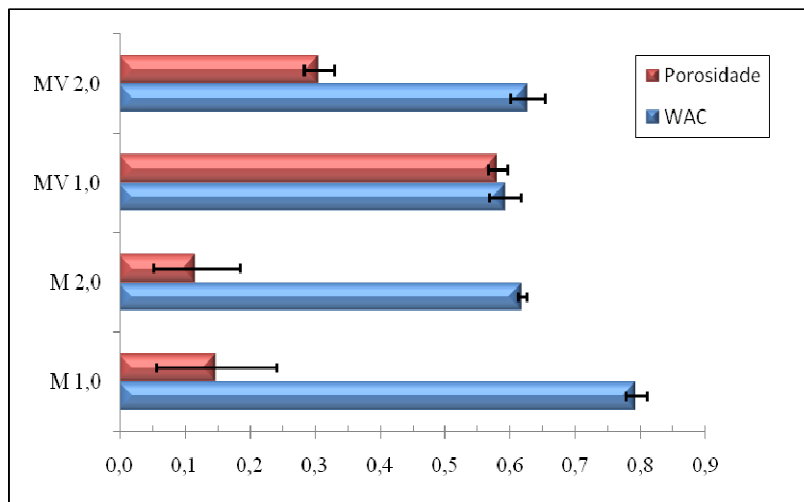


Figura 4.21: Capacidade de absorção de água e porosidade em função do modo de secagem e potência utilizada. Sendo (M) microondas e (MV) microondas a vácuo.

O índice DHC, que representa a capacidade de retenção de sólidos solúveis, variou entre 55,2% e 40,2%. Estes valores indicam que ocorre a lixiviação de solutos durante a reidratação de cenoura. A pequena variação deste índice ao se comparar os diferentes modos de secagem e diferentes potências utilizadas indica não haver relação entre a capacidade de reter sólidos solúveis e a forma ou potência de secagem.

A capacidade de reidratação (RA) obtida pela multiplicação dos dois índices anteriores e que informa sobre os efeitos combinados do processo de secagem e reidratação variou entre 43,8% e 25,2%. Através da relação entre os três índices não é possível precisar qual processo tem maior interferência na capacidade de reidratação, se é a lixiviação de solutos ou a capacidade de absorção de água.

Não é possível estabelecer relação entre o modo de secagem e potência aplicada com a capacidade de reidratação. Uma comparação entre as diferentes potências para a secagem em microondas indica que a menor potência causa menos danos à estrutura, pois com o aumento da potência houve diminuição da capacidade de reidratação. Porém, para a

secagem em microondas a vácuo este comportamento não foi observado. A melhor reidratação foi observada para a maior potência seguida da menor potência e a pior capacidade de reidratação foi obtida para a potência intermediária.

## 5. Conclusões

Tendo em vista os objetivos propostos, os dados experimentais obtidos e a discussão dos resultados apresentada, algumas conclusões podem ser formuladas.

Com relação à secagem de cenoura em microondas e aos fatores relacionados a este processo, conclui-se que a forma de corte da amostra exerce grande influência sobre a velocidade de secagem. A forma cúbica, devido a sua menor densidade de potência absorvida, deve ser evitada, pois proporciona uma secagem mais demorada em relação às outras formas utilizadas. Além disso, com base na cinética de secagem obtida para a forma de palito chega-se à conclusão de que essa deficiência em absorção de microondas apresentada pelas formas retangulares pode ser anulada com o aumento da área disponível a incidência de microondas.

A diferença entre o efeito da forma observado na cinética de secagem em convecção forçada, ou seja, a maior velocidade de secagem apresentada pela forma de cubo, evidencia que os fenômenos de transporte envolvidos neste modo de secagem são diferentes daqueles envolvidos na secagem em microondas. Outro fator relevante quanto a isso é que para cada modo de secagem existe uma forma de corte que favorece o processo e este fato deve ser observado ao se determinar as condições de secagem em cada secador.

Quanto à potência utilizada na secagem de cenouras em microondas, o aumento do seu valor implicou em aceleração do processo de secagem. No entanto, maior potência resultou em produto de menor qualidade nutricional. O aumento da potência, segundo os experimentos realizados neste trabalho, não exerceu influência na capacidade de reidratação da cenoura. Portanto, como a secagem de cenoura em microondas, mesmo para a menor potência utilizada neste trabalho, foi um processo relativamente rápido, não é indicado que se use a potência de 2,0 W/g devido à maior deterioração de  $\beta$ -caroteno ocasionada por essa condição.

