

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

Adriana Silva

**ANÁLISE DA SECAGEM DE LIMÃO TAHITI (*Citrus Latifolia* - TANAKA) EM
FATIAS E DE SUAS FRAÇÕES: EPICARPO, MESOCARPO E ENDOCARPO**

**SÃO CARLOS - SP
2015**

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

Adriana Silva

**ANÁLISE DA SECAGEM DE LIMÃO TAHITI (*Citrus Latifolia* - TANAKA) EM
FATIAS E DE SUAS FRAÇÕES: EPICARPO, MESOCARPO E ENDOCARPO**

**Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Química, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do Título
de Mestre em Engenharia Química,
área de concentração em Pesquisa e
Desenvolvimento de Processos
Químicos.**

**Orientação: Prof^a Dr^a Maria do Carmo Ferreira
Coorientação: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire**

**SÃO CARLOS - SP
2015**

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

S586as Silva, Adriana.
Análise da secagem de limão tahiti (*Citrus latifolia* -
Tanaka) em fatias e de suas frações : epicarpo, mesocarpo
e endocarpo / Adriana Silva. -- São Carlos : UFSCar, 2015.
105 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2015.

1. Secagem. 2. Limão. 3. Fenômenos de transporte. I.
Título.

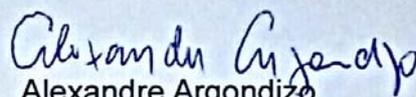
CDD: 660.28426 (20^ª)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE ADRIANA SILVA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 20 DE MARÇO DE 2015.

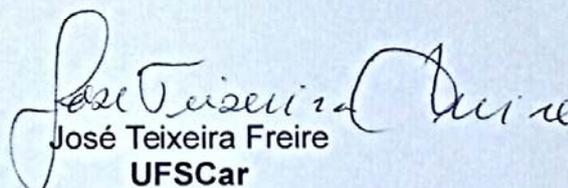
BANCA EXAMINADORA:



Maria do Carmo Ferreira
Orientadora, UFSCar



Alexandre Argondizo
UNIFESP



José Teixeira Freire
UFSCar

*Dedico este trabalho ao meu pai Doraci
Gabriel Silva (in memoriam) e a minha
mãe Rosmira das Graças de Paula Silva.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pelo dom da vida, pela saúde física e mental que me deu para que este trabalho fosse possível.

A minha rainha e amiga verdadeira numa pessoa só, que é a minha mãezinha, pelo amor incondicional e que em sua sabedoria e serenidade me motivou nos momentos mais difíceis, mesmo com todas as dificuldades financeiras me manteve com muita dignidade numa cidade diferente da minha. Serei eternamente grata por tudo que tem feito por mim a vida toda. Meu amor por ela é tão grande que não cabe em mim, espero um dia poder retribuir a ela tudo que me proporcionou. Sou feliz por ter nascido nesse lar cheio de amor. Sem ela eu nada seria.

Aos meus amados irmãos Anderson e André e meus sobrinhos e um pouco meus filhos Richard, Gabrielly, Ana Clara e Lívia, amo todos vocês, o amor inocente dessas crianças alimentam a minha alma de alegria todos os dias. Ao apoio que recebi de meu padastro Iarbas e das minhas queridas cunhadas Bruna e Karine, que cada um a seu modo me ajudaram de alguma forma. Minha família sempre foi e sempre será meu alicerce, obrigada pelo apoio, pelas companhias agradáveis, pela consideração, o amor e o carinho que sempre me dão de coração aberto.

Ao meu amado Aender Luis Guimarães, meu admirador e encorajador, pelo amor e demonstrações de afeto contínuas que me fortaleceram nessa caminhada, pelo companheirismo, incentivo, compreensão, amizade e amor. Aprendi muitas coisas com você que me fizeram ver o mundo de outro ângulo e me tornaram uma pessoa melhor. Sem falar das edições efetuadas neste trabalho que foram muito úteis e pelos ensinamentos dados para uma boa redação. Obrigada por sempre acreditar em mim.

Aos meus orientadores, professora Maria do Carmo Ferreira pelos ensinamentos, pela enorme paciência, dedicação e por sempre me orientar com profundo esmero, fui muito feliz em tê-la como orientadora. E ao professor Fábio

Bentes Freire, pela paciência, confiança, orientação, sua parceria fez este trabalho ainda melhor.

Aos professores do Centro de Secagem/DEQ/UFSCar, José Teixeira Freire, Dermeval José Mazzini Sartori, Ronaldo Guimarães Corrêa e Gustavo Maia, pelas colaborações e contribuições que muito acrescentaram no meu trabalho.

Ao professor Alexandre Argondizo por ter aceitado o convite para participar da minha defesa.

A todos meus parceiros e amigos do Centro de Secagem, Juliana, Geisa, Marcos, Tércio, Gustavo, Ariany, Robson, Aline, Maísa, Chaiane, Carlos e Edilson, que sempre estiveram dispostos a me ajudar de bom coração sempre que eu solicitava ajuda nos procedimentos técnicos e na manipulação dos softwares Matlab®, Origin®, Image-Pro Plus®. E também pela descontração na hora do cafezinho, que ocorria algumas vezes ao dia e pela companhia nas noites em que os experimentos se estendiam.

As minhas amigas de longa data, Marília Branquinho também parceira de apê, pelos perrengues que passamos juntas e Poliana Martimiano que sempre me deu apoio, mesmo à distância E os novos amigos que fiz em São Carlos como o meu casal preferido Conrado e Talitinha, Janete, Gabriel Justi, Homero Sena, Aurélia, Flávia Matias, Flavinha Prazeres e Aninha, entre tantos outros tão importantes quanto estes aqui. Obrigada pela amizade de vocês, cada um deu algo de si para mim e com todos vocês aprendi alguma coisa, vocês estarão sempre no meu coração meus queridos.

“Esforçai-vos e animai-vos; não temais, nem vos espanteis diante deles, porque o Senhor teu Deus é o que vai contigo, não te deixará nem te desampará.”

Deuteronômio 31:6

RESUMO

O limão tahiti pertence à família das Rutáceas, do gênero *Citrus*, à espécie *Citrus Latifolia*, da variedade Tanaka. É um fruto heterogêneo, formado por três frações distintas, sendo elas o epicarpo (casca externa), o mesocarpo (camada branca) e o endocarpo (polpa com gomos e vesículas contendo seu suco). Tanto o limão inteiro como suas frações possuem diversas aplicações culinárias e nas indústrias alimentícia e farmacêutica. A desidratação desse produto para fins alimentícios tem como desafios preservar o bom aspecto visual e os componentes de interesse ao final do processo. O objetivo deste trabalho é analisar a secagem das fatias e de cada fração do limão tahiti (epicarpo, mesocarpo e endocarpo), isoladamente, em diferentes temperaturas e avaliar as alterações de cor e encolhimento que ocorrem na secagem. Além disso, avaliar os ajustes das curvas de cinética de secagem ao modelo difusivo, às equações empíricas e semi-empíricas e também com o uso de Redes Neurais Artificiais. Os ensaios de secagem foram conduzidos em estufa com convecção natural do ar, nas temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C, 60°C e 70°C. Verificou-se que o epicarpo e mesocarpo foram as frações que secaram mais rapidamente, em seguida o endocarpo e as fatias apresentaram as taxas de secagem mais baixas. Sob as condições avaliadas para o endocarpo e para as fatias, na temperatura de 70°C houve redução de cerca de 90% no tempo de secagem, com relação ao tempo requerido na temperatura 30°C e para as frações que compõe a casca, essa redução foi de aproximadamente 66%. Os ajustes da curva de cinética de secagem ao modelo difusivo foram razoáveis. Os ajustes dos dados às equações empíricas em geral foram bons e as equações de Page e Overhults foram as que apresentaram os melhores ajustes da cinética de secagem. As RNAs mostraram-se uma ferramenta promissora na predição da cinética de secagem, mas um maior número de dados é necessário para melhorar seu desempenho. A variação de cor ocorreu de forma crescente com o aumento da temperatura de secagem, sendo maior para o endocarpo e para a fatia. O encolhimento foi maior nos instantes iniciais de secagem e a redução da área superficial das amostras foi de cerca de 33%.

ABSTRACT

The tahiti lemon belongs to the family Rutaceae, *Citrus* of the genus, species *Citrus Latifolia*, the variety Tanaka. It is a heterogeneous fruit, formed by three distinct fractions, them being the epicarp (outer shell), the mesocarp (white layer), and endocarp (pulp with buds and vesicles containing its juice). Both the whole lemon as its fractions have several culinary applications, and also in the food and pharmaceutical industry. Therefore dehydration of this product for food has as challenges, preserve good visual appearance and the components of interest at the end of the process. The objective of this study is to analyze the drying of each lemon fractions tahiti (epicarp, mesocarp and pulp), alone, and also of the slices at different temperatures and to evaluate color changes and shrinking occurring in the drying. Furthermore, verify the fits for the drying kinetics curves to diffusive models, empirical and semi-empirical and also test the use of ANNs for adjustment and simulation of drying. The drying tests were conducted in a natural convection oven with air at temperatures of 30°C, 40°C, 50°C, 60°C and 70°C. It was found that the epicarp and mesocarp fractions were quickly reached dynamic equilibrium moisture, followed by the endocarp, and the slices showed shorts rates of drying. Under the conditions evaluated for endocarp sliced, and the slices at 70°C there was a reduction drying time of about 90% over the time required at 30°C, and the fractions that make up the shell this reduction was approximately 66%. The fits of the drying curve to the diffusive kinetic model were reasonable. Adjustments data to empirical models in general were good, and among the tested models, models of Page and Overhults presented the best fits the drying kinetics. The ANNs showed a promising tool in the prediction and simulation of drying kinetics, but a larger number of data is needed to improve their performance. The color change occurred increasingly with increasing drying temperature, being higher for the endocarp and the slice. The shrinkage was higher in the early stages of drying, and reducing the surface area of the samples was about 33%.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	19
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1 O limão - Generalidades.....	22
2.1.1 Características nutricionais	22
2.1.2 Características físicas e químicas de cada fração e suas aplicações	23
2.1.2.1 Epicarpo	24
2.1.2.2 Mesocarpo.....	26
2.1.2.3 Endocarpo	27
2.1.3 Mercado: Produção e consumo de frutas cítricas	28
2.2 Limão tahiti (<i>Citrus latifolia</i> – Tanaka)	30
2.3 Umidade	33
2.4 Secagem	35
2.5 Cinética de secagem.....	40
2.5.1 Equações matemáticas para cinética de secagem	43
2.5.1.1 Modelo difusivo	43
2.5.1.2 Principais equações empíricas e semi-empíricas.....	45
2.5.2 Redes Neurais Artificiais	46
2.6 Atributos de qualidade de alimentos processados	50
2.6.1 Avaliação de cor.....	51
2.6.2 Encolhimento.....	54
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3.1 Matéria prima	57
3.2 Preparação das amostras	57
3.3 Determinação de cor	58
3.4 Determinação da umidade	59
3.5 Determinação das dimensões	60
3.6 Secagem convectiva	61
3.7 Tratamento de dados	62
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	64

4.1 Umidade.....	64
4.2 Análise da reprodutibilidade da cinética de secagem.....	65
4.2.1 Secagem do epicarpo.....	66
4.2.1.1 Curvas de cinética de secagem do epicarpo.....	66
4.2.1.2 Ajuste das curvas de cinética de secagem do epicarpo.....	68
4.2.1.3 Atributos de qualidade do epicarpo.....	70
4.2.2 Secagem do mesocarpo.....	71
4.2.2.1 Curvas de cinética de secagem do mesocarpo.....	71
4.2.2.2 Ajuste das curvas de cinética de secagem do mesocarpo.....	72
4.2.2.3 Atributos de qualidade do mesocarpo.....	73
4.2.3 Secagem do endocarpo.....	75
4.2.3.1 Curvas de cinética de secagem do endocarpo.....	75
4.2.3.2 Ajuste das curvas de cinética de secagem do endocarpo.....	77
4.2.3.2.1 Modelo difusivo.....	77
4.2.3.2.2 Equações empíricas e semi-empíricas.....	79
4.2.3.3 Atributos de qualidade do endocarpo.....	80
4.2.4 Secagem das fatias.....	82
4.2.4.1 Curvas de cinética de secagem das fatias.....	82
4.2.4.3 Ajustes das curvas de cinética de secagem das fatias.....	84
4.2.4.3.1 Modelo difusivo.....	84
4.2.4.3.2 Equações empíricas e semi-empíricas.....	86
4.2.4.4 Atributos de qualidade das fatias.....	88
4.2.4.4.1 Análise colorimétrica.....	88
4.2.4.4.2 Encolhimento das fatias.....	90
4.2.4.2 Comparativo da secagem das frações e das fatias.....	92
4.3 Redes Neurais Artificiais.....	95
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS.....	101

NOMENCLATURA

D_{ef}	coeficiente efetivo de difusão, eq.(2.3), eq.(2.4) e eq.(2.6);
g	gramas;
k	constante cinética nas equações (2.7) à eq.(2.10);
L	espessura, eq.(2.5) e eq.(2.6);
m	massa;
MR	umidade adimensional, eq.(2.6) à eq.(2.10);
n	número de termos da série infinita, eq.(2.6);
t	variável temporal;
T	temperatura;
X	umidade em base seca;
\bar{X}	umidade média em base seca, eq. (2.5) e eq.(2.6);
z	coordenada axial na direção do transporte de massa.

Subscritos

0	umidade inicial;
eq	umidade de equilíbrio;
ss	sólido seco;
t	tempo;
∞	série infinita, eq.(2.6).

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Limão siciliano (<i>Citrus limon</i>).....	24
Figura 2.2 – Limão tahiti (<i>Citrus latifolia</i> – Tanaka)	31
Figura 2.3 – Percentual de participação na produção de limas e limões por região brasileira.....	33
Figura 2.4 – Comparação da cor das fatias secas (secador solar <i>versus</i> secador convectivo).	40
Figura 2.5 – Curvas características de secagem.	41
Figura 2.6 – Esquema simplificado de uma Rede Neural Artificial.	48
Figura 2.7 – Representação do sistema acromático e cromático do CIELab (a) e (b) espaço de cor CIELab.....	52
Figura 3.1 – Frações do limão utilizadas nos ensaios de secagem, (a) epicarpo, (b) mesocarpo, (c) endocarpo e (d) fatias.....	58
Figura 3.2 – Espectrofotômetro marca Konica Minolta, modelo CM-5.	58
Figura 3.3 – Estufa a vácuo, marca Tecnal, modelo TE-395.....	60
Figura 3.4 – Estufa sem circulação forçada de ar, marca Tecnal, modelo TE-394/1.....	61
Figura 4.1 – Reprodutibilidade das amostras desidratadas de (a) epicarpo e (b) mesocarpo, em 30°C e 70°C.....	65
Figura 4.2 – Reprodutibilidade das amostras desidratadas de (a) endocarpo e (b) fatias, em 30°C e 70°C.....	66
Figura 4.3 – Umidade adimensional em função do tempo para o epicarpo, nas temperaturas avaliadas.	67
Figura 4.4 – Taxas de secagem do epicarpo em função da umidade adimensional, nas temperaturas avaliadas.	68
Figura 4.5 – Ajustes das equações de Page e Overhults aos dados experimentais para o epicarpo nas temperatura de 50°C e 70°C.	69
Figura 4.6 – Epicarpo <i>in natura</i> e ao final de cada processo de secagem.....	70

Figura 4.7 – Umidade adimensional em função do tempo (a) e taxa de secagem em função do adimensional de umidade para o mesocarpo, nas temperaturas avaliadas.	71
Figura 4.8 – Ajustes das equações de Page e Overhults aos dados experimentais para o mesocarpo nas temperaturas de 50°C e 70°C.....	73
Figura 4.9 – Mesocarpo <i>in natura</i> e ao final de cada processo de secagem.....	74
Figura 4.10 – Adimensional de umidade em função do tempo de secagem para o endocarpo, nas temperaturas avaliadas.	75
Figura 4.11 – Taxa de secagem em função de MR para o endocarpo, nas temperaturas avaliadas.	77
Figura 4.12 – Umidades adimensionais em função do tempo experimentais e com os ajustes ao modelo difusivo para o endocarpo, nas temperaturas de 30°C e 70°C... ..	78
Figura 4.13 – Ajustes das equações de Page e Overhults aos dados experimentais para o endocarpo nas temperatura de 50°C e 70°C.	80
Figura 4.14 – Endocarpo <i>in natura</i> e ao final de cada processo de secagem.....	80
Figura 4.15 – Adimensional de umidade em função do tempo, para secagem de fatias do limão tahiti, nas temperatura avaliadas.....	82
Figura 4.16 – Taxa de secagem em função de MR, para a secagem das fatias do limão tahiti, nas temperaturas avaliadas.	83
Figura 4.17 – Umidades adimensionais em função do tempo experimentais e com os ajustes do modelo difusivo para as fatias do limão nas temperaturas de 30°C e 70°C.	85
Figura 4.18 – Umidades adimensionais em função do tempo experimentais e com os ajustes das equações de Page e de Overhults aos dados experimentais nas temperaturas de 50°C e 70°C para as fatias.....	87
Figura 4.19 – Fatias <i>in natura</i> e ao final de cada processo de secagem.....	88
Figura 4.20 – Variação da cor das frações e das fatias do limão, nas temperatura avaliadas.	90
Figura 4.21 – Imagens do encolhimento das fatias <i>in natura</i> e secas a 30°C.	90
Figura 4.22 – Dependência do encolhimento com a umidade para a secagem das fatias do limão tahiti na temperatura de 60°C.	92

Figura 4.23 – Umidades adimensionais em função do tempo para as temperaturas de (a) 30°C, (b) 40°C, (c) 50°C, (d) 60°C e (e) 70°C para o epicarpo, mesocarpo, endocarpo e fatias.....	93
Figura 4.24 – Soma do quadrado dos resíduos em função do número de neurônios na camada intermediária, testadas para a secagem das frações e fatias do limão, nas temperaturas avaliadas.	95
Figura 4.25 – Adimensional de umidade em função do tempo dos dados experimentais e estimados pelas das RNAs, ambos nas temperaturas de 30°C, 50°C e de 70°C, para (a) 9 neurônios e (b) 20 neurônios, na camada intermediária.....	96
Figura 4.26 – Estimativa da cinética de secagem na temperatura de 35°C e 65°C, para as fatias, dada pela RNA com 9 neurônios.	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Composição nutricional do limão tahiti e do limão Siciliano.	23
Quadro 2.2 – Principais países produtores de frutas cítricas e suas produções	30
Quadro 2.3 – Principais países produtores de limas e limões e suas produções.....	30
Quadro 2.4 – Principais países exportadores de limas e limões.....	31
Quadro 2.5 – Equações empíricas e semi-empíricas para o adimensional de umidade.....	45
Quadro 2.6 – Parâmetros colorimétricos (L^*), (a^*) e (B^*), para secador solar e secador convectivo das fatias de limão siciliano	53
Quadro 4.1 – Comparativo dos principais resultados do estudo da secagem das fatias e das frações do limão tahiti	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Umidades iniciais médias das fatias e frações do limão.....	64
Tabela 4.2 – Resultados estatísticos para ajuste das equações empíricas e semi-empíricas para o epicarpo.....	69
Tabela 4.3 – Parâmetros colorimétricos (L^*), (a^*) e (b^*), das amostras <i>in natura</i> e desidratadas do epicarpo, nas temperaturas avaliadas.....	71
Tabela 4.4 – Resultados estatísticos para ajuste dos modelos empíricos e semi-empíricos para o mesocarpo.....	73
Tabela 4.5 – Parâmetros colorimétricos (L^*), (a^*) e (b^*), das amostras <i>in natura</i> e desidratadas do mesocarpo, nas temperaturas avaliadas.	73
Tabela 4.6 – Resultados estatísticos para ajuste do modelo difusivo para o endocarpo	78
Tabela 4.7 – Resultados estatísticos para ajuste das equações empíricas e semi-empíricas para o endocarpo.....	79
Tabela 4.8 – Parâmetros colorimétricos (L^*), (a^*) e (b^*), das amostras <i>in natura</i> e desidratadas do endocarpo, nas temperaturas avaliadas.	81
Tabela 4.9 – Resultados estatísticos para ajuste do modelo difusivo para as fatias.....	85
Tabela 4.10 – Resultados estatísticos para ajuste das equações empíricas e semi-empíricas para as fatias	86
Tabela 4.11 – Parâmetros colorimétricos (L^*), (a^*) e (b^*), das amostras <i>in natura</i> e desidratadas das fatias, nas temperaturas avaliadas.....	88
Tabela 4.12 – Resultados das variações de cor das frações individuais e das fatias do limão, nas temperaturas avaliadas.....	90
Tabela 4.13 – Resultado médio das fatias em termos das áreas superficiais iniciais e finais, nas temperaturas avaliadas	91

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No Brasil o limão tahiti (*Citrus latifolia* – Tanaka) possui grande importância comercial. No entanto, seu consumo no país se dá predominantemente *in natura*, diferente de muitos países da Europa, Ásia e também da América do Norte, onde é comum o comércio da fruta seca de diferentes maneiras. Os produtos secos incluem limões inteiros ou em fatias, na forma de pó e cascas granuladas em diferentes granulometrias, tanto para uso comercial como doméstico. Este fruto processado possui aplicação direta na culinária, no preparo de chás, no incremento de ensopados, assados, saladas e de bebidas diversas.