Com base nos resultados obtidos para a secagem em microondas e em microondas a vácuo, conclui-se que a associação do vácuo a microondas não acelerou a cinética de secagem de cenouras e também não aumentou a qualidade do produto final. É verdade que a secagem em microondas a vácuo proporcionou menor encolhimento e maior porosidade da cenoura seca. Entretanto, estas características em nada influenciaram a capacidade de reidratação. A esse resultado soma-se o fato de que a secagem em microondas a vácuo não resultou em maior conservação do  $\beta$ -caroteno, permitindo concluir que o uso do



vácuo na secagem de cenoura em microondas, como executado neste trabalho, não conduziu a melhores resultados práticos.

Quanto aos diferentes modelos utilizados para descrever os diferentes processos pode-se concluir que:

- o processo de dessorção de cenoura pode ser descrito pela equação proposta por GAB e também pela equação de Halsey modificada. O uso desta última equação é vantajoso pelo fato de prever a umidade de equilíbrio em diferentes potências, o que implica em menor número de experimentos.
- a cinética de secagem de cenoura em microondas e em microondas a vácuo é melhor descrita pelo modelo de Page em relação ao modelo de Lewis.
- a cinética de reidratação da cenoura seca em microondas e microondas a vácuo pode ser descrita pela equação de Peleg.

## 6. Sugestões

Para dar continuidade a este trabalho sugere-se que se faça:

- uma saída de água no dessecador, utilizado na secagem em microondas a vácuo,
- o monitoramento da temperatura durante a secagem de cenoura em microondas,
- a instrumentação do forno de microondas de modo que seja possível a tomada de massa das amostras sem que haja interrupção do processo de secagem,
- a liofilização de cenouras e a comparação entre a degradação nutricional e as características de reidratação de cenouras liofilizadas e secas em microondas e
- estudo da temperatura de transição vítrea da cenoura a fim de investigar o colapso causado na estrutura do material durante a secagem.

## Referências bibliográficas

- AMBROSIO, C. L. B.; CAMPOS, F. A. C. S.; FARO, Z. P.. Carotenóides como alternativa a hipovitaminose A. **Revista de Nutrição**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 233-243, 2006.
- BAO, B.; CHANG, K. C.. Carrot juice color, carotenoids, and nonstarchy polysaccharides as affected by processing conditions. **Journal of Food Science**, v. 59, p. 1155–1158, 1994.
- BARROZO, M. A. S.. **Transferência de calor e massa entre o ar e semente de soja em leite deslizante e escoamento cruzado**. 1995. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.
- BAUERNFEIND, J. C.. Carotenoid vitamin A precursors and analogs in food and feeds. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 20, p. 456-473, 1972.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W.. *Drying Cereal Grains*. Inc. Westport, CN, **The Avi Publishing Company**, 265p., 1974.
- BUREAU, J. L.; BUSHWAY, R. J.. HPLC determination of carotenoids in fruits and vegetables in the United States. **Journal of Food Science**, v. 51, p. 128–130, 1986.
- CAMPANÕNE, L. A.; ZARITZKY, N. E.. Mathematical analysis of microwave heating process. **Journal of Food Engineering**, v. 69, p. 359–368, 2005.
- COSTA, J. M. C.; MEDEIROS, M. F. D.; MATA, A. L. M. L.. Isotermas de adosção de pós de beterraba (*Beta vulgaris L.*), abóbora (*Cucurbita moschata*) e cenoura (*Daucus carota*) obtidas pelo processo de secagem em leite de jorro: estudo comparativo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 34, n. 1, 2003.
- CUI, Z.; XU, S.; SUN, D.. Microwave vacuum drying kinetics of carrot slices. **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 157-164, 2004.
- DOYMAZ, I.. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. **Journal of Food Engineer**, v. 61, p. 359-364, 2004.
- DANDAMRONGRAK, R.; YOUNG, G.; MASON, R.. Evaluation of various pretreatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. **Journal of Food Engineering**, v. 55, p.139-146, 2002.
- EMBRAPA. **Cultivo da Cenoura**. Disponível em: <http://www.cnph.embrapa.br/sistprod/cenoura/index.htm> acessado em 23/08/2008.

- EMBRAPA, **Situação de Produção de Hortaliças no Brasil – 2008**. Disponível em: <[http://www.cnph.embrapa.br/paginas/hortalicas\\_em\\_numeros/hortalicas\\_em\\_numeros.htm](http://www.cnph.embrapa.br/paginas/hortalicas_em_numeros/hortalicas_em_numeros.htm)> acessado dia 27/08/2009.
- EVANGELISTA, J.. **Tecnologia de Alimentos**. 2ª Edição. São Paulo: Livraria Atheneu Editora, 1992, 652 p..
- FORTES M.; OKOS, M. R.. Drying theories: their Bases and Limitations as Applied to Food and Grains. In: **Advances in Drying**. Washington: Ed. Arum S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation, v.1, p. 119-154, 1980.
- FUMAGALLI, F. **Secagem de pêra em secador a microondas**. 2003. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.
- GÓRNICKI, K.; KALETA A.. Drying curve modeling of blanched carrots cubes under natural convection. **Journal of Food Engineer**, v. 82, p. 160-170, 2007.
- HIRANVARACHAT, B.; SUVARNAKUTA, P.; DEVAHASTIN, S.. Isomerisation kinetics and antioxidant activities of  $\beta$ -carotene in carrots undergoing different drying techniques and conditions. **Food Chemistry**, v. 107, p. 1538-1546, 2008.
- KAMINSKI, W.; KUDRA, T.. Equilibrium moisture relations for food and biomaterials. In: **Drying Technology in Agriculture and Food Sciences**. Enfield (NH) USA: Ed. Arum S. Mujumdar, Science Publishers, 2000. p. 1-34.
- KEEY, R. B.. **Drying: principles and practice**. Oxford: Pergamon Press, 1975, p. 358. (International Series of Monographs in Chemical Engineering).
- KEEY, R. B.. In: \_\_\_\_\_. **Drying of loose and particulate material**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992, p. 215-251.
- KOMPANY, E.; BENCHIMOL, J.; ALLAF, K.; AINSEBA, B.; BOUVIER, J. M.. Carrot dehydration for instant rehydration: Dehydration kinetics and modeling. **Drying Technology**, v. 11, n. 3, p. 451-470, 1993.
- KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v. 15, n. 1, p. 2441-2458, 1997.
- KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.. Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products. **Drying Technology**, v. 17, n. 3, p. 449-466, 1999.
- KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z.. Quality changes during drying of food materials. In **Drying Technology in Agriculture and Food Sciences**. Enfield (NH) USA: Ed. Arum S. Mujumdar, Science Publishers, 2000. p. 61-106.

- KROKIDA, M. K.; MARINOS-KOURIS. Rehydration kinetics of dehydrated products. **Journal of Food Engineering**, v. 57, p. 1-7, 2003.
- LAHSANI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J. T.. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 173-179, 2004.
- LEWICKI, P. P.. Some Remarks on Rehydration of Dried Foods. **Journal of Food Engineering**, v. 36, p. 81-87, 1998.
- LEWIS, W. K.. The Rate of Drying of Solids Material. **The Journal of Industrial & Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427- 432, 1921.
- LIN T. M.; DURANCE T. D.; SCAMAN C. H.. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. **Food Research International**, v. 31, n. 2, p. 111-117, 1998.
- LOZANO, J. E., ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M. J.. Total porosity and open pore porosity in the drying of fruits. **Journal of Food Science**, v. 45, p. 1403-1407, 1980.
- LOZANO, J. E., ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M. J.. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture content. **Journal of Food Science**, v. 48, p. 1497-1502, 1983.
- MACHADO, M. F.; OLIVEIRA, F. A. R.; CUNHA, L. M.. Effect of milk fat and total solids concentration on the kinetics of moisture uptake by read-to-eat breakfast cereal. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 34, n. 1, p. 47-57, 1999.
- MADIULOI, J.; LECOMTE, D.; NAGANYA, T.; CHAVES, S.; SGHAIER, J.; SAMMOUDA, H.. A method for determination of porosity change from shrinkage curves of deformable materials. **Drying Technology**, v. 25, p. 621-628, 2007.
- MAHAN, L. K.; ESCOTT-STUMP, S.. **Krause: Alimentos, nutrição & dietoterapia**. Tradução de Alessandra Favano. 9ª Edição. São Paulo: Roca, 1179 p., 1996.
- MARABI, A.; LIVINGS, S.; JACOBSON M.; SAGUY, I. S.. Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. **European Food and Research Technology**, v. 217, p. 311-318, 2003.
- MARQUES, L. G., PRADO M. M.; FREIRE J. T.. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. **LIHT – Food Science and Technology**, v. 42, p. 1232-1237, 2008.
- MAZZA, G.; LEMAGUER M.. Dehydration of onion: some theoretical and practical consideration. **Journal of Food Technology**, v. 15, p. 181-194, 1980.