O processamento desta fruta é conveniente, pois garante a mesma maior tempo de prateleira, além de ficar livre das interferências sazonais da produção, influências essas que alteram a disponibilidade do fruto à venda, o que por sua vez acarreta variações no preço de mercado do produto. Um dos processamentos habitualmente aplicados aos produtos do gênero alimentício é a secagem. A secagem em grande escala de produtos do gênero alimentício, empregando o ar quente é uma operação unitária amplamente utilizada na indústria, conferindo ao produto condições propícias de armazenagem por maior tempo, uma vez que há redução da incidência de microrganismos (GOUVEIA, 1999).

Este tipo de processamento requer estudos específicos, já que a desidratação de um produto alimentício para fins comerciais, como é o caso do limão tahiti, além de agregar valor ao produto também propicia a comercialização tanto no mercado interno como no externo, onde há grande demanda.

A secagem deste produto tem como maior desafio preservar as suas características nutricionais e sua aparência. No entanto, a secagem do fruto inteiro além de demandar tempo maior, requer muita energia e pode levar a um produto final de qualidade inferior, desse modo, a secagem em fatias é conveniente. Além disso, trata-se de um fruto heterogêneo, assim como outras frutas cítricas, com três frações distintas que compõe sua estrutura, cada uma com composição química e características específicas formando um conjunto estruturado.

O epicarpo, a camada externa da casca, é rico em óleo essencial muito utilizado na indústria farmacêutica e alimentícia e nas indústrias fabricantes de produtos de limpeza (RANGEL, 2008; VIANA, 2010; GOMES, 2011; TITA, 2011). O mesocarpo, a camada branca e esponjosa da casca, é rico em pectina, celulose, hemicelulose, lignina e glicídeos solúveis. Suas aplicações são alimentícias, como ração animal, suplementação alimentar humana, doces em calda e cristalizados. Já foi testado também seu uso como adsorvente na remoção de corantes de águas residuárias (MENDONÇA, 2006; FONSECA, 2007; VIANA, 2010; LIMA, 2014). E por fim o endocarpo, ou polpa, possui suco com elevados teores de ácido cítrico, vitamina C, sais minerais e compostos fenólicos, todos com propriedades terapêuticas comprovadas à saúde humana (SILVA *et al.*, 2001; BEHLING *et al.*, 2008; LIMA, 2014).

A retirada da umidade presente nos produtos do gênero alimentício provoca alterações estruturais muitas vezes irreversíveis como o encolhimento e alteração de cor provocada por reações de oxidação enzimática. Tais modificações impactam diretamente na percepção de qualidade do produto final, características essas que são primeiramente observadas pelo consumidor ao adquirir qualquer produto alimentício processado.

Diante da complexidade envolvida na secagem convectiva de produtos alimentícios, onde fenômenos de transporte de calor e de massa ocorrem simultaneamente, descrevê-lo matematicamente usando modelos fenomenológicos específicos é uma tarefa difícil, pela grande quantidade de parâmetros necessários e de difícil determinação. Com isso, é comum o uso de equações empíricas e semi-empíricas para descrever a cinética de secagem, em detrimento da modelagem puramente teórica como meio de facilitar a análise. Alternativamente às equações empíricas, outra ferramenta que vem sendo muito utilizada para a predição da cinética de secagem são as Redes Neurais Artificiais (RNA). As RNAs são um conjunto de métodos matemáticos e algoritmos computacionais de simulação de processo. Tal recurso é capaz de representar o comportamento de curvas de cinéticas de secagem para uma ampla faixa de operação e não apenas para uma única condição, como é o caso das equações empíricas e semi-empíricas (COSTA, 2013).

Dentro do contexto apresentado e devido à heterogeneidade na composição das fatias, é conveniente uma análise adequada da cinética de secagem de cada uma das suas frações individuais. Essa abordagem visa reunir informações a

cerca do comportamento de cada parte durante a secagem, de forma que auxilie na compreensão dos fenômenos envolvidos na secagem do todo, ou seja, da fatia.

Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivo analisar a secagem das fatias e de cada fração do limão tahiti, epicarpo, mesocarpo e endocarpo, isoladamente, em diferentes temperaturas e avaliar o efeito da temperatura no processo. Outro foco deste trabalho foi avaliar as alterações de cor que ocorrem ao final do processo de secagem para as diferentes temperaturas mencionadas de cada fração e também das fatias e o encolhimento das fatias. E adicionalmente, avaliar o ajuste das curvas de cinética de secagem ao modelo difusivo, às equações empíricas e semi-empíricas e também pelo uso de RNAs, visando obter uma rede que represente o comportamento da secagem das fatias e das frações do limão tahiti em toda faixa operacional estudada, além de obter previsão da cinética de secagem para as temperaturas não estudadas, mas dentro da faixa de operação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O limão - Generalidades

Originário da Ásia o limoeiro é uma árvore perene da família botânica das Rutáceas e do gênero *citrus*. A origem da palavra que denomina o fruto advém do latim e significa cítrico.

Desde a antiguidade as frutas cítricas em particular os limões, eram utilizados na alimentação dos povos do ocidente, tanto como condimento e aromatizante na culinária, como também pelos seus benefícios medicinais na prevenção e cura do escorbuto, enfermidade causada pela ausência da vitamina C, tornando os limões presença obrigatória nas viagens marítimas (VIANA, 2010).

Acredita-se que o limão tenha sido introduzido nas Américas pelos colonizadores portugueses e espanhóis no século XVI e desde então tem sido cultivado no país e sua produção tem crescido a cada ano. Dentro do gênero de plantas *citrus*, o fruto do limoeiro, o limão, é a mais cítrica de todas. Seus frutos geralmente contém farto suco, correspondendo em média a 50% do seu peso. Tal planta é considerada de médio porte e frequentemente atinge de quatro a cinco metros de altura. Algumas espécies se adaptam melhor a climas frios e/ou secos e outras a climas tropicais (FONSECA, 2007; TRUCOM, 2013).

2.1.1 Características nutricionais

O limão é um fruto rico em sais minerais como cálcio, ferro, fósforo, potássio e zinco. Possui flavonóides com grande potencial antioxidante, além de atividade anti-inflamatória, antialérgica, antiviral e anticarcinogênica (RANGEL, 2008; BEHLING *et al.* 2008; KUMMER *et al.*, 2013).

O sabor característico do limão advém do ácido cítrico presente em concentrações de aproximadamente 6% nas limas e limões, enquanto que na laranja e tangerina sua concentração é de apenas 1%. O ácido cítrico é muito utilizado como

conservante natural e ainda auxilia na digestão. Também é rico em ácido ascórbico e flavonóides, excelentes antioxidantes que atuam como neutralizante dos radicais livres no organismo, além de fortalecer o sistema imunológico, reduzindo a incidência de infecções (SILVA *et al.*, 2001; DEL RÍO *et al.*, 2004; MILEZZI *et al.*, 2013).

No Quadro 2.1 observa-se os principais nutrientes, tanto do limão tahiti, como também do limão siciliano para comparativo.

Quadro 2.1 – Composição nutricional do limão tahiti e do limão siciliano.

Nutrientes	Limão tahiti			Limão siciliano		
	com casca	suco integral	suco industrializado	com casca	suco integral	suco industrializado
Água (g/100g)	88,26	90,79	90,52	87,4	90,73	92,46
Energia (kcal)	30	25	88	20	25	21
Proteína (g/100g)	0,7	0,42	0,25	1,2	0,38	0,4
Lipídeos totais (g/100g)	0,2	0,07	0,23	0,3	0	0,29
Carboidratos (g/100g)	10,54	8,42	6,69	10,7	8,63	6,48
Açúcares totais (g/100g)	1,69	1,69	1,37	*	2,4	2,4
Fibra dietética (g/100g)	2,8	0,4	0,4	4,7	0,4	0,4
Cinzas (g/100g)	0,3	0,31	0,31	0,4	0,26	0,36
Cálcio (mg/100g)	33	14	0,12	61	7	11
Ferro (mg/100g)	0,6	0,09	0,23	0,7	0,03	0,13
Magnésio (mg/100g)	6	8	7	12	6	8
Fósforo (mg/100g)	18	14	10	15	6	9
Potássio(mg/100g)	102	117	75	145	124	102
Sódio (mg/100g)	2	2	16	3	1	21
Zinco (mg/100g)	0,11	0,08	0,06	0,1	0,05	0,06
Cobre (mg/100g)	0,06	0,027	0,03	0,36	0,029	0,037
Vitamina C (mg/100g)	29,1	30	6,4	77	46	24,8

(*) Valores não reportados

Fonte: Adaptado de Rangel (2008).

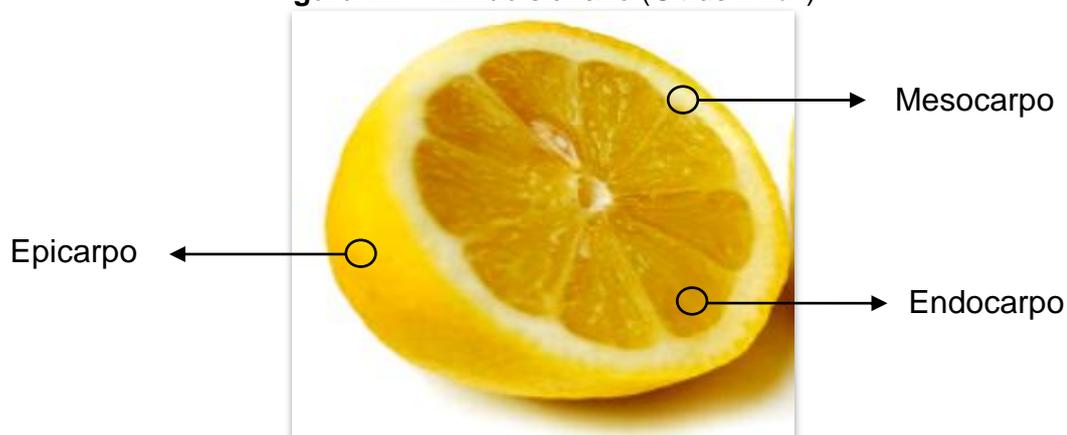
2.1.2 Características físicas e-químicas de cada fração e suas aplicações

Para cada parte constituinte da estrutura das frutas deste gênero, podem ser encontradas diferentes substâncias químicas. Alguns pesquisadores especificam os constituintes de destaque presentes em cada fração do fruto e suas aplicações específicas, como será apresentado nos próximos tópicos (MENDONÇA *et al.*, 2006).

O limão possui três frações distintas que compõe sua estrutura, sendo elas o epicarpo, camada externa da casca, o mesocarpo, camada branca da casca, e o endocarpo ou polpa composta por aproximadamente dez segmentos de uma

película transparente que formam seus gomos, com inúmeras vesículas contendo o suco, como se observa na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Limão siciliano (*Citrus limon*).



Fonte: www.google.com.br/imagens-limão-siciliano

2.1.2.1 Epicarpo

Denomina-se epicarpo a camada fina mais externa da casca do limão e de outras frutas cítricas. O epicarpo é formado por celulose, hemicelulose, pectina e lignina. Nesta fração encontram-se os cromoplastídeos e carotenóides que lhe conferem a cor característica, vitaminas e sais minerais. No entanto, esta fração do fruto se destaca pela presença de câmaras secretoras ricas em óleos essenciais, que tem como funções naturais prevenir a desidratação e o crescimento microbiano na planta (MENDONÇA *et al*, 2006; FONSECA, 2007; VIANA, 2010; GOMES, 2011).

A composição química do epicarpo o torna uma fonte rica de nutrientes que muitas vezes é descartado no processo industrial na produção de sucos, juntamente com o mesocarpo e o bagaço da polpa. Porém, recentemente esta fração tem sido de interesse da indústria farmacêutica, química e alimentícia (MENDONÇA, 2006).

Os óleos essenciais dos cítricos em geral, são formados por substâncias voláteis responsáveis por suas essências e aromas de fruta fresca. Apresentam-se à temperatura ambiente como líquidos oleosos de alta volatilidade, o que os diferenciam dos óleos fixos. Podem ser consideradas moléculas lipofílicas, ou seja, insolúveis em água e solúveis em solventes orgânicos. São em geral instáveis na presença de luz, ar, calor, umidade e metais (GOMES, 2011).

Há pesquisas que relatam que existem mais de 150 compostos encontrados em óleos essenciais de cítricos (GOMES, 2011). No limão tahiti são conhecidos 40 compostos químicos presentes no óleo, tendo como principal componente aromático o limoneno, representando até 50 % da sua composição (FONSECA, 2007). O limoneno é um monoterpene que ocorre em duas formas opticamente ativas, L- e D-. No óleo essencial de *citrus*, o D-limoneno está presente em maior proporção. Esse monoterpene é classificado como um metabólito secundário, cuja função pode ser ecológica, promovendo defesas contra herbívoros e patógenos, atraindo insetos que dispersam pólen, ou inibindo a germinação de plantas vizinhas e também possui atividade antibacteriana (FONSECA, 2007; TITA, 2011; KUMMER *et al*, 2013).

Devido às suas características aromatizantes, os óleos essenciais de frutas cítricas são utilizados nas indústrias farmacêuticas na fabricação de medicamentos ou como agente mascarador do gosto desagradável de alguns medicamentos, na fabricação de cosméticos, perfumaria e aromaterapia, na indústria alimentícia como flavorizantes em doces, sucos, refrigerantes, bebidas alcoólicas, produtos para confeitaria, alimentos diversos, sorvetes e ainda são usados nas indústrias fabricantes de produtos de limpeza (RANGEL, 2008; VIANA, 2010; GOMES, 2011; TITA, 2011; MILEZZI *et al*, 2013).

Conforme Millezi *et al.* (2013), o óleo essencial obtido da casca do limão cravo (*Citrus Limonia* - Osbeck) com concentração a partir de 10%, apresentou ação eficiente contra a bactéria *Staphylococcus aureus*. Este efeito foi atribuído à presença predominante do aldeído limoneno (33,67%), ao ser comparado com óleos essenciais oriundos de outras plantas, as quais não mostraram tanta eficácia na inativação desta bactéria em particular. As plantas utilizadas para comparação foram o capim-citronela (*Cymbopogon nardus*) contendo em maior fração o volátil timol (28,99%) e a segurelha de inverno (*Satureja montana*) com citronelal a 30,48%, representando sua maior composição.

Em outro estudo, óleo essencial da casca do limão siciliano (*Citrus Limon*) foi extraído, obtendo-se o citronelal, com o intuito de aplicação como pesticida verde, em detrimento dos agrotóxicos. Este composto pode ser acrescido nos pesticidas de uso domésticos e também na agricultura (KOUL *et al.*, 2008).

2.1.2.2 Mesocarpo

O mesocarpo é a camada branca e com aspecto esponjoso que constitui a casca das frutas deste gênero. É constituído em maior proporção por polímeros naturais como a celulose, hemicelulose, pectina, lignina. Além destes compostos também possuem glicídios solúveis (açúcares), ácidos cítrico e ascórbico, sais minerais, compostos fenólicos e outros hidrocarbonetos de baixa massa molecular (FONSECA, 2007; VIANA, 2010).

As fibras são constituídas de celulose, hemicelulose, lignina, pectinas, mucilagens e gomas. As paredes celulares de plantas são as maiores fontes destas fibras. Estes compostos influenciam a saciedade e a redução na ingestão de calorias por retardarem o esvaziamento gástrico e promovem uma lenta absorção de glicose. Além disso, também estão associadas à absorção de nutrientes no intestino delgado e promovem o trânsito intestinal e conseqüentemente a remoção de compostos potencialmente nocivos (GONÇALVES *et al.*, 2001; MENDONÇA, 2006).

Na fabricação nacional de sucos cítricos o mesocarpo, o epicarpo e o bagaço do endocarpo, juntos representam uma quantidade expressiva de resíduos, que equivale em média a 49,8 % do peso do fruto. Recentemente, grande parte desse resíduo tem sido utilizado para a elaboração de polpa cítrica peletizada, que é empregada como ingrediente na ração para bovinos, por possuir alta palatabilidade e grande quantidade de fibras alimentares (MENDONÇA, 2006).

Como este material é rico em fibras solúveis (pectina), além de celulose e hemicelulose, ele pode ainda ter outras formas de aproveitamento com maior valor agregado. Conforme relata Godoy *et al.* (2005), em Minas Gerais o mesocarpo de frutos cítricos é aproveitado na confecção artesanal de doces em calda e cristalizados e se mostrou uma forma lucrativa de comercialização.

De acordo com Gonçalves *et al.* (2001), a pectina também é muito utilizada na indústria de alimentos como aditivo espessante em geleias. Porém sua característica como alimento funcional merece destaque, visto que esta fibra solúvel possui capacidade comprovada de normalizar os níveis de colesterol no sangue e a ingestão destas fibras alimentares tem sido correlacionada com a prevenção de muitas doenças como aterosclerose, *Diabetes mellitus* e obesidade. E as maiores fontes de pectina são as cascas de frutas cítricas. Portanto, a utilização do mesocarpo

na alimentação humana é importante, considerando todos os benefícios que o consumo de fibras traz à saúde.

Além das características nutricionais que esta fração possui, é interessante salientar que as cascas de frutas cítricas também apresentam vários grupos funcionais como hidroxilo e carbóxilo, conferindo-lhe a característica de material adsorvente, com potencial de remoção de íons metálicos e corantes em soluções aquosas (LIMA, 2014).

Com foco neste potencial adsorvente, Lima (2014) estudou o uso alternativo de cascas de laranja pera secas e trituradas como adsorvente de corante, tendo como objetivo avaliar a capacidade de adsorção na remoção do corante têxtil Vermelho Reativo BF-4G do efluente industrial. Neste estudo esta aplicação mostrou-se uma alternativa promissora ao uso de carvão ativado, visto que além de adsorver 90% do corante, é um adsorvente de baixo custo.

2.1.2.3 Endocarpo

Os gomos deste tipo de fruto são denominados endocarpos ou polpa, que são formados por paredes que revestem as vesículas contendo o suco. As paredes dos gomos e das vesículas são compostas também por hemicelulose, celulose e substâncias pécticas. O endocarpo do limão tahiti, em sua maioria, contém grande quantidade de suco com elevados teores de ácido cítrico, vitamina C, compostos fenólicos e sais minerais, substâncias que são responsáveis por suas propriedades terapêuticas (BARROS, 1986).

Tais propriedades são relatadas por Millezi *et al.* (2013), que citam ser o suco de limão muito utilizado na medicina alternativa, tanto para o tratamento de problemas gastrointestinais, quanto contra infecções bacterianas.

As propriedades antioxidantes de compostos presentes em frutas, legumes e vegetais, como a vitamina C e os flavonóides, tem sido alvo de muitos estudos que visam à utilização de alimentos funcionais.

Conforme Behling *et al.* (2008), entre os antioxidantes, os mais ativos e majoritários são os compostos fenólicos, como os flavonóides. As propriedades benéficas no organismo humano dos antioxidantes podem ser atribuídas a sua capacidade de sequestrar radicais livres, oferecendo proteção aos tecidos. A propriedade antioxidante é direcionada sobre o radical hidroxil (OH) e o ânion

superóxido (O₂⁻). Estes compostos além de se destacarem pelo potencial antioxidante, também possuem potencial anticarcinogênico e atuam como protetores do sistema renal, hepático e cardiovascular.

Outro estudo interessante visa à aplicação sanitária para o suco de limão. Silva *et al.* (2001), avaliaram o desempenho de ácidos orgânicos comerciais e suco de limão como agente de sanitização de carcaças de frango adquiridas de abatedouros, destinadas ao consumo humano. Foram testados para bactérias mesofílicas, bolores, leveduras, coliformes totais e fecais e *Salmonella* spp. Os resultados encontrados pelos pesquisadores se mostraram eficientes para todos os ácidos orgânicos testados, inclusive para o suco de limão, atingindo eficiência de aproximadamente 69%. E de modo geral todos os tratamentos reduziram significativamente a contaminação inicial das carcaças de frango.

2.1.3 Mercado: Produção e consumo de frutas cítricas

O limão é consumido predominantemente *in natura*. No entanto, em muitos países da Europa, Ásia e também na América do Norte, é comum o comércio da fruta desidratada de diferentes maneiras, como inteiros, em pó, cascas granuladas em diferentes granulometrias, ou em fatias, tanto para uso comercial ou doméstico. Estes produtos têm aplicações diretas na culinária, no preparo de chás, no incremento de ensopados, assados, saladas e de bebidas diversas, conferindo-lhes sabor característico.