- MELONI, P. L. S.. Desidratação de frutas e Hortaliças. In: Semana Internacional da Fruticultura, Floricultura e Agroindústria, 10, 2003, Ceará, **Anais...** Ceará: Instituto Frutal, 2003.
- MIHOUBI, D.; TIMOUMI S.; ZAGROUBA F.. Modeling of convective drying of carrot slices with IR heat source. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, p. 808-815, 2009.
- MUJUMDAR, A. S.; MENON, A.. Drying of solids: Principles, Classification, and Selection of dryers. In: **Handbook of industrial drying**. 2<sup>a</sup> Edição. New York: Ed. Arum S. Mujumdar, Marcel Dekker, 1995. p. 1-39.
- MUJUMDAR, A. S.. Principles, Classification, and Selection of dryers. In: **Handbook of industrial drying**. 3<sup>a</sup> Edição. New York: Arum S. Mujumdar, Marcel Dekker, 2006. p. 4-32.
- MURAYAMA, S.. **Horticultura**. 2<sup>a</sup> Edição: Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1972. p. 692.
- NIJHUIS, H. H.; TORRINGA, H. M.; MURESAN, S.; YUKSEL, D.; LEGUIJT, C.; KLOEK, W.. Approaches to improve the quality of dried fruit and vegetables. **Trends in Food Science and Technology**, v. 9, p. 13-20, 1998.
- OSWIN, C. R.. The kinetics of package life III the isotherm. **Journal of Chemical Industry**, v. 65, p. 419-421, 1946.
- OVERHULTS, P. D.; WHITE, G. M.; HAMILTON, H. E.; ROSS, I. J.. Drying of soybeans with heated air. **Transactions of the ASAE**, 16, p. 112-113, 1973.
- PAN, Y. K.; ZHAO L. J.; DONG Z. X.; MUJUMDAR A. S.; KUDRA T.. Intermittent drying of carrot in a vibrated fluid bed: effect on product quality. **Drying Technology**, v. 17, n. 10, p. 2323-2340, 1999.
- PELEG, M.. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Science Food**, v. 53, n. 4, p. 1216-1219, 1988.
- PEREIRA, N. R.. **Estudo da aplicação de microondas na secagem de bananas tratadas osmoticamente**. 2007. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- PINEDO, A. A.; MURR F. E. X.. Influência da pressão, temperatura e pré-tratamentos na secagem a vácuo de cenoura e abóbora. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 4, 636-643, 2005.

- PINEDO, A. A.. **Secagem a vácuo de cenoura (*Daucus carota*) e abóbora (*Cucurbita máxima*)**: Estudo das características do Processo. 2003. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- PRABHANJAN, D. G.; RAMASWAMY, H. S.; RAGHAVAN, G.. Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. **Journal of Food Engineering**, v. 25, p. 283-293, 1995.
- PRAKASH S.; JHA K. S.; DATTA N.. Performance evaluation of blanched carrots dried by three different dries. **Journal of Food Engineer**, v. 62, p. 305-313, 2004.
- RIAMBAU, R.. La zanahoria en el mundo. **Horticultura - revista de hortaliças, flores, plantas ornamentales y viveros**, v.17, n. 3, p. 68-94, 1998.
- RYYNÄNEN, S.; RISMAN, P. O.; OLHSSON, T.. Hamburger composition and microwave heating uniformity. **Journal of food Science: Food Engineering and Physical Properties**, v. 69, n. 7, p. 187-196, 2004.
- SATO, S.. **Secagem de cenoura em leite vibro-fluidizado**. 2004. 102 f. Trabalho de Graduação – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- SCHIFFMANN, R. F.. Microwave and Dielectric Drying. In: **Handbook of industrial drying**. 2ª Edição. New York: Ed. Arun S. Mujumdar, Marcel Dekker, 1995. p. 345-372.
- SINGH, B.; MEHTA, S; GUPTA, A. K.. Electronic Journal of Environmental. **Agricultural and Food Chemistry**, v. 5, n. 4, p. 1464-1472, 2006.
- SOURAKI, B. A.; ANDRÉS, A.; MOWLA, D.. Mathematical modeling of microwave-assisted inert medium fluidized bed drying of cylindrical carrot samples. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, p. 296-305, 2009.
- STĘPIEŃ, B.. Effect of vacuum-microwave drying on selected mechanical and rheological properties of carrot. *Biosystems Engineering*, 99, p. 234-238, 2008.
- SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T.; HOSAKA, H.. Shrinkage in rehydration of root vegetables. **Journal of Food Science**, v. 41, p. 1189-1194, 1976.
- VACAREZZA, L. M.; LOMBARDI, J. L.; CHIRIFE, J.. Kinetics of moisture movement during drying of sugar beet root. **Journal of Food Technology**, v. 17, p. 317-327, 1974.

- YANG, H. W.; GUNASEKARAN, S.. Comparison of temperature distribution on model food cylinders based on Maxwell's equation and Lambert's law during pulsed microwave heating. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 4, p. 445-453, 2004.
- YUSHENG, Z.; POULSEN, K. P.. Diffusion in potato drying. **Journal of Food Engineering**, v. 7, n.4, p.249-262, 1988.
- WANG J.; XI Y. S.. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. **Journal of Food Engineer**, v. 68, p. 505-511, 2005.
- ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D.. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. **Drying Technology**, v. 12, n.7, p. 1653-1666, 1994.