Além dos benefícios que as suas propriedades trazem à saúde, bem como a importância econômica dessa cultura, as plantações do limão aumentaram significativamente em todo o mundo. No contexto da produção mundial de frutas cítricas, as limas e limões produzidos em 2011 chegaram a aproximadamente 13 milhões de toneladas. Tal cifra só perde para a laranja, com produção anual mundial de 71 milhões de toneladas e para a tangerina, com produção de aproximadamente 26 milhões de toneladas, segundo a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação – FAO em relatório estatístico divulgado no ano de 2012.

Conforme FAO (2012), o Brasil é o segundo maior produtor de frutas cítricas (laranja, tangerinas, limas e limões), tendo produzido em 2011 em torno de 22,7 milhões de toneladas. A China figura como primeiro produtor mundial, com 22,9 milhões de toneladas, conforme mostra o Quadro 2.2. Evidente que as dimensões

continentais, o clima propício e a grande quantidade de terras agricultáveis, bem como o papel desempenhado na produção de gêneros alimentícios na atualidade, podem justificar essas cifras alcançadas pelos dois países.

Como é possível notar no quadro 2.2, nos anos de 2010/2011 a produção brasileira duplicou em relação a década de 80, enquanto outros países que não tinham grande representatividade, tiveram crescimento expressivo na produção de frutas cítricas, como por exemplo, a Índia e a China. Neste levantamento, a China destaca-se com um aumento na produção de aproximadamente 12 vezes nos últimos 30 anos. Neste mesmo período a Índia obteve crescimento em torno de quatro vezes. Em contrapartida, a produção nos Estados Unidos da América não tem sofrido significativas alterações (FAO, 2012).

Quadro 2.2 – Principais países produtores de frutas cítricas e suas produções.

Classificação	Países	Produção (ton.) 1980/1981	Produção (ton.) 2010/2011
1° Lugar	China	1.709.100	22.940.000
2° Lugar	Brasil	11.671.100	22.704.500
3° Lugar	EUA	11.168.300	10.445.200
4° Lugar	Índia	1.894.200	8.267.200

Fonte: Adaptado do Relatório Estatístico Anual - FAO, 2012.

Na totalidade da produção nacional de frutas cítricas em 2011, a laranja tem destaque, representando 91%, o que corresponde a 20,6 milhões de toneladas, enquanto as limas e limões representam apenas 5% da produção total, ou seja, 1,1 milhão de toneladas. Tal diferença pode ser atribuída a grande aceitação que o suco de laranja desfruta no paladar da população em geral.

Os plantios do limão estão dispersos em quase 50 mil hectares no Brasil, sendo que a região sudeste possui a maior área plantada, perfazendo 34 mil hectares, com rendimentos médios de 23,4 ton/ha como evidencia relatório da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011).

Considerando apenas a produção de limas e limões, o país aparece em 5° lugar em produção, estando entre os maiores produtores do mundo, sendo superado pela Índia, México, Argentina e a Espanha, que são sucessivamente os maiores produtores mundiais, de acordo com o relatório estatístico no período que compreende de 2010 a 2011 (FAO, 2012) como mostra o Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Principais países produtores de limas e limões e suas produções.

Classificação	Países	Produção (ton.) 1980/1981	Produção (ton.) 2010/2011
1º Lugar	Índia	531.700	2.749.500
2º Lugar	México	640.700	1.800.000
3º Lugar	Argentina	422.400	1.490.000
4º Lugar	Espanha	520.400	927.300
5º Lugar	Brasil	318.500	898.000

Fonte: Adaptado do Relatório Estatístico Anual - FAO, 2012.

Em estudo recente publicado pela EMBRAPA (2011) a produção brasileira total de limas e limões em 2011 atingiu a cifra de 1.126.736 toneladas. No que se refere às exportações de limas e limões, desde 1980 elas têm crescido bastante, como pode ser verificado no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Principais países exportadores de limas e limões.

Classificação	Países	Exportação em (ton.) 1980/1981	Exportação em (ton.) 2010/2011
1º Lugar	Turquia	104.900	465.600
2º Lugar	Espanha	334.400	461.300
3º Lugar	México	21.600	458.000
4º Lugar	Argentina	31.900	260.000
5º Lugar	África do Sul	28.100	146.000
6º Lugar	EUA	148.600	102.000
7º Lugar	Brasil	2.100	67.100

Fonte: Adaptado do Relatório Estatístico Anual - FAO, 2012.

A maior parte da produção e da exportação nacional é do limão tahiti, que é comercializado em sua maior quantidade sob a forma de fruta fresca e também como suco concentrado congelado, tanto no mercado interno quanto no externo (PIRES *et al.*, 2011).

Visto que esse cultivar possui grande importância comercial, no próximo tópico serão apresentadas informações adicionais sobre esta variedade.

2.2 Limão tahiti (*Citrus latifolia* – Tanaka)

Este fruto é conhecido erroneamente como limão tahiti (pois o termo limão é mais adequado aos limões verdadeiros, como por exemplo, o limão siciliano -

Citrus limon), quando na verdade trata-se de uma lima ácida, no entanto, neste trabalho será doravante designado como limão tahiti, como é popularmente conhecido. O limão tahiti pertence à família das Rutáceas, do gênero *Citrus*, assim como todas as frutas cítricas e à espécie *Citrus Latifolia* da variedade Tanaka. Acredita-se que esta variedade de limão tenha surgido na Califórnia (EUA) no século XIX, proveniente de sementes oriundas do Tahiti e por isso recebeu essa denominação e com o tempo se propagou para outros países, principalmente nas Américas (BARROS, 1986; TRUCOM, 2013).

Seus frutos são ovoides ou oblongos e pesam aproximadamente 70 g, é abundante em suco, com a polpa firme e muito ácida, também possuem casca geralmente fina, contendo vesículas de óleo, superfície lisa e verde, quando própria para consumo, como mostra a Figura 2.2.

Figura 2.2 – Limão tahiti (*Citrus latifolia* – Tanaka)



Fonte: www.google.com.br/imagens-limão-tahiti.

São muitas as variáveis que influenciam as composições químicas dos frutos cítricos de modo geral. Entre as principais variações estão a do clima, da exposição do fruto aos raios solares, dos tratamentos do cultivo e o tipo de solo (MENDONÇA *et al.*, 2006).

Segundo relato de Barros (1986), os frutos do limão tahiti, contém grande quantidade de suco com elevados teores de ácido cítrico, vitamina C e sais minerais, além de pectina na entrecasca e óleos essenciais. Esses óleos são constituídos principalmente por monoterpenos na casca, conferindo-lhe propriedades terapêuticas.

Um diferencial desta fruta é a ausência de sementes, já que a planta produz pólen não viável devido a sua constituição genética ser triploide. A coloração

externa da casca é um dos principais indicativos de qualidade e um fator determinante na comercialização de limão, pois quando a mesma apresenta a casca com tonalidade amarelada indica que ultrapassou seu estágio de maturação (MAZZUZ, 1996).

Esta fruta é usada na preparação de diversas bebidas e *drinks*, a fim de incrementar seu sabor. Geralmente sua utilização se dá predominantemente *in natura* (FAO, 2008).

O suco deste limão tem diversas aplicações culinárias, onde se sobressai o uso em limonadas, condimentos, aromatizantes e especialmente no preparo de alimentos cozidos ou em saladas e também como acidulante. É utilizado, ainda, para prevenir o escurecimento em frutas frescas e também em conservas vegetais, pela presença de ácido cítrico e em xaropes pela presença da vitamina C (ZIENA, 2000).

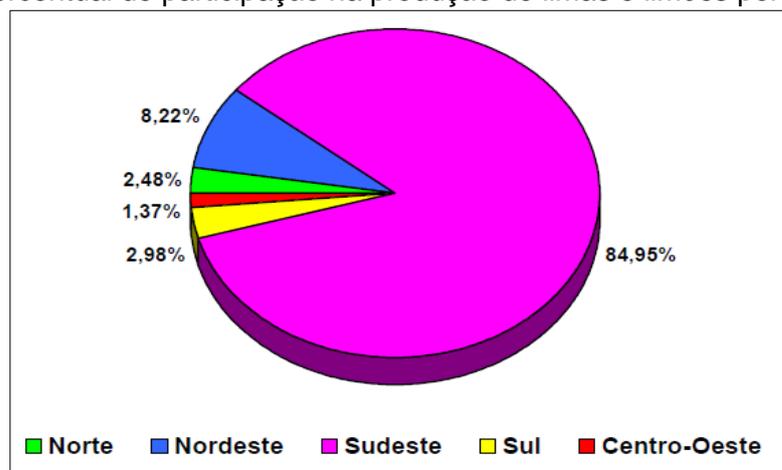
Durante o ano, o limoeiro do cultivar em questão tem várias floradas. No entanto a sua safra é mais concentrada no primeiro semestre do ano no Estado de São Paulo e nas regiões com clima semelhante. A colheita do fruto deve ser realizada de 120 a 160 dias após a florada, quando o fruto estiver bem desenvolvido e ainda verde (RANGEL, 2008).

Para Coelho (1993) essa variedade cítrica, característica de climas tropicais, tem como particularidade apresentar fluxos de crescimento e de floração constantes. No entanto, pode ser interrompido por períodos de déficit hídrico, que pode ser minimizado com a irrigação.

Deve-se levar em conta que os rendimentos dos pomares comerciais variam de acordo com a fase de produção. Este cultivar oferece uma produção significativa na sua primeira florada, que acontece a partir do terceiro ano, rendendo em média 17 kg/planta, podendo chegar até 177 kg/planta ao atingir sete anos de idade. Em decorrência de se tratar de uma planta altamente produtiva, sendo considerada ainda como uma das espécies de *citrus* de maior precocidade, fica evidente a importância comercial do fruto (Coelho, 1993).

A região sudeste representa em média 85% da produção nacional de limas e limões, conforme levantamento realizado pela EMBRAPA (2011) como apresenta a Figura 2.3.

Figura 2.3 – Percentual de participação na produção de limas e limões por região brasileira.



Fonte: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura, 2011.

Entre as limas e limões, o limão tahiti tem exploração comercial relativamente recente, porém é um dos frutos cítricos que atualmente apresenta maior relevância comercial no país. Contudo, as áreas de cultivos de limas ácidas no Brasil são avaliadas em conjunto com os limões, tornando difícil a separação. Estima-se, no entanto, que existam em média 10 milhões de plantas dessa variedade e 1 milhão de plantas de outras variedades de limões, apenas no Estado de São Paulo (FIGUEIREDO, 2005).

O mercado do limão tahiti tem sido largamente ampliado, não se restringindo apenas ao mercado interno. O continente Europeu é atualmente seu principal consumidor. Esta fruta tem boa aceitação, embora esta variedade possua casca de coloração verde, enquanto o limão siciliano, que é a variedade mais comum no exterior, possui casca amarela. Esta peculiaridade não impede que a Europa importe aproximadamente 80% do total das exportações brasileiras desta fruta (PIRES *et al.*, 2011).

2.3 Umidade

Nos alimentos frescos a água é o constituinte presente em maior concentração. A umidade exerce influência considerável no paladar, na digestão e também na estrutura física e no manuseio do produto. Os processos de deterioração que ocorrem nos alimentos, em sua maioria são influenciados pela concentração e a

mobilidade da umidade contida no mesmo. Portanto, conhecer o conteúdo de umidade correto é muito importante quando se trata de alimentos desidratados, quando pretende-se armazená-los por longos períodos, uma vez que se o produto desidratado ainda permanecer com alto conteúdo de umidade, pode acarretar na deterioração do produto por via microbiológica e por reações enzimáticas e oxidativas (AZOUBEL, 1999; CÓRDOVA, 2006).

De acordo com Córdova (2006), a migração de água no alimento é governada pelas diferenças de potenciais químicos da água entre a região mais úmida e menos úmida do produto. Tal migração pode sofrer limitações impostas pela viscosidade da matriz sólida, pela porosidade do material e pelas múltiplas interações nas quais a água está envolvida. Ainda, pode depender também da temperatura, da pressão, da composição, do coeficiente de difusão e de fatores geométricos.

Nos materiais biológicos, a afinidade existente entre a água e os outros componentes presentes na sua estrutura define sua higroscopicidade, que é uma característica fundamental do produto e influencia no processamento, manuseio, estocagem e consumo (GOUVEIA, 1999).

Todos os alimentos contém água, no entanto, a água não se encontra ligada do mesmo modo. A água pode estar presente no produto sob duas formas (GOUVEIA, 1999; CÓRDOVA, 2006; PACHECO, 2009):

- água não ligada: é a água mais abundante e que pode estar relativamente livre; exerce uma pressão de vapor igual àquela da água pura, sendo perdida facilmente à temperatura de bulbo úmido;
- água ligada: dependendo do material, fica retida em pequenos capilares sujeitos a fortes efeitos de tensão superficial; faz parte da estrutura do material, está ligada aos açúcares, proteínas e adsorvida na superfície de partículas coloidais, portanto indisponível para o processo de deterioração e neste caso necessita de temperaturas altas para sua remoção.

Conforme relata Gouveia (1999), a água liga-se ao alimento com maior ou menor intensidade e este comportamento é denominado atividade de água. A atividade de água de um alimento é representada pela relação entre a pressão de vapor de água no alimento e a pressão de vapor da água pura, ambas medidas à mesma temperatura. Tal atividade não é somente função do conteúdo de umidade, depende, sobretudo, das substâncias que exercem o efeito de ligação da água na

estrutura do produto. Portanto, não significa que alimentos com a mesma umidade tenham a mesma atividade de água.

Contudo, o controle da atividade de água é de suma importância quando se pretende preservar um alimento por longos períodos e no desenvolvimento de novos produtos alimentícios desidratados (GOUVEIA, 1999). E uma técnica para esse controle é a remoção da umidade do alimento até a sua umidade de equilíbrio, de forma que a umidade ainda contida não seja suficiente para contribuir com a sua deterioração, sendo a secagem a maneira mais utilizada.

2.4 Secagem

A definição de secagem nada mais é que a remoção por via térmica de uma substância volátil contida em um sólido, que geralmente é água. Todavia, nesse processo nem sempre somente a água é removida, mas também algumas outras substâncias voláteis que podem estar contidas no material (PARK, 2004).

A secagem é um processo que existe desde a antiguidade, quando o homem utilizava o vento e o sol para secar materiais do seu cotidiano, mas a secagem natural (ao ar livre), ainda hoje em uso, está sujeita a diversas intempéries, principalmente as climáticas. Apenas nos últimos dois séculos tem-se utilizado a secagem artificial proveniente do fornecimento de energia térmica para a secagem de produtos alimentícios e agrícolas, muito em função das grandes escalas que a produção comercial exige.

Há relatos de que durante a Revolução Industrial Francesa, foi apresentada uma das primeiras técnicas de secagem de folhas de papel numa sala com circulação de ar. Passados aproximadamente um século, outra técnica foi descrita em Londres na “Grande Exibição”, técnica essa que aprimorou a secagem de folhas de papel, realizando o processo por meio de cilindros aquecidos. Também já era realizada nesse período a secagem em pequena escala de amido, sal e vegetais em fornos simples. A partir da Primeira Guerra Mundial a desidratação de produtos alimentícios passou a ser aplicada de forma significativa, em virtude da necessidade de alimentos em larga escala, destinados ao suprimento das tropas em combate. Tais exemplos históricos demonstram que com o advento da secagem artificial obtêm-se

maior controle do processo e de modo geral, garante maior qualidade do material (PARK 2004; MURR, 1992).

Desde então, a secagem em grande escala de produtos sólidos, empregando o ar quente, é uma operação unitária amplamente utilizada na indústria e vem sendo aprimorada ao longo dos anos. A desidratação de produtos alimentícios e agropecuários tem como principal finalidade diminuir a disponibilidade de água para um nível onde não exista o perigo de desenvolvimento microbiano, o que propicia maior preservação do produto. Assim, oferece ao produto seco maior tempo de prateleira, agrega valor ao produto processado, oferece estabilidade dos componentes aromáticos à temperatura ambiente por longos períodos, não requer armazenamento refrigerado e ainda reduz os custos de frete e manuseio do material, uma vez que seu peso é diminuído consideravelmente (MURR, 1992; HONORES, 1995; GOUVEIA, 1999; CÓRDOVA, 2006; REIS, 2006).

Dentre as diversas formas de secagem, a secagem térmica é muito empregada e entre estas, a secagem convectiva em estufa é uma das mais difundidas, sendo que a circulação do ar no interior da estufa pode ser forçada ou natural.

Na literatura, existem poucos trabalhos que estudam a secagem de frutas cítricas em fatias e nenhum foi encontrado analisando as suas frações individualmente. Todavia, alguns trabalhos que abordam a secagem térmica convectiva de alimentos serão apresentados nesta revisão. Tais trabalhos contribuem com informações úteis para a pesquisa desenvolvida, pois como relata Honores (1995), as frutas e os vegetais apresentam cinéticas de secagem bastante semelhantes, de forma que os métodos experimentais e abordagens teóricas podem ser úteis para a compreensão do processo de secagem de outros produtos do mesmo gênero.

- Secagem de maçã

No estudo realizado por Honores (1995), foram desidratadas maçãs (*Malus spp.*) da variedade Golden, visando estabelecer os parâmetros de secagem. As maçãs foram secas em secador convectivo de bandejas. Tiveram as cascas e a parte central contendo as sementes removidas e foram utilizados dois tipos de cortes, fatia de um centímetro de espessura e cubo com um centímetro de aresta. As

temperaturas utilizadas foram de 60, 70 e 80°C, com velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m.s⁻¹. Para descrever as cinéticas de secagem foi utilizado o modelo difusivo, com a série truncada no quinto termo (com difusividade efetiva de 2,66 10⁻⁶ à 6,395 10⁻⁶ m².s⁻¹) para o corte em fatias e no terceiro termo (com difusividade efetiva de 8,06 10⁻⁶ à 15,06 10⁻⁶ m².s⁻¹) para o corte em cubos, apresentando bons ajustes.

- Secagem de tomate cereja

Azoubel (1999) realizou um estudo da cinética de secagem de tomate cereja, previamente furados, com suas extremidades removidas e ainda foram feitos dois cortes axiais e as partes centrais foram removidas. Previamente aos ensaios de secagem deste produto, parte foi submetida à desidratação osmótica e parte foi seca sem passar pelo pré-tratamento. Utilizou-se um secador de leito fixo, operando com temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidade do ar de secagem de 0,75 e 2,60 m.s⁻¹. O modelo difusivo foi empregado para o ajuste das curva de cinética de secagem, tendo sido obtidos os valores de D_{ef} de 3,010 10⁻¹¹ a 9,442 10⁻¹¹ m².s⁻¹ (sem pré-tratamento) e de 3,010 10⁻¹¹ a 5,473 10⁻¹¹ m².s⁻¹ (com pré-tratamento). Também foi utilizada a equação de Page para ajuste das curvas nas condições estudadas, apresentando bom ajuste, sendo esta equação recomendada pelos autores na predição da cinética de secagem do tomate cereja. Observaram neste estudo que as amostras que passaram pela desidratação osmótica previamente à secagem apresentaram melhor aspecto visual e de cor, menor encolhimento e se mostraram mais macios e flexíveis, porém houve maiores perdas de ácido ascórbico e sua densidade foi aumentada. Já o material submetido à secagem, com convecção forçada sem o pré-tratamento, resultou em um produto final de qualidade inferior por permanecer mais tempo sob alta temperatura. Concluíram que a combinação das técnicas de desidratação osmótica e de desidratação por convecção forçada proporciona tomates secos com melhor qualidade.

- Secagem de citronela

Reis *et al.* (2006), avaliaram os efeitos da secagem da citronela (*Cymbopogon winterianus*), em convecção forçada a 70°C e velocidade do ar de 0,5 m.s⁻¹ e em convecção natural com utilização de estufa, nas temperaturas de 23°C

(ambiente), 50, 60 e 70°C. O intuito foi de avaliar o efeito da velocidade do ar nas curvas de secagem e na obtenção do óleo essencial de citronela. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que na convecção forçada, a velocidade do ar influenciou na curva de secagem, acarretando a eliminação mais acentuada da água quando comparada com a convecção natural na mesma temperatura. Os pesquisadores concluíram ainda que não houve empobrecimento dos princípios ativos mais importantes do óleo essencial obtido, como o citronelal, citronelol, geraniol, eugenol e elemol, nem com a secagem em convecção natural, nem com a secagem em convecção forçada.

- Secagem de abóbora

Um estudo comparativo entre a secagem da abóbora com convecção natural e forçada foi realizado por Borges *et al.* (2008). Neste estudo as abóboras tiveram sua casca, semente e película que envolve as sementes retiradas. Foram divididas as amostras por diferentes cortes, sendo eles com área de $7,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, $10,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ e $12,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, ambas de mesma espessura (0,5 cm). Tais amostras foram secas em convecção natural nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e na convecção forçada as variáveis de controle foram ainda a velocidade do ar de $5,5 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ e $1,65 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$, tendo sido utilizadas as mesmas dimensões e temperaturas utilizadas na convecção natural. Com base nos resultados da cinética de secagem nas condições estudadas, os autores constataram que a elevação da velocidade do ar promove uma maior difusão da umidade, resultando em elevadas taxas de secagem.

- Secagem de laranja

Khafajeh *et al.* (2013), estudaram a secagem de fatias de laranja, utilizando para isso ar quente de escape proveniente de um motor CHP, que aquecia a câmara de secagem. No estudo realizado foram avaliadas as cinéticas de secagem, com o motor operando com carga de 25%, 50%, 75% e 100% de sua capacidade, que resultavam em temperaturas do ar no interior da câmara de secagem de 50°C, 60°C, 80°C e 95°C, respectivamente, com velocidade de ar constante de 1 m.s^{-1} . Também variaram a espessura das fatias de laranja em 3, 5 e 7 mm, para verificar a influência que a espessura exercia na cinética de secagem. Constataram que as fatias de

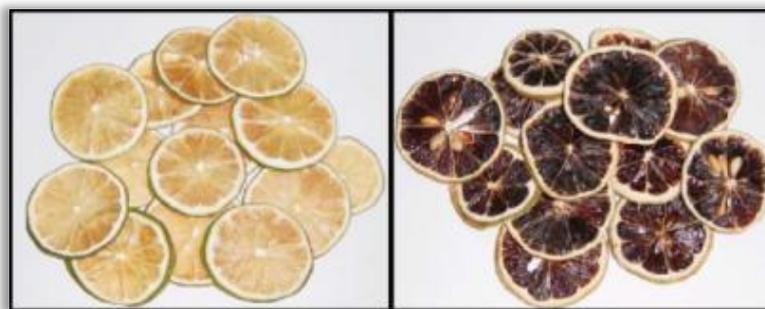
menor espessura apresentaram cinética de secagem mais rápida em comparação com as de espessuras de 5 e 7 mm. Ainda, verificaram que o efeito da temperatura foi significativo e influenciou fortemente o tempo de secagem nas temperaturas de 80 e 95°C. Observaram visualmente que nas temperaturas elevadas formou-se uma camada rígida por baixo e sobre as fatias, criando uma barreira contra a difusão de umidade na superfície do produto, levando a longos tempos de secagem. Os autores atribuíram essa camada rígida formada a existência de açúcares na laranja, mas ainda assim, a secagem nas temperaturas mais altas levou a tempos menores de secagem, se comparada às temperaturas mais baixas. As curvas de cinética de secagem foram ajustadas a doze modelos exponenciais para todas as condições avaliadas e em todos os casos obteve coeficiente de correlação quadrático médio de $0,998 \pm 0,010$.

- Secagem de limão

Além do estudo realizado com a laranja em fatias, apenas um trabalho especificamente sobre secagem de limão fatiado foi encontrado na literatura. Porém o mesmo contribui de maneira significativa, pois demonstra os efeitos da secagem térmica no fruto. Tal estudo foi reportado por Chen *et al.* (2005) que ao submeterem fatias de limão siciliano (*Citrus limon*) à secagem, sem realizar nenhum tipo de pré-tratamento e empregando dois secadores diferentes, observou como as diferentes técnicas de secagem influenciaram no resultado final. Para esse estudo foi desenvolvido pelos autores um secador solar fechado (tipo estufa), de vidro de alta transmitância, operando com aumento gradual de temperatura do ar (de 36 a 52°C, aumentando 2°C por hora), utilizando também um secador convectivo de ar quente operando à temperatura constante de 60°C. A secagem foi realizada pelo período de 8 horas em ambos os casos. É possível observar na Figura 2.4, que o aumento gradual da temperatura na primeira condição, resultou em um produto final com excelente aparência, o que não se repetiu para segunda condição de secagem.

A Figura 2.4 mostra nitidamente como as diferentes condições de secagem afetaram a cor do material. Isto está diretamente associado à qualidade do produto final, visto que aparência ruim é uma das primeiras características observadas pelos consumidores ao adquirir um produto e que pode resultar na recusa da sua compra, seja ele *in natura* ou processado.

Figura 2.4 – Comparação da cor das fatias secas (secador solar *versus* secador convectivo).



Fonte: Chen *et al.*, 2005.

2.5 Cinética de secagem

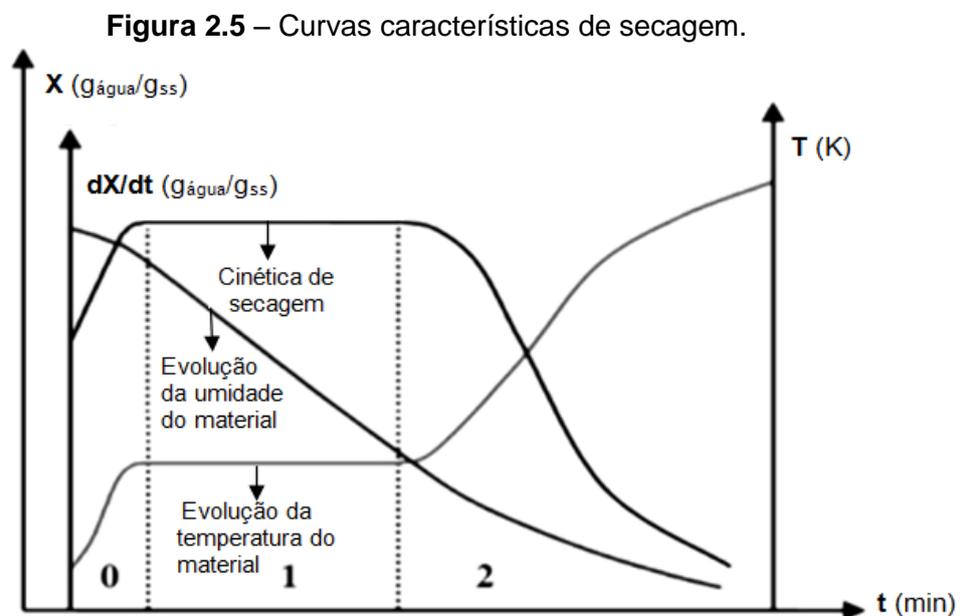
As curvas de cinética de secagem fornecem um conjunto de informações a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água. A obtenção dessas informações é indispensável para o estudo da secagem, para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos, para o estudo da viabilidade econômica da aplicação comercial e também para o dimensionamento, otimização e a simulação do processo (ROCHA, 2011).

Cada produto possui suas propriedades e características próprias, e, portanto, os fenômenos envolvidos na secagem não podem ser generalizados para materiais biológicos, uma vez que esses materiais possuem características intrínsecas e podem sofrer importantes alterações durante a secagem. A cinética de secagem pode ser influenciada por diversos fatores, como por exemplo, mudanças que ocorrem nos produtos, tais como, tamanho, volume, forma, porosidade, massa específica, além de alterações nas propriedades químicas, além da maneira com o produto está disposto no interior do secador, como a espessura da camada do material e ainda pelas condições do ambiente de secagem (HONORES, 1995; GOUVEIA, 1999; PARK *et al.*, 2001).

Um sólido ao ser submetido à secagem térmica passa por dois processos simultâneos. O primeiro processo é o de transferência de energia térmica do ambiente para evaporar a umidade contida na superfície e o segundo é o de transferência da massa da umidade contida no interior do material para a superfície e posterior vaporização devido o primeiro processo (SILVA, 2007).

A determinação da cinética de secagem envolve a obtenção das curvas de umidade em função do tempo, nas quais é possível observar dois ou mais períodos distintos de secagem. A princípio, os materiais contendo elevada umidade, apresentam um período durante o qual a secagem ocorre à taxa constante. Na sequência, o período observado é o de taxa de secagem decrescente, quando a migração interna de umidade controla o processo de secagem (HONORES,1995; SILVA, 2007; MARQUES, 2008).

A Figura 2.5 ilustra as curvas de umidade em função do tempo, temperatura em função do tempo e taxa de secagem em função do tempo e os diferentes períodos, mostrando como evolui a secagem ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de Honores, 1995.

Os diferentes períodos de secagem incluem o período de indução (0), o período de secagem a taxa constante (1), e o período de taxa decrescente (2). O período de indução corresponde ao aquecimento do material. O período de secagem a taxa constante é aquele no qual a toda a energia térmica fornecida é usada na evaporação da água superficial. Finalmente, o período de secagem à taxas decrescentes é aquele em que a migração interna da umidade do material até a superfície é o fator limitante do processo, sendo que esse movimento interno de umidade é função da natureza do sólido, da temperatura e de sua umidade. Este período pode ser ainda subdividido em duas etapas. Na primeira, a secagem ocorre em uma zona de superfície insaturada, isto é, não há água distribuída em toda

superfície de evaporação, pois parte dela encontra-se nos poros internos do produto. Na segunda etapa, a região de vaporização encontra-se no interior do material e pode ocorrer a entrada de ar quente no interior do sólido, provocando a presença de bolsas de ar nos poros internos (GOUVEIA 1999; COSTA, 2013).

Durante o processo de secagem da maioria dos produtos biológicos, o período de secagem à taxa decrescente geralmente é predominante e, portanto, somente ele é observado, uma vez que as resistências à transferência de massa encontram-se essencialmente no interior do material. (FORNELL *et al.*; 1980; PARK *et al.*, 2004).

De acordo com Rocha (2011), a umidade pode movimentar-se no interior do produto por diferentes mecanismos, que incluem, entre outros a difusão de líquido, difusão de vapor, escoamento capilar e difusão de superfície. Na secagem de alimentos os mecanismos mais comuns envolvidos no transporte de massa no período de taxa decrescente são a difusão líquida, escoamento capilar e a difusão de vapor (ROCHA, 2011; COSTA, 2013).

É fundamental descrever as taxas de secagem matematicamente, de forma que as equações obtidas possam ser utilizadas no próprio estudo da cinética de secagem ou em projetos de secadores (GABAS, 1998).

Nas equações, a umidade é geralmente expressa na forma de uma razão adimensional, definida pela Equação 2.1:

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (2.1)$$

onde as umidades em base seca são representados por X e os subscritos, t, 0 e eq, correspondem ao instante t, umidade inicial e umidade de equilíbrio, respectivamente. A umidade de equilíbrio do material pode ser obtida ao final de cada processo de secagem, ou seja, uma umidade de equilíbrio dinâmica. A partir das curvas de umidade em função do tempo são construídas as curvas de taxas de secagem (TX) em função da razão de umidade, segundo a equação a seguir:

$$TX = \frac{X_{t+dt} - X_t}{dt} \quad (2.2)$$

onde X_{t+dt} , é utilizado para representar a umidade no tempo $(t+dt)$ e X_t , é a umidade no tempo t , ambos são dados em $g_{\text{água}}/g_{\text{ss}}$ e dt é a variação do tempo em um intervalo infinitesimal.

2.5.1 Equações matemáticas para cinética de secagem

Os modelos matemáticos são ferramentas úteis na estimativa do tempo necessário para redução da umidade do material sob diferentes condições de secagem, auxiliando nas tomadas de decisão e contribuindo na melhoria da eficiência do processo.

Todavia, a complexidade dos fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na secagem dificultam a descrição matemática através de modelos puramente fenomenológicos, conduzindo os pesquisadores a utilização de equações empíricas e semi-empíricas para prever a cinética de secagem. Cada equação busca representar a cinética de secagem que melhor se ajusta aos dados experimentais e mais adequadas ao processo (FORNELL *et al.*, 1980; PARK *et al.*, 2002; MARQUES, 2008). Além destas equações, também é utilizado o modelo difusivo, que será apresentado no próximo tópico.

2.5.1.1 Modelo difusivo

Para descrever a secagem no período de taxa decrescente, o único modelo que se apoia sobre fenômenos físicos é o modelo advindo da aplicação de um balanço de massa no qual a difusão é o principal mecanismo de transferência de umidade. A aplicação deste balanço resulta em uma equação similar à 2ª Lei de Fick, com a difusividade efetiva substituindo o coeficiente de difusão ordinária:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\text{ef}} \cdot \nabla X) \quad (2.3)$$

A Equação (2.3) despreza a existência de gradientes de temperatura e parte do pressuposto que o fluxo de massa ocorre somente devido às diferenças de concentração de umidade (PERAZINI, 2011).

Ainda, se a geometria do material em estudo puder ser aproximada a uma placa plana infinita com espessura L e admitindo que a transferência de massa seja unidirecional e o coeficiente de difusão efetivo constante, a Equação (2.3) se torna:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

onde, X é a umidade do sólido (b.s.), t é o tempo de secagem (s), z é a coordenada axial na direção do transporte de massa, D_{ef} é a difusividade efetiva ($m^2.s^{-1}$).

Para a solução desta equação diferencial parcial, a condição inicial é considerada como sendo a umidade inicial uniforme e as condições de contorno são: (i) a umidade na superfície inferior é máxima, ou seja, assumindo a condição de simetria ou condição de espelho (quando a troca de massa ocorre apenas em uma das faces do material); (ii) e a umidade na superfície superior é a umidade de equilíbrio.

Conforme Cremasco (2002), como o que se mede nos ensaios experimentais de processos em batelada são concentrações médias espaciais ao longo do tempo, tais concentrações, já em termos de umidade são determinadas com o auxílio da equação:

$$\bar{X} = \frac{1}{L} \int_0^L X(z,t) dz \quad (2.5)$$

A solução analítica da Equação (2.4) quando a secagem ocorre apenas por uma das faces, leva à expressão conhecida como modelo difusional, obtida por Sherwood & Newman citados em Honores (1995) e Tobinaga (1992):

$$MR = \frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \right] \quad (2.6)$$

onde MR é o adimensional de umidade, X_t é a umidade média da amostra (b.s.), X_{eq} é a umidade de equilíbrio dinâmica, X_0 é a umidade no instante inicial ($t=0$), n é o número de termos da série infinita, L é a espessura característica do material (m), D_{ef} é a difusividade efetiva ($m^2.s^{-1}$) e t é o tempo (s) de secagem (PERAZZINI, 2011).

A difusividade nesta equação pode ser entendida como uma medida da facilidade com que a água é transportada do interior do material até a sua superfície. Todavia ela não é intrínseca do material, pois varia conforme mudam as condições de secagem, como a temperatura, a velocidade do ar e também as propriedades da matriz porosa, portanto convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva. A difusividade efetiva engloba diversos mecanismos internos de migração de umidade e seu valor é normalmente obtido pelos ajustes das curvas experimentais. Alguns pesquisadores consideram que este parâmetro é constante, para uma determinada condição operacional, mas também pode variar linearmente ou exponencialmente com a concentração de água (HONORES, 1995; BARROZO, 1995; GOUVEIA, 1999; CREMASCO, 2002; PARK, 2004).

2.5.1.2 Principais equações empíricas e semi-empíricas

Como alternativa ao modelo difusional descrito anteriormente, existem diversas equações empíricas e semi-empíricas, com parâmetros ajustáveis, sendo que nestes parâmetros estão agregadas as resistências às transferências de massa e calor e as características do material. Entretanto, os parâmetros apresentam forte dependência com as variáveis operacionais, fazendo com que a validade dessas equações fique restrita à faixa de condições de operação na qual foram estimadas (MARQUES, 2008; COSTA, 2013).

Na maioria das vezes, tais equações têm-se mostrado como opções mais práticas para prever a cinética de secagem. Existem inúmeras equações, porém as que são mais comumente utilizadas para os ajustes da cinética de secagem são mostradas no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Equações empíricas e semi-empíricas para adimensional de umidade.

Autores	Equações
Lewis	$MR = \exp(-kt)$ (2.7)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$ (2.8)
Overhults	$MR = \exp[-(kt)^n]$ (2.9)
Henderson e Pabis	$MR = a \exp(-kt)$ (2.10)

Fonte: Costa, 2013.

A Equação (2.7) vem de uma analogia com a lei de resfriamento de Newton proposta por Lewis (1921), que leva em conta que toda a resistência ao transporte de umidade encontra-se na camada limite, desconsiderando-se os efeitos no interior do material. As equações de Page (1949) e Overhults *et al.*, (1973) vieram de alterações empíricas da equação de Lewis. Entretanto, Henderson e Pabis (1961) sugeriram uma equação exponencial simplificada contendo dois parâmetros, que se assemelha à solução analítica do modelo difusivo, onde apenas o primeiro termo da série é considerado (BARROZO, 1995; SILVA, 2007; VIEIRA, 2012).

Conforme Vieira (2012), outros autores recomendam modificações nas equações com o intuito de se melhorar o ajuste aos dados experimentais. No entanto, o aumento dos parâmetros das equações na maioria das vezes é apenas para melhorar o ajuste, não tendo nenhum significado físico.

2.5.2 Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais, também conhecidas pelas siglas RNAs, consistem em uma ferramenta computacional de uso relativamente recente. Essencialmente são modelos computacionais de funções simples e fornecem modelos empíricos satisfatórios de processos não-lineares complexos, sendo úteis para uma ampla variedade de propósitos. Essa ferramenta foi desenvolvida em analogia ao funcionamento dos neurônios do cérebro, por isso recebeu esse nome. Este recurso computacional pode ser aplicado para previsões do tempo, também pode ser utilizado para reconhecer padrões diversos, realizar classificação de dados, além de apresentar utilidade quando não se dispõe de informações matemáticas exatas (HIMMELBLAU, 2008; COSTA, 2013; NASCIMENTO, 2013; PERAZZINI, 2014; VIEIRA, 2014).

Com o aumento da capacidade de processamento e *softwares* cada vez mais robustos, foi ampliado o potencial de uso de RNAs. E assim como os modelos difusivo, empíricos e semi-empíricos já mencionados, as redes têm se mostrado uma alternativa promissora para a previsão e simulação do processo de secagem (NASCIMENTO, 2013).

Por meio do aprendizado ou treinamento, que nada mais é que a interpolação ou previsão de forma satisfatória entre os pontos medidos, as redes correlacionam bancos de dados entre si, possibilitando revelar informações não

evidenciadas no processo, sem que se tenha conhecimento prévio da relação entre as variáveis (HIMMELBLAU, 2008; PERAZZINI, 2014).

Segundo Nascimento (2013), o treinamento da rede se dá pelo fornecimento das variáveis de entrada e as respostas obtidas experimentalmente, de forma que o banco de dados seja alimentado com essas informações. A partir disso, num processo de tentativa e erro, os padrões entre as entradas e as saídas são estabelecidos dentro de certo nível de precisão, até que uma concordância seja atingida.

Entretanto, para que uma rede forneça uma boa estimativa dos dados experimentais é necessária a coleta de um grande volume de informações para formar um banco de dados consistente, de maneira que o treinamento da rede seja adequado.

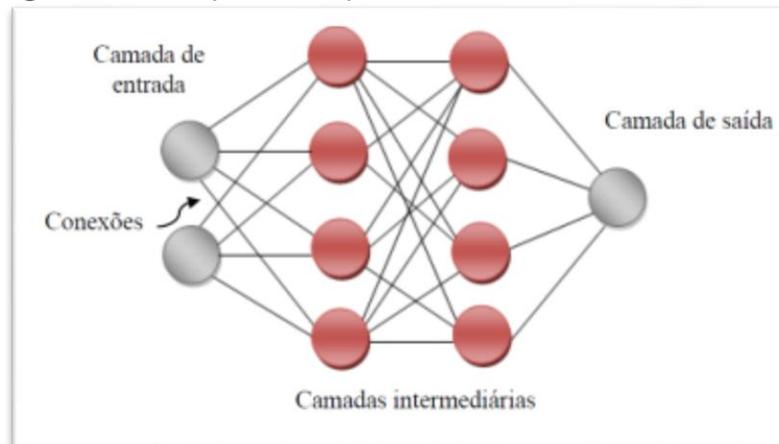
Conforme Himmelblau (2008) existem algumas vantagens gerais no uso das RNAs, tais como:

- as RNAs podem representar um processo altamente não-linear com uma estrutura complexa e em alguns casos, até melhor que muitos outros modelos empíricos;
- são modelos bastante flexíveis e também são frequentemente robustos em relação ao ruído de entrada;
- uma vez desenvolvida e seus coeficientes determinados, elas podem proporcionar uma resposta rápida a uma nova entrada, sem ter a necessidade de resolver repetidamente um conjunto de equações diferentes;

Adicionalmente às vantagens mencionadas, destacam-se também a simplicidade teórica, a facilidade de programação e os bons resultados relatados nos trabalhos encontrados na literatura (NASCIMENTO, 2013). Assim sendo, as Redes Neurais Artificiais se configuram como um excelente mecanismo de predição, justificando assim seu uso em nossa pesquisa.

A estrutura da rede neural, também conhecida como arquitetura, é constituída por três camadas de neurônios, sendo elas a camada de entrada, camada intermediária e camada de saída. Os neurônios das camadas são interligados por conexões, de forma que os neurônios na camada de saída forneçam os resultados, como mostra a Figura 2.6 (NASCIMENTO, 2013).

Figura 2.6 – Esquema simplificado de uma Rede Neural Artificial.



Fonte: Nascimento, 2013.

Não há uma maneira exata de se estimar a quantidade de camadas e de neurônios necessários para a construção de uma arquitetura de RNAs. Diante disso, frequentemente é utilizada uma abordagem empírica, onde várias redes com arquiteturas distintas são então treinadas para o conjunto de dados experimentais. A partir dos resultados obtidos avalia-se cada uma delas e escolhe-se a rede que apresentar o melhor desempenho (COSTA, 2013).

Contudo, procurar a melhor rede dentre as infinitas possibilidades, de certa forma pode ser ineficiente, visto que as RNAs podem produzir resultados essencialmente idênticos para as mesmas entradas. Neste sentido, uma rede relativamente pequena, ou seja, com poucos neurônios na sua camada intermediária, pode ser suficiente para conseguir uma previsão satisfatória dos dados.

No entanto, há limitações no uso das redes que podem ser (HIMMELBLAU, 2008; COSTA, 2013; PERAZZINI, 2014; VIEIRA, 2014):

- se a arquitetura da rede for muito pequena, ou seja, com poucos neurônios, pode não representar bem os dados de saída, ou;
- se houver muitos neurônios na camada intermediária, a rede conseqüentemente terá um grande número de parâmetros ajustáveis, sendo ineficiente, uma vez que a RNA pode adquirir a capacidade “aprender” o ruído das medições e não reconhecer novos padrões, fornecendo resultados ruins.

Segundo informa Himmelblau (2008), a escolha da melhor rede, ou mais adequada não deve se restringir apenas à minimização da soma dos quadrados dos desvios entre a resposta de uma proposta de modelo e um conjunto de dados. O

autor sugere que, como critério de escolha de uma RNA deve-se avaliar outras informações como, por exemplo, a análise de resíduos. A utilização da análise de resíduos de certa forma é simples, pois é um método gráfico que ilustra prontamente uma ampla gama de aspectos entre a rede e os dados experimentais. Com esse método é possível selecionar uma rede que não apresente tendências e oscilações, de forma que os resíduos sejam os mais aleatórios possíveis. Pois uma vez que os resíduos da rede evidencie uma estrutura não aleatória, é um sinal de que o modelo não se ajusta satisfatoriamente aos dados experimentais.

Conforme relata Costa (2013), as primeiras aplicações de redes neurais artificiais iniciaram-se com o trabalho de McCulloch e Pitts (1942). Tal trabalho consistia em descrever um cálculo lógico de redes neurais unificando os estudos da neurofisiologia, lógica e matemática, assumindo um modelo formal em que o neurônio seguia uma lei do “tudo ou nada”, dessa forma a rede realizaria o cálculo de qualquer função computável.

Esta técnica tem sido muito utilizada para descrição de processos químicos industriais. De acordo com Himmelblau (2008), existem na literatura mais de 200 trabalhos que aplicam as RNAs em processos relacionados à engenharia química. Entre eles, alguns trabalhos na área de secagem utilizam este recurso para descrever as curvas de adimensionais de umidade em função do tempo, para diversos materiais e em diferentes condições, também na previsão da umidade de equilíbrio (adsorção e dessorção de umidade), comparando o desempenho da RNA com o ajuste à equações empíricas consagradas. Ainda, as redes têm sido utilizadas para combinar os modelos teóricos e empíricos, originando modelos híbridos, também conhecidos como modelos de caixa cinza, capazes de prever os parâmetros do processo, como coeficientes de transferência de massa e energia, cinética de secagem, entre outros (NASCIMENTO, 2013; VIEIRA, 2014).

Costa *et al.* (2014) utilizaram as RNAs para representar o fenômeno de secagem em convecção forçada de folhas de hortelã (*Mentha x villosa H.*). Para este estudo a estrutura da rede adota foi a de três neurônios na camada de entrada, sendo eles, temperatura, velocidade do ar, tempo de secagem e cinco neurônios na camada intermediária. A RNA com esta estrutura forneceu bons resultados, demonstrando-se suficiente na estimativa da cinética de secagem, mesmo a hortelã sendo um material que apresenta forte encolhimento durante a secagem.

Nascimento *et al.* (2013) utilizaram modelos híbridos neurais baseados nos balanços globais de massa e energia, para determinar o termo de acoplamento das fases por meio de uma Rede Neural, para a secagem de leite integral, desnatado, semidesnatado e com baixo teor de lactose em leite de jorro. O modelo híbrido estimou a variação de umidade no pó obtido durante o processo de secagem e os fenômenos de transferência de calor e massa. Com isso, os modelos híbridos se mostraram promissores na predição de resultados no processo de secagem.

Foi desenvolvida por Perazzini (2014), uma RNA capaz de prever as isotermas de equilíbrio da alumina. A rede desenvolvida era constituída por três neurônios na camada de entrada, sendo eles a umidade relativa, a temperatura e o diâmetro da partícula e na camada de saída por apenas um neurônio, sendo ele a umidade de equilíbrio. A camada intermediária era composta por seis e quatro neurônios para os fenômenos de adsorção e dessorção, respectivamente. Com base nos resultados obtidos, o autor concluiu que os modelos neurais ajustaram-se satisfatoriamente os dados experimentais, se comparados com os modelos empíricos para ajuste das isotermas de equilíbrio.

Vieira *et al.* (2014) desenvolveram um sensor virtual para a produção de leite em pó em um secador de leite de jorro em escala piloto. Os dados experimentais obtidos foram usados para treinar um modelo híbrido desenvolvido anteriormente, com base nos princípios de conservação de massa e energia, para determinar o termo de acoplamento modelado com uma RNA. O modelo representou uma dinâmica aceitável do secador e os autores também notaram que os dados adicionados para um novo processo não afetou sua capacidade de prever a dinâmica do secador. A partir dos resultados obtidos os autores puderam concluir que o modelo híbrido obtido da RNA apresentou uma boa concordância com os dados experimentais, podendo dessa forma ser utilizado para prever o conteúdo de umidade do pó obtido a partir do leite no secador do leite de jorro.

2.6 Atributos de qualidade de alimentos processados

No que se refere a produtos alimentícios, é senso comum como critério de escolha do melhor produto para consumo, a verificação visual do mesmo. Isto

porque a aparência do produto, além de ser de fácil percepção, é o atributo mais atrativo ao consumidor, podendo até mesmo influenciá-lo no julgamento de outras características, como o sabor. Portanto, é interessante que sejam avaliados os principais atributos de qualidade, como cor e encolhimento, conforme será mostrado nos próximos tópicos.

2.6.1 Avaliação de cor

A cor de um produto alimentício que foi submetido a algum tipo de processamento é usualmente considerada como um parâmetro de qualidade. A relação existente entre a cor e outras características, como a composição química, o grau de desenvolvimento e o estágio de maturação do alimento é de grande importância, uma vez que se utiliza a cor como indicador de transformações naturais dos alimentos frescos ou de mudanças ocorridas no processo industrial (CHEN *et al.*, 2005; CÓRDOVA, 2006).

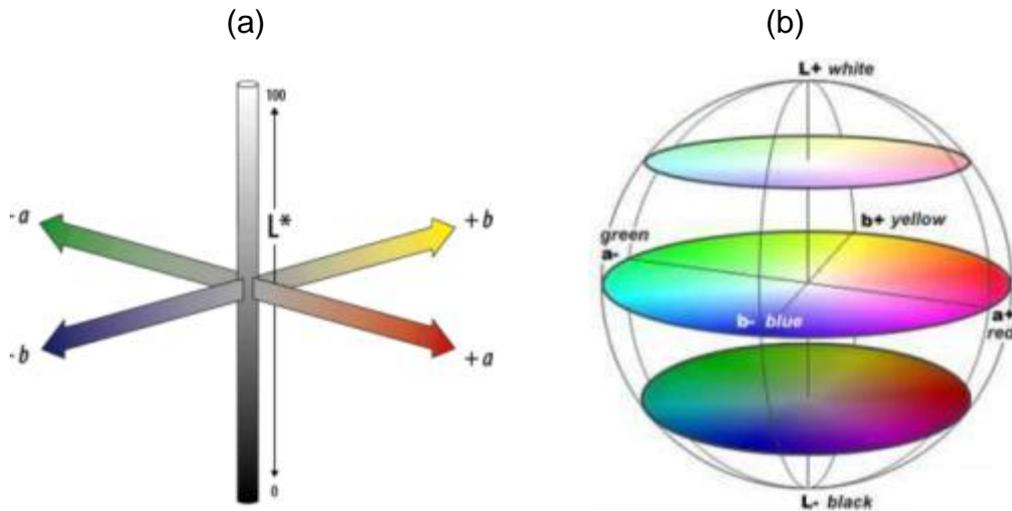
Diante do exposto, é muito útil avaliar a cor como um dos parâmetros indicativos de qualidade. Para avaliar diferentes pigmentos ou a cor de alimentos, a técnica de colorimetria é muito utilizada. Geralmente a avaliação da cor do material é feita com o auxílio de um espectrofotômetro, tal equipamento fornece a cor do material de acordo com alguns parâmetros quantitativos em uma escala de cores. O sistema de leitura CIELab é comumente utilizado por este tipo de análise, fornecendo valores de (L^*), (a^*) e (b^*). Cada um desses valores expressa uma determinada condição de cor que o material apresenta (CÓRDOVA, 2006; MARQUES, 2008; ROSANOVA, 2013), como é descrito a seguir:

- Parâmetro (L^*): indica a luminosidade do material e é expresso em valores que variam de 0 (para o preto) até 100 (para o branco).
- Parâmetro de cromaticidade (a^*): valores positivos indicam os tons da cor vermelha e negativos indicam os tons da cor verde, ou seja, este parâmetro representa a intensidade da cor verde ou vermelha,
- Parâmetro de cromaticidade (b^*): valores positivos indicam os tons da cor amarela e negativos indicam os tons da cor azul, isto é, este parâmetro representa a intensidade da cor azul ou amarela.

Os parâmetros cromáticos (a^*) e (b^*), variam entre - 60 até +60 nos eixos coordenados. Sendo que para cores neutras como branco, preto e cinza, tais

valores se aproximam de zero. A Figura 2.7 ilustra como os parâmetros são determinados a partir dos eixos coordenados.

Figura 2.7 – Representação do sistema acromático e cromático do CIELab (a) e (b) espaço de cor CIELab.



Fonte: Marques, 2008.

Existem na literatura específica, várias pesquisas que avaliam algum tipo de processamento na conservação de produtos alimentícios. Nessas pesquisas, a técnica de análise colorimétrica é empregada com a finalidade de verificar a qualidade do processamento aplicado sobre o produto. Algumas dessas pesquisas serão descritas neste tópico, no entanto, apenas um trabalho de secagem de limão que faz uso deste tipo de avaliação foi encontrado. Tal estudo se refere à secagem de limão siciliano (*citrus limon*) realizado por Chen *et al.* (2005), já mencionado anteriormente. Os autores avaliaram as alterações de cor que ocorreram ao final de cada processo da secagem convectiva por meio de um espectrofotômetro. O equipamento forneceu as medidas de cada um dos parâmetros (L^* , a^* , b^*), tanto para a secagem em secador solar, como para a secagem no secador convectivo convencional, de forma que fosse possível compará-los quantitativamente. Os valores reportados pelos pesquisadores estão apresentados no Quadro 2.6.

Nota-se que os parâmetros apresentaram valores bem próximos uns dos outros. Entretanto, para o parâmetro que indica a luminosidade (L^*), os valores demonstram que o secador solar forneceu fatias de limão com tonalidade mais luminosa em comparação com o secador convectivo, que apresentou o valor mais baixo, já que quanto mais baixo for (L^*), maior o escurecimento da amostra.

Quadro 2.6 – Parâmetros colorimétricos (L^*), (a^*) e (b^*), para secador solar e secador convectivo, das fatias de limão siciliano.

Parâmetros	Secador solar (36 °C a 52 °C)	Secador Convectivo (60 °C)
L^*	41,7	33,4
a^*	3,5	3,9
b^*	10,87	13,2

Fonte: Adaptado de Chen *et al.*, (2005).

Em outro estudo de secagem convectiva, neste caso secando amoras pré-tratadas osmoticamente, Nsonzi e Ramaswamy (1998) avaliaram a qualidade de amoras pela diferença total de cor. Este parâmetro foi relacionado à temperatura aplicada, a concentração da sacarose e ao tempo de imersão na solução osmótica. Os autores observaram que o uso de tempos menores de contato na desidratação osmótica, minimizou a perda de cor durante a secagem por convecção.

Photon *et al.* (2001) ao secarem maçãs em microondas, também usando desidratação osmótica como forma de pré-tratamento, verificaram altos valores de (L^*), mesmo quando utilizavam temperaturas acima de 50°C. Portanto, o resultado obtido, indicou que o produto final não sofreu escurecimento significativo ao ser submetido às temperaturas mais altas. No entanto, as amostras que não foram pré-tratadas osmoticamente antes da secagem, apresentaram maior escurecimento se comparadas àquelas com esse processamento prévio.

Reis *et al.* (2006) estudaram os efeitos da secagem convectiva e a vácuo sobre a cor de fatias de berinjela, ambas submetidas à temperatura de 65°C. As medidas obtidas pelos autores demonstraram que a cor das fatias de berinjelas desidratadas pelo processo convectivo, apresentou menor escurecimento quando comparadas ao produto da secagem a vácuo. Os valores obtidos dos parâmetros de luminosidade (L^*) foram de 47,63 no secador convectivo e de 24,20 na estufa a vácuo. Também concluíram que a secagem convectiva forneceu um produto final menos avermelhado, ou seja, o processo convectivo preservou melhor a aparência do produto. Além disso, constataram que a cor das fatias variou linearmente com a umidade. Os autores, citando Hunterlab (1996), ressaltaram que ao analisar apenas a variação global da cor para comparar cores de objetos pode levar à conclusões incorretas, portanto sendo necessária a avaliação de cada parâmetro isoladamente.

Na secagem convectiva de maçãs Fuji com e sem o pré-tratamento de desidratação osmótica em solução de sacarose, Córdova (2006) verificou que o

produto final apresentou valores mais baixos de luminosidade (L^*), demonstrando que houve escurecimento da fruta processada em maior ou menor grau, mesmo nas que passaram por pré-tratamento, em relação à fruta *in natura*.

Marques (2008) utilizando-se da técnica de liofilização para desidratação de frutas tropicais observou que tanto a goiaba como também o mamão papaya apresentaram elevada luminosidade (L^*). Além disso, ocorreu também a diminuição na coloração vermelha (a^*), que foi atribuído à perda de carotenóides totais (licopeno) e também houve diminuição do parâmetro cromático (b^*), atribuindo essa diminuição a provável perda de α -criptoxantina. Este estudo demonstrou que a liofilização provoca a diminuição na intensidade das cores, fornecendo um produto final com cores menos intensas, embora mais luminosas.

Rosanova (2013) submeteu tomates frescos a campos elétricos (descarga corona), uma técnica de preservação de produtos do gênero alimentício, como forma de aumentar seu tempo de prateleira. Analisou a variação média de cor da epiderme do tomate antes da aplicação de campos elétricos e depois de 15 dias de armazenamento dessas amostras. Essas amostras tiveram suas variações de cor comparadas às amostras de controle, que não foram expostas aos campos elétricos, mas apenas armazenadas em geladeira ou câmara climatizada, pelo mesmo período. No entanto, verificou que a variação de cor não foi significativa se comparada a das amostras que não receberam nenhum tipo de processo para sua conservação.

2.6.2 Encolhimento

A perda de água causa danos à estrutura celular do produto biológico, levando à mudança na forma e ao decréscimo em suas dimensões, podendo ser irreversíveis. A redução de tamanho do tecido celular gerada pela secagem do material é um fenômeno conhecido como contração volumétrica. A contração volumétrica pode ser muito intensa dependendo do método e das condições de secagem aplicados, afetando os parâmetros da transferência de calor e massa, de maneira que o encolhimento deve ser considerado no estabelecimento de modelos de cinética de secagem (ROCHA, 2011).

As células vivas de origem animal ou vegetal são constituídas por duas estruturas, sendo elas o protoplasma e a parede celular. Essas células exibem um comportamento denominado turgor, ou seja, o protoplasma, um fluido incompressível e altamente viscoso, exerce a pressão hidrostática interna distendendo a parede celular e esta por sua vez comprime o líquido contido no seu interior. Com a desidratação a tensão que o fluido exerce sobre a parede celular é menor, resultando no encolhimento do material (MURR, 1992, MARQUES e FREIRE, 2009).

Conforme relatado por Marques e Freire (2009), durante a secagem de frutas ocorrem mudanças que podem ser observadas macroscopicamente. No entanto, essas mudanças ocorrem na microestrutura (célula) do tecido vegetal, como ruptura celular, formação de cavidades e encolhimento devido à degradação e microtensões da membrana plasmática e da parede celular. As rupturas celulares formam cavidades de tamanhos e formatos distintos, as quais aumentam a porosidade do material. Para Córdova (2006), um alimento ao ser processado tem sua microestrutura destruída e reconstituída, o que significa que ocorre uma série de operações de reestruturação e reorganização da mesma. Conforme Borges *et al.* (2008), tais modificações que provocam o encolhimento são promovidas pelo stress térmico e principalmente pela remoção de umidade.

Segundo Park *et al.* (2014), as alterações no volume sofridas por materiais biológicos durante a secagem, ocorrem principalmente pelas altas umidades iniciais destes materiais. Logo, a condução de calor e a difusão de massa são realizadas através de uma interface cuja forma e tamanho mudam com o tempo.

O encolhimento é um fenômeno que tem sido muito discutido em várias pesquisas e nota-se um comportamento diferente para cada alimento estudado e para cada geometria. Ao estudarem a secagem de batatas Wang e Brennan (1995), verificaram que o encolhimento afetou as propriedades físicas do material, como densidade e a porosidade, e ao aumentar a temperatura de secagem a densidade diminuiu e com o decréscimo da umidade o volume decresceu linearmente.

Park *et al.* (2004) estudaram a secagem de caqui (*Diospyrus kaki*) da variedade giombo. O processo de secagem foi analisado pelos pesquisadores considerando a cinética de secagem com e sem encolhimento da amostra. Neste estudo os resultados obtidos para a difusividade efetiva nos dois casos, mostraram que não levar em conta o encolhimento resulta em um coeficiente difusional superestimado.

O fenômeno do encolhimento também foi investigado por Marques (2008), após a liofilização do abacaxi e da acerola, com base na redução do volume. Observou-se que o abacaxi reduziu seu volume em aproximadamente 6% e, a acerola reduziu em 17% do seu volume inicial. Estes resultados foram considerados pequenos, devido à liofilização ser um processo que preserva o material com elevada porosidade, uma vez que o colapso dos poros vazios são menos severos ou até mesmo desprezíveis, ao se comparar com a secagem convectiva.

Yan *et al.* (2008) estudaram o encolhimento das fatias de banana, manga e abacaxi, que foram submetidas a secagem convectiva em estufa a 70°C, até atingir aproximadamente 5% de umidade (b.u.). Na análise das imagens, observaram que todas elas sofreram encolhimento significativo, porém mais acentuado no início da secagem, até atingir em média 38% de umidade (b.u.) e a partir daí mostrou grau reduzido de encolhimento. Os autores atribuíram a redução no grau de encolhimento na fase final de secagem ao possível endurecimento das superfícies e a fixação da amostra na fase anterior. As curvas obtidas do encolhimento durante o processo de secagem mostraram tendência polinomial de segunda ordem.

Entre as técnicas mais comuns utilizadas para determinação experimental do encolhimento macroscópico estão as medidas diretas das dimensões do material com o uso de paquímetro ou micrômetro e via análise de imagem com *software* adequado (MARQUES e FREIRE, 2009).

Constata-se com base na revisão apresentada, que a secagem de alimentos é um processo complexo e requer investigações detalhadas para a compreensão de todos os fenômenos envolvidos. Apesar da relevância econômica do limão, poucos trabalhos voltados ao estudo da sua secagem foram desenvolvidos e nenhum deles no Brasil. Assim, este trabalho visa contribuir com uma análise sobre a secagem das fatias do limão tahiti e de suas frações, o epicarpo, o mesocarpo e o endocarpo.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Matéria prima

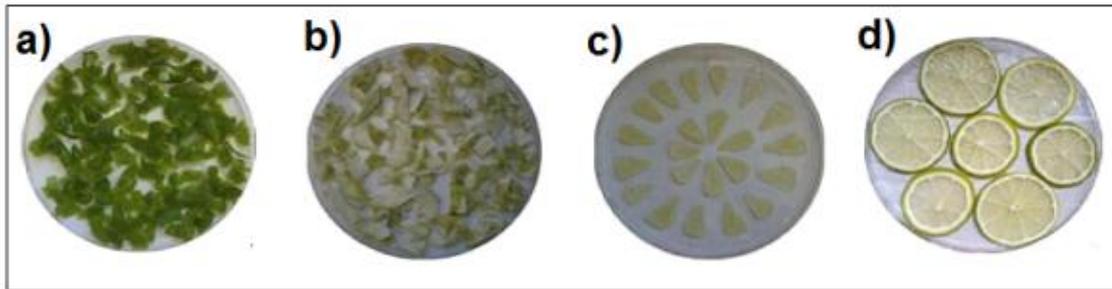
A matéria prima utilizada nos experimentos são os frutos do limão tahiti (*Citrus Latifolia* – Tanaka). Os frutos foram coletados sempre em um mesmo estabelecimento da cidade de São Carlos-SP. Os limões foram escolhidos dando-se preferência aos frutos com aproximadamente as mesmas dimensões e características visuais de maturação, ou seja, frutos firmes, de tamanhos próximos e com a coloração verde intensa e uniforme.

3.2 Preparação das amostras

Todos os frutos adquiridos passaram por higienização prévia com água clorada, para eliminação de impurezas provenientes da colheita, do armazenamento e do transporte efetuado antes do início do processamento.

Para o corte das fatias foi utilizado um processador de alimentos doméstico, que produz fatias com espessura média de 2,4 mm. As frações do limão (epicarpo e mesocarpo) foram separadas manualmente com a ajuda de uma faca de cozinha. O endocarpo teve a casca totalmente removida, mantendo-se apenas a membrana que formam os gomos. Os gomos foram separados e fatiados também com uma faca de cozinha, formando pedaços triangulares. Feito isso, foram selecionadas as amostras com espessura média de 2,5 mm, aferida com um paquímetro digital (precisão de 0,01 mm). Fotos de amostras das fatias inteiras, epicarpo, mesocarpo e endocarpo são mostradas na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Frações do limão utilizadas nos ensaios de secagem, (a) epicarpo, (b) mesocarpo, (c) endocarpo e (d) fatias.



Fonte: Acervo pessoal.

A secagem das amostras de cada parte mencionada foi executada nas temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C, 60°C e 70°C com duas ou três repetições (para as quais foram utilizadas amostras adquiridas em dias diferentes)

3.3 Determinação de cor

Os ensaios colorimétricos, para a determinação da cor das fatias e das frações do limão tahiti, foram executados empregando-se um espectrofotômetro marca Konica Minolta, modelo CM-5, mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Espectrofotômetro marca Konica Minolta, modelo CM-5.



Fonte: Rosanova, 2013.

Para esse teste, foi utilizado o sistema de leitura CIELab, configurado com luminosidade D65 e ângulo de observação de 10°. O equipamento forneceu os

parâmetros colorimétricos (L^* , a^* e b^*), antes do início dos procedimentos, para obtenção de um padrão da amostra *in natura*. Tal determinação também foi executada no material seco após as diferentes condições de secagem.

As amostras do epicarpo, mesocarpo e endocarpo, foram medidas com o auxílio da cubeta, visto que o material seco tem aspecto granular, de forma que o uso deste acessório se fez necessário. Já aferição de cor das fatias, se deu por meio de uma placa com orifício de 3 mm, onde foram tomadas medidas de cor em três pontos da fatia, sendo eles no centro, nas bordas e num ponto intermediário entre estes dois. Tanto a cubeta e a placa mencionadas são acessórios que compõe o equipamento.

Com os valores obtidos de (L^*), (a^*) e (b^*), foi calculada a diferença média de cor entre o material fresco e processado por meio da Equação (3.1).

$$\Delta E^* = \sqrt{[(L_{fin} - L_{ini})^2 + (a_{fin} - a_{ini})^2 + (b_{fin} - b_{ini})^2]} \quad (3.1)$$

3.4 Determinação da umidade

A determinação da umidade das fatias, endocarpo, epicarpo e mesocarpo, foi feita por gravimetria. Foram utilizadas as amostras secas nos ensaios cinéticos com massas iniciais conhecidas e em seguida as mesmas foram levadas à estufa a vácuo marca Tecnal, modelo TE-395, como mostra a Figura 3.3.

Este procedimento foi executado com a estufa operando na temperatura de 70°C por 24 horas, de acordo com metodologia descrita pela AOAC (1995) adaptada por PARK (2001). As medidas de massa foram realizadas em balança semi-analítica marca GEHAKA modelo 440, (precisão 0,001 g) e a umidade foi calculada através da variação de massa inicial e final, considerando que a diferença correspondente à água evaporada.

Figura 3.3 – Estufa a vácuo, marca Tecnal, modelo TE-395.



Fonte: Acervo pessoal

3.5 Determinação das dimensões

Para a análise do encolhimento das fatias após a secagem, as amostras foram fotografadas antes e depois do processo. Para a verificação do comportamento do encolhimento durante a secagem, foi escolhida aleatoriamente a temperatura de 60°C para a determinação das dimensões. As imagens digitais obtidas com uma câmera digital marca Samsung, modelo ES60, foram então submetidas à análise por meio do *software* Image-Pro Plus 6[®].

O *software* foi calibrado utilizando-se para isso o diâmetro interno da placa de petri utilizada nos ensaios, por ser de uma dimensão conhecida (146 mm) e comum em todos os ensaios. Na calibração, o *software* utiliza a dimensão conhecida e fornecida ao sistema, como referência para a relação de pixels da imagem, que por sua vez, provê ao usuário as dimensões escolhidas de acordo com o número de pixels contidos na fronteira (YAN et al., 2008).

As medições se deram por meio de uma ferramenta de seleção da amostra presente no *software* e cada fatia teve seu perímetro selecionado e marcado manualmente, uma a uma. Após a seleção, a análise de imagem foi efetuada pelo programa, que em seguida forneceu as dimensões como a área, o perímetro e o diâmetro médio das fatias, em milímetros.

3.6 Secagem convectiva

Os ensaios de secagem convectiva das fatias, do endocarpo, do epicarpo e do mesocarpo, foram conduzidos em estufa sem circulação forçada de ar, marca Tecnal, modelo TE-394/1, mostrada na Figura 3.4, de escala laboratorial, com capacidade volumétrica de 64 litros, onde a movimentação do ar no interior da estufa se deu apenas por convecção natural.

Figura 3.4 – Estufa sem circulação forçada de ar, marca Tecnal, modelo TE-394/1.



Fonte: Acervo pessoal.

Cada uma das amostras citadas foi submetida à secagem utilizando-se as temperaturas do ar de 30°C, 40°C, 50°C, 60°C e 70°C. A faixa de temperaturas utilizada neste trabalho é a usualmente empregada por diversos autores na secagem de frutas.

Durante a secagem, para a obtenção da umidade de equilíbrio dinâmica, as amostras tiveram suas massas aferidas até que atingissem a massa constante ao final de cada processo. Para a verificação de variação de massa de cada material durante os ensaios, foi utilizada uma balança semi-analítica marca GEHAKA modelo 440, (precisão 0,001 g). Com os dados coletados foram construídas as curvas de adimensional de umidade em função do tempo e as curvas das taxa de secagem em função do adimensional de umidade, para isso utilizou-se as equações (2.1) e (2.2), respectivamente, apresentadas na revisão de literatura.

3.7 Tratamento de dados

Com o propósito de representar as cinéticas de secagem para todas as amostras nas diferentes condições avaliadas, efetuou-se o ajuste aos dados experimentais ao modelo difusional e as equações empíricas e semi-empíricas (Equações 2.6 a 2.10), apresentadas no Capítulo 2.

Os parâmetros das equações foram determinados pelo método da minimização da soma dos quadrados dos resíduos, Equação (3.2), utilizando-se para isso um suplemento denominado *Solver*, presente no *software* Microsoft Excel 2007.

$$SQR = \sum_{n=1}^{\infty} (x_{\text{pred},i} - x_{\text{exper},i})^2 \quad (3.2)$$

A determinação da qualidade do ajuste do modelo foi avaliada por meio do coeficiente de correlação quadrático (R^2), calculado com a função “correl” presente no Excel. Foram considerados como melhores ajustes aquelas equações ou modelo que obtiveram valor de R^2 próximos da unidade e os menores valores da soma dos quadrados dos resíduos (SQR).

Adicionalmente a isso, as Redes Neurais Artificiais foram utilizadas como ferramenta para obtenção de uma equação empírica para o ajuste aos dados experimentais, em todas as temperaturas avaliadas. Além disso, também foram estimadas as cinéticas de secagem em outras temperaturas, dentro do intervalo de 30 a 70°C.

A RNA foi desenvolvida com o *software* MATLAB® versão R2007b e para o ajuste da rede neural, utilizou-se a função *nftool* presente neste *software*. Os dados de entrada, ou *inputs*, fornecidos para a RNA foram os tempos de secagem e as temperaturas utilizadas e para identificação de cada material, utilizou-se como variável qualitativa os números 1, 2, 3 e 4, para epicarpo, mesocarpo, endocarpo e fatias, respectivamente. Os dados de saída experimentais, ou *targets*, fornecidos para a RNA foram todos os adimensionais de umidade obtidos nos ensaios. Tanto os *inputs*, como os *targets*, foram ordenados em coluna numa planilha *Microsoft Excel* 2007. Depois de executada a RNA forneceu os valores de saída calculados, ou *outputs*, sendo estes os valores preditos pela Rede.

A RNA utilizada neste trabalho foi a *feed-forward*, que é composta por uma estrutura que apresenta única camada intermediária.

Foram construídas e investigadas várias redes com diferentes números de neurônios na camada intermediária, iniciando com 3 até 35 neurônios, de um em um e de 40 até 130 neurônios, de dez em dez. O *software* dividiu aleatoriamente os dados, sendo que para o treinamento da rede selecionou-se de 90% a 60% dos dados, para validação ou teste utilizou-se de 5 a 20% dos dados.

O número de épocas (interpolações) no treinamento da RNA foi determinado pela função *nftool*, que forneceu diferentes combinações de treinamento a cada solicitação de treinamento requerido pelo usuário. As épocas finalizavam-se automaticamente, quando atingido o menor valor do erro quadrado médio para a combinação avaliada pela ferramenta.

O *software* fornecia para cada rede criada o coeficiente de correlação quadrático nas etapas de treinamento, validação e teste. Com base nesse coeficiente, foi possível avaliar a qualidade do ajuste e analisar os gráficos que apresentavam os resultados preditos e compará-los com os dados determinados experimentalmente.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Umidade

Os valores médios das umidades iniciais do epicarpo, mesocarpo, endocarpo e das fatias do limão tahiti, obtidos separadamente, com seus respectivos valores de desvio padrão são apresentados na Tabela 4.1.

Os resultados mostram que os conteúdos de umidade variam bastante em cada fração. As fatias e o endocarpo apresentaram as maiores umidades iniciais, sendo 5,60 e 8,05 ($g_{\text{água}}/g_{\text{ss}}$), respectivamente. As umidades iniciais em base seca para as frações do epicarpo e mesocarpo foram até quatro vezes inferiores se comparadas às frações contendo o suco. O valor de umidade inicial, em base úmida, das fatias foi de 84,71% e estão de acordo com os valores reportados por Khafajeh *et al.* (2013), que encontraram o valor de 85,4% para fatias de laranja. Valores das umidades das frações isoladas de frutas cítricas não foram encontrados na literatura.

Tabela 4.1 - Umidades iniciais médias das frações e fatias do limão tahiti.

Componente	X_0 base seca ($g_{\text{água}}/g_{\text{ss}}$)	X_0 base úmida (%)
Epicarpo	2,5±0,3	73,0±0,6
Mesocarpo	2,3±0,3	73,0±0,6
Endocarpo	8,0±0,7	89,0±0,5
Fatias	5,6±0,4	85±1

Fonte: Acervo pessoal.

Uma vez que cada uma das frações possui características e composições químicas específicas, as umidades também diferem entre si. Contudo, apesar das umidades serem diferentes em cada componente, o conjunto encontra-se em equilíbrio químico e não ocorre a migração da umidade da fração mais úmida para a menos úmida. Isto porque a atividade da água, que é a grandeza termodinâmica que caracteriza o potencial químico, é a mesma em todas as frações que compõe o fruto, ou seja, não há gradiente de potencial químico entre as frações que promova a

migração de umidade.

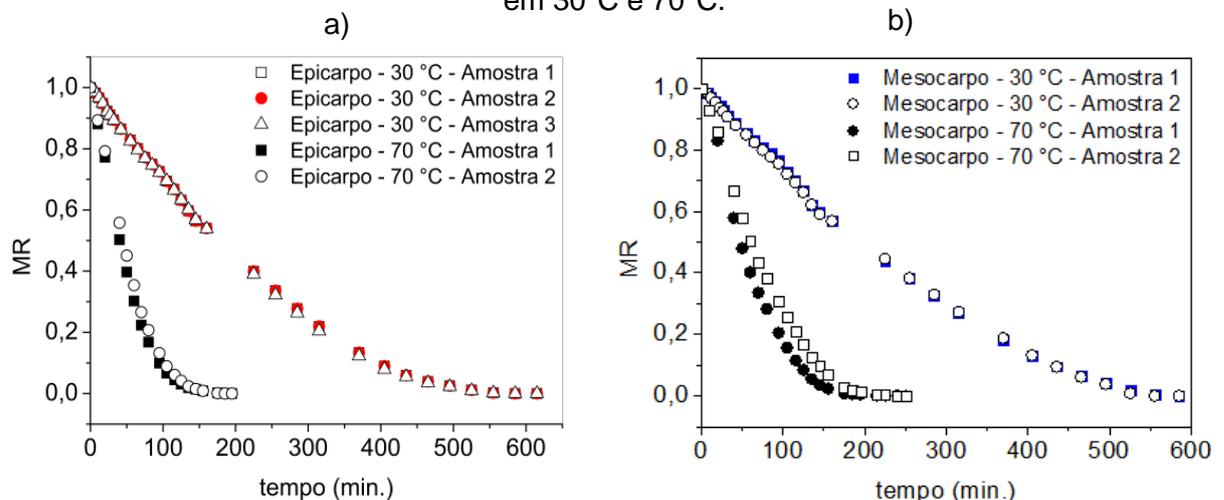
4.2 Análise da reprodutibilidade da cinética de secagem

A matéria prima utilizada neste trabalho é um produto heterogêneo, sendo formado por frações que possuem características próprias e muito diferentes entre si em vários aspectos, conforme apresentado em detalhes na revisão de literatura. Cada parte tem usos e aplicações específicas, o que justifica o estudo da secagem das frações, epicarpo, mesocarpo e endocarpo, de forma individualizada, além do que a análise da secagem das partes pode auxiliar na compreensão do processo de desidratação que ocorre na fatia.

Antes destes resultados serem devidamente discutidos, faz-se necessária uma avaliação da reprodutibilidade dos dados experimentais do adimensional de umidade em função do tempo. Para tal avaliação, ajustou-se aos dados experimentais e suas réplicas uma equação que os represente (YAN *et al.*, 2008; FELIZARDO, 2014).

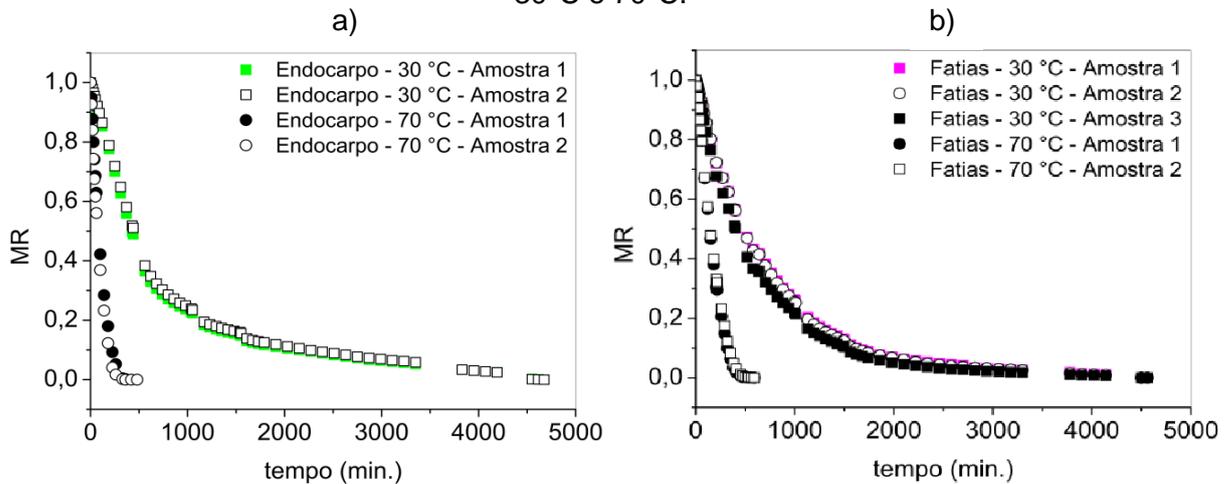
As Figuras 4.1 e 4.2 mostram as curvas das cinéticas de secagem, para a menor temperatura utilizada, 30°C e para a maior temperatura utilizada 70°C, para todas as frações e fatias e suas réplicas e em alguns casos triplicatas.

Figura 4.1 – Reprodutibilidade das amostras desidratadas de (a) epicarpo e (b) mesocarpo, em 30°C e 70°C.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.2 – Reprodutibilidade das amostras desidratadas de (a) endocarpo e (b) fatias, em 30°C e 70°C.



Fonte: Acervo pessoal

Os valores médios dos desvios padrão, entre os adimensionais de umidade encontrados para o epicarpo, mesocarpo, endocarpo e fatias foram de $\pm 0,020$, $\pm 0,030$, $\pm 0,030$ e $\pm 0,010$ e, os valores do coeficiente de correlação (R^2) foram de 0,992, 0,998, 0,990 e 0,998, respectivamente. Portanto, com base no desvio padrão e no coeficiente de correlação, constata-se que, de maneira geral, a reprodutibilidade foi boa, uma vez que os desvios ficaram em torno de no máximo 3%. A partir desses resultados, serão apresentados e discutidos os resultados baseados em valores médios dos adimensionais de umidade para cada fração e para as fatias.

4.2.1 Secagem do epicarpo

4.2.1.1 Curvas de cinética de secagem do epicarpo

A secagem das lascas do epicarpo foi realizada até atingir massa constante, nas temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C, 60°C e 70°C, resultando na remoção de aproximadamente 73% (b.u) da umidade presente neste material.

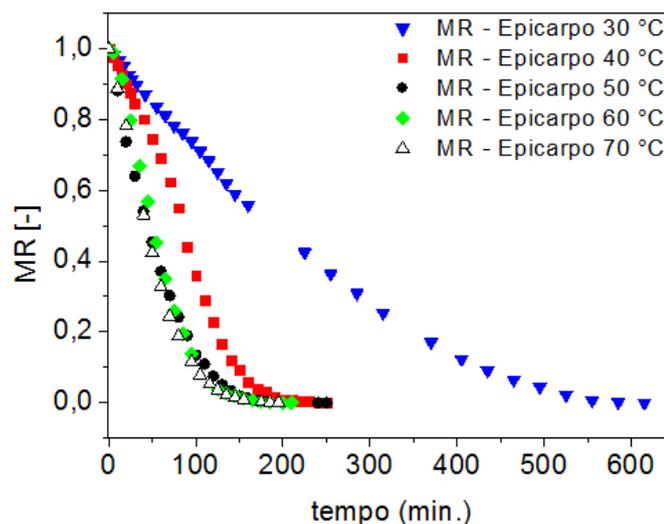
Os resultados das cinéticas de secagem obtidas para as condições estudadas são apresentados na Figura 4.3. Nesta figura é possível verificar que o processo de secagem levou cerca de 200 a 250 minutos nas temperaturas de 40°C a 70°C, tendo diferença expressiva apenas na temperatura de 30°C, na qual levou cerca de 600 minutos para as amostras atingirem a umidade de equilíbrio dinâmica. A partir deste resultado, nota-se que a temperatura de 30°C, foi ineficiente para a

remoção da umidade do interior do material com a mesma eficiência que nas temperaturas mais altas. Isto ocorre porque a energia térmica cedida ao sólido e a pressão de vapor de água na superfície são pequenas, não favorecendo a migração de umidade do interior do material para a superfície e sua evaporação. Dessa forma, as taxas de transferência de massa foram muito baixas nesta temperatura, sendo necessário um tempo em torno de três vezes maior que o tempo requerido nas temperaturas acima de 40°C.

Todavia, aumentando a temperatura de 30°C para 40°C, maior quantidade de energia foi transferida para o epicarpo e a difusão da umidade do interior do sólido para a sua superfície para evaporação foi favorecida.

Para as temperaturas acima de 50°C, o aumento da energia fornecida em cada ensaio para a remoção de umidade não aumentou a a velocidade de secagem. Esse comportamento precisaria ser melhor investigado e pode estar associado a diversos fatores, como por exemplo, o corte do epicarpo, a maneira como a água está ligada à estrutura do material, que é composta basicamente de celulose, hemicelulose, pectina e lignina, ou ainda as possíveis reações ou degradação do material em temperaturas acima de 50°C dificultando a saída da umidade.

Figura 4.3 – Umidade adimensional em função do tempo para o epicarpo, nas temperaturas avaliadas.

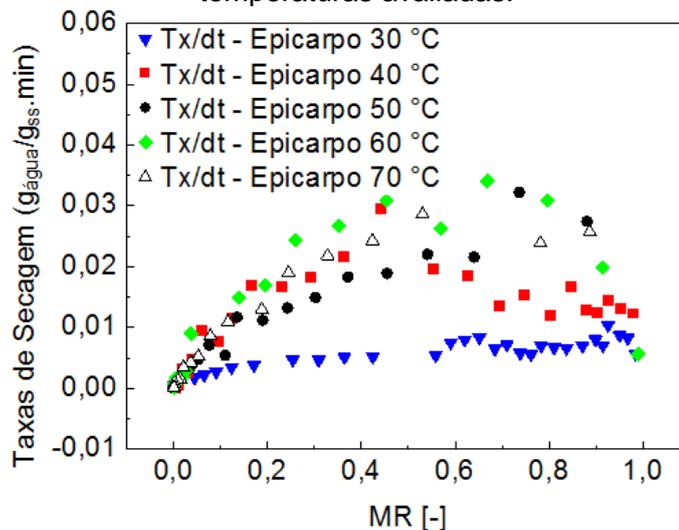


Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 4.4, que mostra as taxas de secagem em função do adimensional de umidade, verifica-se a presença do período de aquecimento e logo em seguida o período decrescente, que predomina em toda a secagem, não tendo

sido observado período constante. Todavia, a taxa de secagem correspondente à temperatura de 30°C, não mostrou esse período de aquecimento, apenas o período decrescente foi observado. Isso porque no dia do experimento a temperatura ambiente era de 24°C, ou seja, o material já se encontrava numa temperatura muito próxima da temperatura de operação do secador. De modo geral, o período de aquecimento, foi desprezível em relação ao tempo de secagem.

Figura 4.4 – Taxas de secagem do epicarpo em função da umidade adimensional, nas temperaturas avaliadas.



Fonte: Acervo pessoal.

4.2.1.2 Ajuste das curvas de cinética de secagem do epicarpo

Com base nos resultados apresentados da cinética de secagem do epicarpo, foram realizados os ajustes às curvas experimentais com o uso das equações empíricas e semi-empíricas, descritas na revisão de literatura.

A Tabela 4.2, apresenta os resultados das análises estatísticas, para as diferentes temperaturas utilizadas nos ensaios. A equação de Lewis e Henderson e Pabis, foram as que apresentaram os mais baixos valores para R^2 , variando de 0,955 a 0,994 e maiores valores das somas dos quadrados dos resíduos, variando de 0,022 a 0,298. Já as equações de Page e Overhults, forneceram os melhores resultados, sendo de 0,997 até 1,000 para R^2 e de 0,001 a 0,018 para SQR. Sendo assim, estas equações foram considerados representativos para descrever a cinética de secagem do epicarpo.

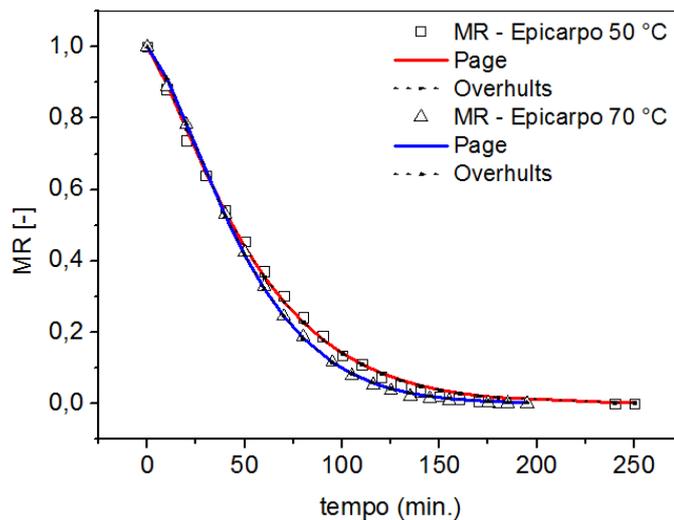
Tabela 4.2- Resultados estatísticos para ajuste das equações empíricas e semi-empíricas para o epicarpo.

Modelo	Parâmetro	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Lewis	k	$4,13 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$1,96 \cdot 10^{-2}$
	R ²	0,990	0,965	0,994	0,983	0,990
	SQR	0,092	0,298	0,028	0,107	0,041
Page	k	$8,09 \cdot 10^{-4}$	$1,820 \cdot 10^{-4}$	$6,17 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$3,65 \cdot 10^{-3}$
	n	1,303	1,879	1,251	1,645	1,401
	R ²	0,997	0,997	0,998	1,000	1,000
Overhults	SQR	0,016	0,018	0,004	0,001	0,001
	k	$4,24 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$1,71 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$	$1,82 \cdot 10^{-2}$
	n	1,303	1,877	1,250	1,644	1,401
Henderson e Pabis	R ²	0,997	0,997	0,998	1,000	1,000
	SQR	0,016	0,018	0,004	0,001	0,001
	k	$4,47 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	$1,88 \cdot 10^{-2}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$
Henderson e Pabis	a	1,056	1,136	1,058	1,120	1,077
	R ²	0,986	0,955	0,991	0,977	0,987
	SQR	0,068	0,214	0,022	0,071	0,031

Fonte: Acervo pessoal.

Os modelos que forneceram melhores ajustes, conforme apontados pela análise estatística estão representados na Figura 4.5, juntamente com os dados experimentais. Para ilustrar a boa qualidade dos ajustes foram selecionadas aleatoriamente as curvas obtidas nas temperaturas de 50°C e de 70°C.

Figura 4.5 – Ajustes das equações de Page e Overhults aos dados experimentais para o epicarpo nas temperatura de 50°C e 70°C.



Fonte – Acervo pessoal

As equações de Page e Overhults foram consideradas até então, as melhores equações para estimar o processo de secagem para este material, com base nos critérios estatísticos usados para mensurar a qualidade dos ajustes.

4.2.1.3 Atributos de qualidade do epicarpo

Na Figura 4.6 observa-se as alterações sofridas pelo epicarpo quando submetidos à secagem nas temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C, 60°C e 70°C.

Figura 4.6 – Epicarpo *in natura* e ao final de cada processo de secagem.



Fonte – Acervo pessoal.

Nas imagens verifica-se encolhimento significativo e também alterações na coloração do produto final, sendo que na temperatura mais alta foi a que o sólido apresentou a coloração mais escurecida.

A análise colorimétrica deste e dos demais materiais de estudo foram realizadas segundo consta na metodologia apresentada no capítulo 3 deste trabalho. Desta forma, foi possível verificar quantitativamente as variações em cada parâmetro, para uma comparação adequada.

Os resultados obtidos na análise colorimétrica são apresentados na Tabela 4.3. Nota-se claramente a diferença entre os parâmetros de luminosidade (L^*) e de cromaticidade (a^*) e (b^*), entre a amostra *in natura* e as amostras desidratadas.

Os valores do parâmetro (L^*) diminuíram igualmente em todas as temperaturas, indicando o escurecimento das amostras, representando uma diminuição da luminosidade em relação à amostra fresca de em média 35%. O parâmetro (b^*), também diminuiu, porém ficou dentro da faixa das tonalidades amarelas ($+b^*$). Percebe-se que não houve diferença significativa entre a faixa de temperatura de 30°C a 70°C, mas as diferenças são evidentes ao comparar as amostras secas com a amostra *in natura*. A diferença mais significativa se deu apenas no parâmetro (a^*), pois a aferição do epicarpo *in natura*, indicava sua posição na região dos eixos coordenados, tonalidade verde ($-a^*$) e após o processamento passaram para a região dos tons vermelhos ($+a^*$). Portanto, constata-se visualmente

e quantitativamente que o epicarpo ficou com aspecto mais “queimado” à medida que era submetido às temperaturas mais altas.

Tabela 4.3 – Parâmetros colorimétricos (L^*), (a^*) e (b^*), das amostras *in natura* e desidratadas do epicarpo, nas temperaturas avaliadas.

Parâmetros	<i>In-natura</i>	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
L^*	42±1	31,2±0,9	31,3±0,6	28,9±0,5	28,8±0,7	32±1
a^*	(-) 9,9±0,3	3,1±0,4	3,0±0,4	3,4±0,3	4,4±0,2	5,00±0,05
b^*	27,4±0,5	20,2±0,4	20,80±0,05	22,0±0,8	22,5±0,7	23,0±0,8

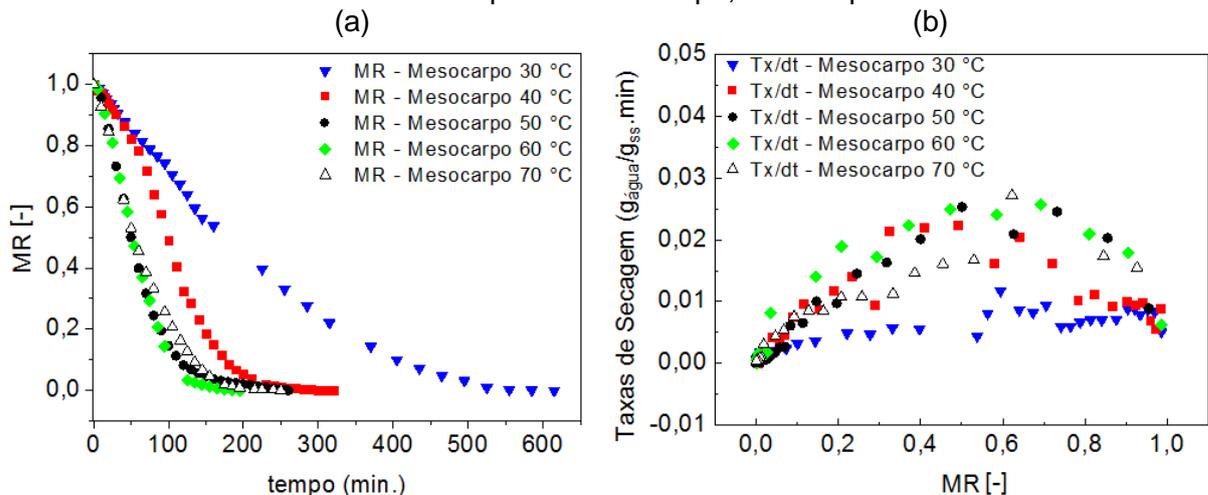
Fonte: Acervo pessoal.

4.2.2 Secagem do mesocarpo

4.2.2.1 Curvas de cinética de secagem do mesocarpo

Os resultados obtidos das cinéticas de secagem convectiva em termo de umidade adimensional em função do tempo e as suas respectivas taxas de secagem em função do adimensional de umidade, para o mesocarpo nas condições apresentadas na metodologia são mostrados nas Figuras 4.7a e 4.7b. Observa-se que as curvas de cinética de secagem e de taxas são muito parecidas com as obtidas para o epicarpo, mostrados nos tópicos anteriores.

Figura 4.7 – Umidade adimensional em função do tempo (a) e taxa de secagem em função do adimensional de umidade para o mesocarpo, nas temperaturas avaliadas.



Fonte: Acervo pessoal.

Nota-se que o mesocarpo ao ser submetido à secagem nas

temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C, resultou em tempos praticamente idênticos aos obtidos para o epicarpo e da mesma forma essas temperaturas não influenciaram na remoção de umidade. Além disso, também houve proximidade dessas curvas com as curvas de secagem na temperatura de 40°C. Igualmente, os tempos de secagem foram cerca de 200 minutos nas temperaturas de 50°C a 70°C e de 250 minutos na temperatura de 40°C. A cinética de secagem para a temperatura de 30°C também necessitou de tempo três vezes maior para atingir a umidade de equilíbrio dinâmica. Observa-se que as taxas máximas de ambas as frações foram de aproximadamente 0,030 (g_{água}/g_{ss}.min), nas temperaturas mais altas.

O aumento da temperatura de 50°C para 70°C não provocou diferenças significativas nas cinéticas de secagem, assim como ocorreu no epicarpo para as mesmas temperaturas. Há de se considerar, que embora o epicarpo seja rico em óleo essencial, como já foi dito, também possui em sua composição celulose, hemicelulose, lignina e pectina, assim como o mesocarpo. Logo, o comportamento observado pode ter relação com a composição desses materiais.

As curvas de taxa de secagem dessas frações apresentam majoritariamente o período decrescente, sendo neste caso também, o mecanismo de difusão interna de umidade é o controlador do processo de secagem. Também foi observada a variação característica do aquecimento inicial das amostras para altos valores de adimensional de umidade.

4.2.2.2 Ajuste das curvas de cinética de secagem do mesocarpo

Os resultados obtidos das análises estatísticas do mesocarpo são mostrados na Tabela 4.4.

Assim como no caso dos resultados estatísticos para o ajuste das mesmas equações para o epicarpo, nota-se que as equações de Page e de Overhults também apresentaram valores de R² próximos à unidade e também tiveram baixos valores de SQR.

Portanto, as equações de Page e Overhults também podem ser utilizadas para descrever a cinética de secagem do mesocarpo.

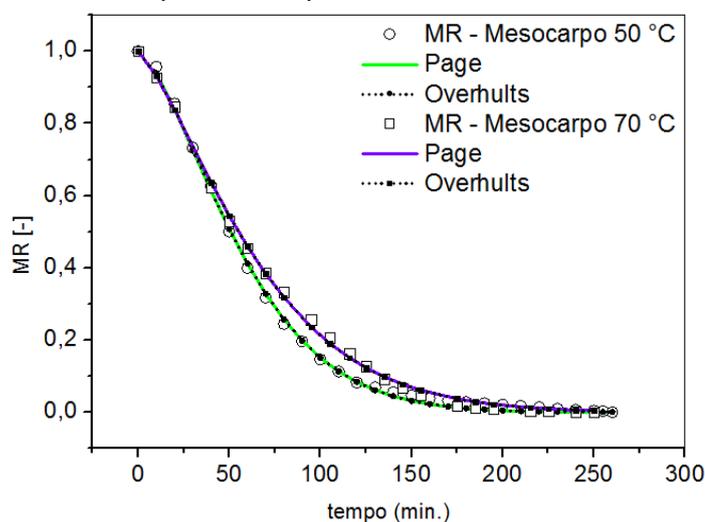
Tabela 4.4 – Resultados estatísticos para ajuste das equações empíricas e semi-empíricas para o mesocarpo.

Modelo	Parâmetro	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Lewis	k	$4,32 \cdot 10^{-3}$	$8,69 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,46 \cdot 10^{-2}$
	R ²	0,991	0,967	0,986	0,980	0,992
	SQR	0,104	0,354	0,080	0,115	0,046
Page	k	$6,92 \cdot 10^{-4}$	$7,36 \cdot 10^{-5}$	$2,06 \cdot 10^{-3}$	$9,34 \cdot 10^{-4}$	$3,12 \cdot 10^{-3}$
	n	1,344	1,999	1,481	1,67	1,348
	R ²	0,998	0,999	0,999	1,000	0,999
	SQR	0,011	0,007	0,003	0,001	0,003
Overhults	k	$4,45 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-2}$
	n	1,343	1,499	1,481	1,481	1,348
	R ²	0,998	0,990	0,999	0,999	0,999
	SQR	0,011	0,073	0,003	0,006	0,003
Henderson e Pabis	k	$4,73 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$1,79 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$
	a	1,068	1,156	1,124	1,120	1,083
	R ²	0,986	0,955	0,984	0,974	0,988
	SQR	0,071	0,260	0,048	0,079	0,032

Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.8 traz as curvas de cinética de secagem experimentais e os ajustes da cinética de secagem do mesocarpo, para as equações de Page e Overhults nas temperaturas de 30°C, 50°C e de 70°C.

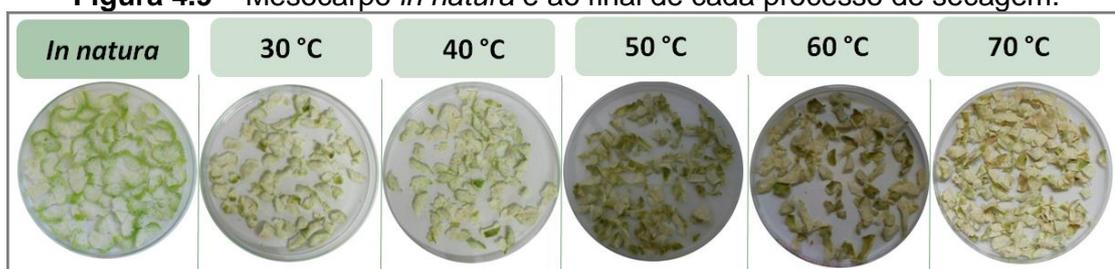
Figura 4.8 – Ajustes das equações de Page e Overhults aos dados experimentais para o mesocarpo nas temperaturas de 50°C e 70°C.



Fonte: Acervo pessoal.

4.2.2.3 Atributos de qualidade do mesocarpo

A Figura 4.9 mostra o produto final do mesocarpo em cada uma das condições de secagem utilizadas.

Figura 4.9 – Mesocarpo *in natura* e ao final de cada processo de secagem.

Fonte: Acervo pessoal.

Ao observar a Figura 4.9 constata-se as alterações de cor sofridas pelo material em todas as temperaturas avaliadas. Uma análise quantitativa dessas alterações foi realizada e os resultados dos parâmetros colorimétricos podem ser vistos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Parâmetros colorimétricos (L^* , a^* e b^*), das amostras *in natura* e desidratadas do mesocarpo, nas temperaturas avaliadas.

Parâmetros	<i>In-natura</i>	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
L^*	76±2	76,0±0,6	74,3±0,5	72,6±0,6	71,7±0,5	70,6±0,5
a^*	(-)6,1±0,5	(-)3,8±0,1	(-)3,45±0,10	(-)3,2±0,1	(-)2,8±0,2	(-)1,40±0,03
b^*	25,3±0,5	22,0±1,3	22,0±0,2	22,3±0,7	23,2±0,6	25±1

Fonte: Acervo pessoal.

Com os valores alcançados nos ensaios, observa-se que os parâmetros de luminosidade (L^*), praticamente não se alteraram. Quantitativamente percebe-se pequena diminuição deste parâmetro conforme a temperatura de operação da estufa era aumentada. Assim, com este resultado do parâmetro de luminosidade é possível afirmar que não houve escurecimento significativo.

Os valores do parâmetro colorimétrico (a^*) para o mesocarpo *in natura* foi de (-)6,1±0,5 e decresceu com o aumento da temperatura até atingir (-)1,40±0,03. Este parâmetro indica que o mesocarpo antes do início da secagem, apresentava tons mais esverdeados, visto que quanto mais negativo mais verde a amostra está. Porém, ao passo que a temperatura do processo de secagem aumentava, este parâmetro aproximava-se de zero, ou seja, aproximava-se da faixa de neutralidade nas cores que permeia o ponto zero dos eixos coordenados, conforme já informado na revisão de literatura.

Para o parâmetro (b^*), nota-se que tanto os valores para o sólido fresco, como o sólido seco nas cinco temperaturas utilizadas, não resultaram em diferenças

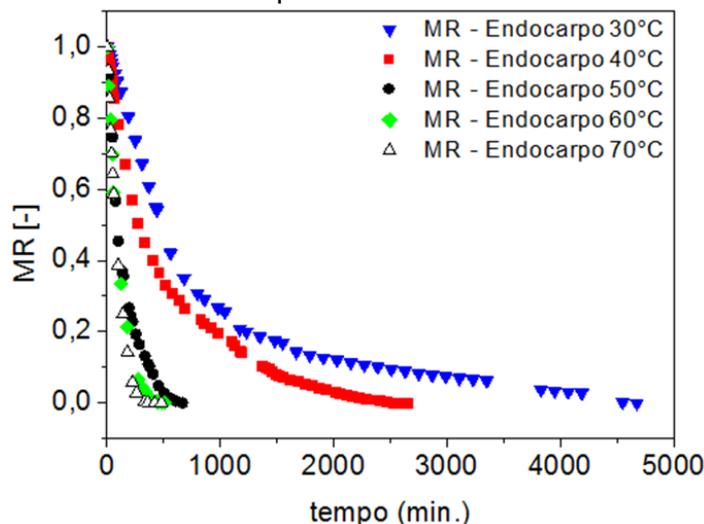
expressivas, se mantendo dentro da faixa das tonalidades amarelas (+b*). Percebe-se que não houve diferença expressiva entre uma temperatura e outra, uma vez que os resultados obtidos para este parâmetro oscilaram dentro de uma faixa reduzida, variando de $22,0 \pm 0,2$ a 25 ± 1 .

4.2.3 Secagem do endocarpo

4.2.3.1 Curvas de cinética de secagem do endocarpo

As curvas de adimensional de umidade em função do tempo de secagem para o endocarpo nas cinco temperaturas avaliadas são apresentadas na Figura 4.10. A cinética de secagem mostra que para a temperatura de 30°C, foram requeridos aproximadamente 4700 minutos e apenas 480 minutos para a temperatura de 70°C, para que atingissem a umidade de equilíbrio dinâmica. O aumento na temperatura de 30°C para 70°C provocou redução de cerca de 90% no tempo de secagem, evidenciando a influência que a temperatura exerceu nas diferentes condições de secagem.

Figura 4.10 – Adimensional de umidade em função do tempo de secagem para o endocarpo, nas temperaturas avaliadas.



Fonte: Acervo pessoal.

Percebe-se que para esta fração do limão, as temperaturas de 30°C e de 40°C foram as que isoladamente precisaram de maior tempo para a remoção de umidade do sólido. Embora este material dentre todas as frações, possua a maior

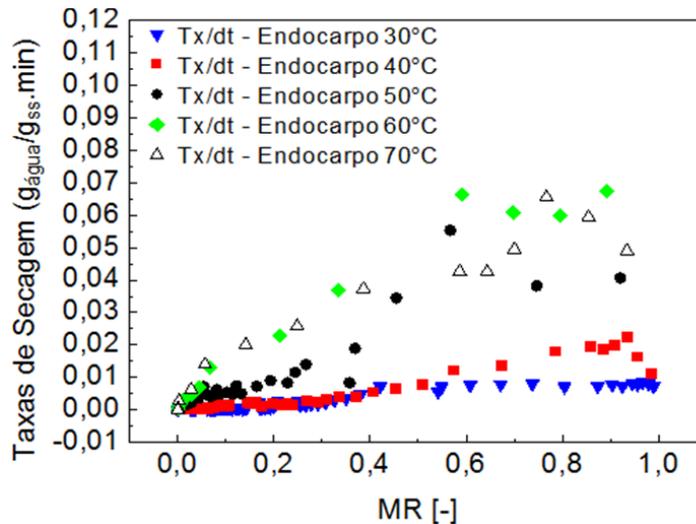
quantidade de umidade inicial a membrana que forma as vesículas de suco, forma uma barreira para a saída de. Pois, por observação visual, verificou-se que nas temperaturas de 30°C e 40°C, as vesículas ficaram preservadas por tempos maiores. Apenas as temperaturas mais altas empregadas nos ensaios, foram capazes de ressecar e romper as membranas mais facilmente.

Ainda, verifica-se que entre as temperaturas de 50°C a 70°C, não houve grande alteração no tempo de secagem. Neste caso, uma possível causa para este comportamento é o fato do suco conter açúcares que formando caramelo tornando o material enrijecido pela crosta na superfície do endocarpo. A formação de caramelo e de crosta endurecida na superfície do endocarpo foi observada em todas as temperatura, nos instantes finais de secagem, entretanto nas temperaturas mais altas, onde a secagem ocorre de forma mais rápida, esta característica do material pode ter afetado a secagem. Khafajeh *et al.* (2013) também relatam a formação de caramelo e crosta na superfície das fatias de laranja submetidas à secagem convectiva e atribuíram o longo tempo de secagem à barreira formada pela camada endurecida, dificultando assim a difusão de umidade do interior do sólido até a superfície. Tal característica pode ter influenciado o processo de secagem nas temperaturas acima de 50°C, resultando nas curvas de cinética de secagem muito próximas umas as outras. Aliado a este comportamento existem também outras possíveis causas, como por exemplo, a forma como a água está ligada ao material e também danos estruturais sofridos nas temperaturas mais altas, que podem ter dificultado a migração de umidade.

As curvas de taxa de secagem em função do tempo para o endocarpo fatiado são apresentadas na Figura 4.11.

Nota-se que em elevadas umidades e temperaturas mais altas, as taxas de secagem atingiram um valor máximo de 0,07 ($g_{\text{água}}/g_{\text{ss}}.\text{min}$). Este comportamento difere do que ocorreu nas frações do epicarpo e do mesocarpo, que atingiram as taxas máximas de 0,03 ($g_{\text{água}}/g_{\text{ss}}.\text{min}$), também nas temperaturas e umidades mais altas. Uma possível explicação seria que além da composição dos materiais ser diferente em termos de constituintes e umidade inicial, o formato e dimensões são diferentes, visto que o epicarpo e mesocarpo não têm geometria definida como é o caso do endocarpo.

Figura 4.11 – Taxa de secagem em função de MR para o endocarpo, nas temperaturas avaliadas.



O período de aquecimento das amostras foi observado nas temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C e de 70°C. Nas temperaturas de 60°C, observa-se apenas o período decrescente. E para esta fração, o período decrescente predominou em todas as temperaturas utilizadas no processo de secagem, sendo possível inferir que o mecanismo controlador do processo de secagem para este sólido é a difusão mássica de umidade.

4.2.3.2 Ajuste das curvas de cinética de secagem do endocarpo

4.2.3.2.1 Modelo difusivo

O modelo difusivo foi utilizado para o ajuste aos dados experimentais do endocarpo e das fatias. Como a espessura destes materiais possuem uma dimensão muito pequena em comparação com as outras dimensões, assumiu-se que as amostras têm a geometria característica de uma placa plana infinita. A solução da Equação 2.6 foi truncada no décimo terceiro termo ($n = 13$), já que a partir do décimo termo da série a variação no resultado é muito pequena (PARK, 2001; VIEIRA, 2012).

Com os dados experimentais obtidos da cinética de secagem, inicialmente realizou-se o tratamento dos dados utilizando-se para o ajuste o modelo difusivo, onde a difusividade efetiva foi estimada tomando como critério a minimização dos quadrados dos resíduos.

Na Tabela 4.6 são mostrados os resultados obtidos para a difusividade efetiva ajustada, bem como os parâmetros estatísticos para o endocarpo. A difusividade mássica efetiva foi crescente conforme o aumento da temperatura de secagem, demonstrando que com o aumento da temperatura a resistência à remoção de umidade diminui como era esperado.

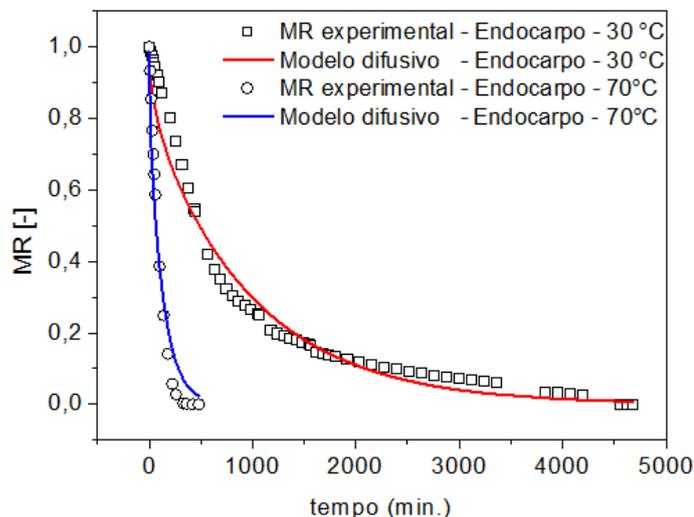
Tabela 4.6 - Resultados estatísticos para ajuste do modelo difusivo para o endocarpo.

Matéria prima	T(°C)	D_{ef} (m ² /s)	R ²	SQR
Endocarpo	30	$9,73 \cdot 10^{-12}$	0,983	0,1541
	40	$1,49 \cdot 10^{-11}$	0,993	0,0564
	50	$5,50 \cdot 10^{-11}$	0,992	0,0439
	60	$6,66 \cdot 10^{-11}$	0,990	0,0570
	70	$7,24 \cdot 10^{-11}$	0,984	0,0979

Fonte: Acervo pessoal.

Com base nos resultados da minimização dos quadrados dos resíduos e nos valores de R² (que foram próximos a unidade), pode-se afirmar que este modelo teórico pode ser usado para estimar a umidade do endocarpo, nas condições estudadas, com razoável precisão como mostra a Figura 4.12.

Figura 4.12 – Umidades adimensionais em função do tempo experimentais e com os ajustes ao modelo difusivo para o endocarpo, nas temperaturas de 30°C e 70°C.



Fonte: Acervo pessoal

Ao comparar os resultados obtidos experimentalmente para esta fração nas temperaturas de 30°C e 70°C, com os resultados fornecidos pelo ajuste do modelo difusivo truncado no 13º termo da série infinita, observa-se que os ajustes foram bons. Embora os valores dos coeficientes de correlação sejam superiores a 0,98, os dados experimentais foram subestimados pelo modelo no início e no final da

secagem, havendo pontos intermediários onde os dados experimentais foram superestimados.

Os desvios podem ser atribuídos ao fato do modelo difusivo não levar em conta modificações que ocorrem no material, como o encolhimento, nem a heterogeneidade do material e também não considerar a dependência da difusividade com a temperatura ou com a umidade do material.

4.2.3.2.2 Equações empíricas e semi-empíricas

Os resultados das análises estatísticas do endocarpo são mostrados na Tabela 4.7. As equações que obedecem aos critérios estatísticos, onde são considerados como melhores equações aquelas que possuem valor do coeficiente de correlação (R^2) mais próximo à unidade e menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR), foram as equações de Page e Overhults. De modo geral, essas equações em alguns casos atingiram a unidade em R^2 e também os menores valores de SQR.

A equação de Henderson e Pabis, em alguns casos mostraram bons resultados para os parâmetros SQR e R^2 , como para a temperatura de 60°C e 70°C. Já a equação de Lewis não apresentou bons ajustes. Desse modo, as equações de Page e Overhults podem descrever a cinética de secagem do endocarpo.

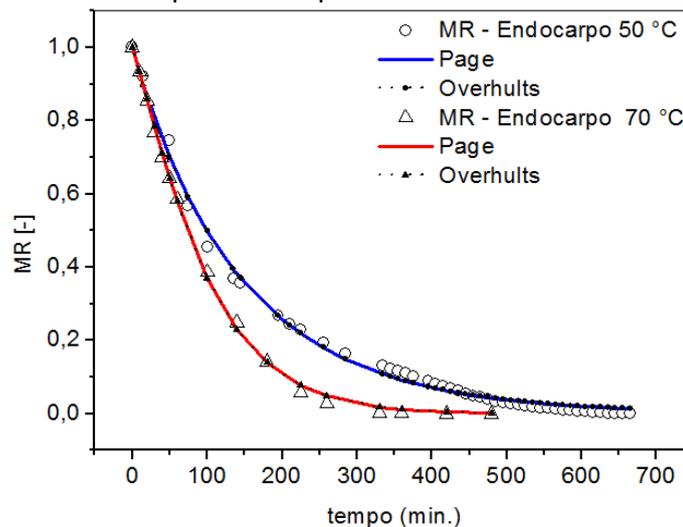
Tabela 4.7 – Resultados estatísticos para ajuste das equações empíricas e semi-empíricas para endocarpo.

Modelo	Parâmetro	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Lewis	k	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-3}$	$6,75 \cdot 10^{-3}$	$6,75 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
	R^2	0,991	0,992	0,995	0,995	0,998
	SQR	0,069	0,064	0,014	0,056	0,014
Page	k	$4,90 \cdot 10^{-3}$	$6,13 \cdot 10^{-3}$	$8,27 \cdot 10^{-3}$	$5,63 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
	n	0,802	0,823	0,962	1,096	1,167
	R^2	0,992	0,997	0,995	1,000	0,999
	SQR	0,065	0,017	0,013	0,001	0,002
Overhults	k	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$2,06 \cdot 10^{-3}$	$6,85 \cdot 10^{-3}$	$8,85 \cdot 10^{-3}$	$9,94 \cdot 10^{-3}$
	n	0,886	0,823	0,962	1,096	1,167
	R^2	0,992	0,997	0,995	1,000	0,999
	SQR	0,052	0,017	0,013	0,001	0,002
Henderson e Pabis	k	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$6,72 \cdot 10^{-3}$	$9,13 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$
	a	0,995	0,955	0,995	1,024	1,04
	R^2	0,991	0,991	0,995	0,999	0,997
	SQR	0,069	0,051	0,014	0,003	0,009

Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.13 trazem os gráficos para as equações empíricas e semi-empíricas que foram ajustados à cinética de secagem experimental, sendo considerados como os melhores ajustes as equações de Page e Overhults e para a verificação são apresentados os ajustes nas temperaturas de 50°C e 70°C.

Figura 4.13 – Ajustes das equações de Page e Overhults aos dados experimentais para o endocarpo nas temperatura de 50°C e 70°C.

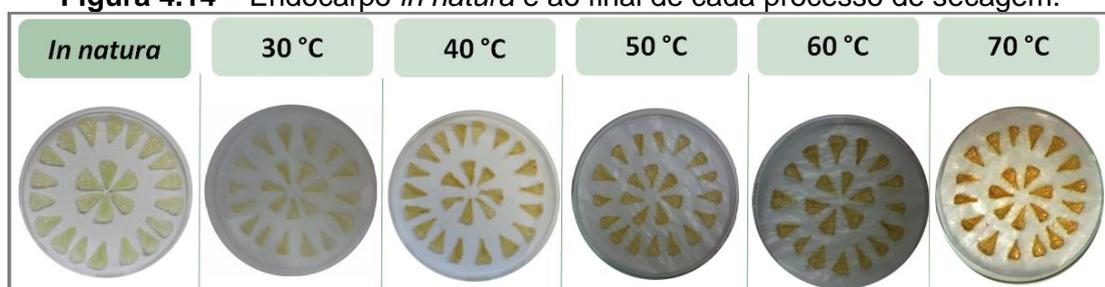


Fonte: Acervo pessoal.

4.2.3.3 Atributos de qualidade do endocarpo

Analisando a Figura 4.14 ficam claros os efeitos da temperatura na cor e no encolhimento do produto final do endocarpo em cada uma das condições de secagem utilizadas.

Figura 4.14 – Endocarpo *in natura* e ao final de cada processo de secagem.



Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados de cada um dos parâmetros colorimétricos obtidos após as amostras atingirem a umidade de equilíbrio dinâmica e serem submetidas à análise

colorimétrica, são mostrados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Parâmetros colorimétricos (L^*), (a^*) e (b^*), das amostras *in natura* e desidratadas do endocarpo, nas temperaturas avaliadas.

Parâmetros	<i>In-natura</i>	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
L^*	59,3±0,3	56±2	55±2	53±2	49±1	44±1
a^*	(-)4,9±0,3	1,5±0,1	5,8±0,1	7,0±0,1	8,5±0,1	9,00±0,05
b^*	22±1	24,6±0,3	25,2±0,2	25,9±0,9	26±1	27±1

Fonte: Acervo pessoal.

Com esses valores constata-se quantitativamente o escurecimento gradativo do endocarpo, devido à diminuição do parâmetro de luminosidade (L^*). Visto que o sólido *in natura* obteve o valor de 59,3 (com desvio padrão de $\pm 0,3$), para este parâmetro colorimétrico que caiu até atingir 44 ± 1 na temperatura de 70°C, isto é, esta fração escureceu em média 25%. Portanto é possível afirmar que houve escurecimento significativo da amostra fresca, com relação à temperatura mais alta de operação.

Para o parâmetro colorimétrico (a^*) houve diferença expressiva entre cada amostra processada em comparação com a amostra *in natura*. Pois antes das amostras do endocarpo serem submetidas à secagem, este parâmetro localizava-se na região negativa dos eixos coordenados, (-)4,9, com desvio padrão de $\pm 0,3$, região esta dos tons esverdeados. Após o processamento em cada temperatura, este parâmetro aumentou proporcionalmente ao aumento da temperatura empregada, passando para a região positiva dos eixos. Esta alteração de valores demonstrou que à medida que a temperatura aumentava, os tons avermelhados se intensificavam, resultando então no aspecto queimado que foi mostrado na figura anterior.

O parâmetro (b^*) mostrou um pequeno aumento a partir da temperatura de 30°C, até a temperatura de 70°C, sendo que as diferenças maiores surgem ao comparar a amostra *in natura* com as amostras processadas nas temperaturas mais altas. Mesmo que este parâmetro tenha se mantido dentro da faixa das tonalidades amarelas ($+b^*$), é possível notar que este parâmetro aumentou em aproximadamente 20%. Isso indica que a tonalidade amarela ficou mais intensa, ou seja, o endocarpo se tornou mais amarelado à medida que a temperatura de operação era aumentada.

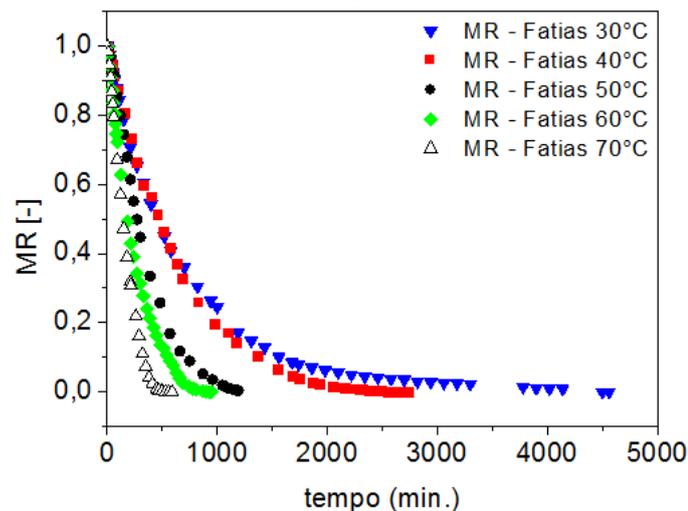
4.2.4 Secagem das fatias

As fatias do limão tahiti reúnem em um conjunto estruturado as três frações avaliadas anteriormente, epicarpo, mesocarpo e endocarpo e os resultados obtidos para a secagem das fatias são apresentados nos próximos tópicos.

4.2.4.1 Curvas de cinética de secagem das fatias

Os resultados do adimensional de umidade (MR) em função do tempo, obtidos experimentalmente das amostras das fatias submetidas à secagem em estufa nas temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C, 60°C e 70°C, são apresentados na Figura 4.15. O tempo necessário para que as fatias atingissem a umidade de equilíbrio dinâmica foram de 4560, 2735, 1190, 950 e 590 minutos, da temperatura menor para a maior. Para a fatia observa-se claramente o efeito da variação da temperatura no processo, uma vez que o aumento da temperatura provocou redução no adimensional de umidade, para um dado tempo, em todo o intervalo investigado. O tempo de secagem a 70°C é apenas 13% do tempo requerido para a secagem a 30°C.

Figura 4.15 – Adimensional de umidade em função do tempo, para secagem de fatias do limão tahiti, nas temperatura avaliadas.



Fonte: Acervo pessoal.

Constatou-se também que durante os experimentos nas temperaturas de 30°C e 40°C, as vesículas contendo o suco foram preservadas por longos períodos, o que pode ter contribuído para a secagem mais lenta nessas temperaturas.

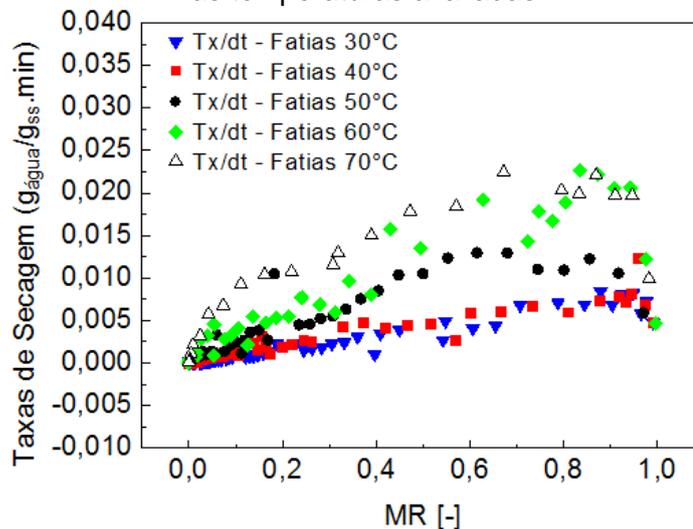
Foi observado também nas fatias a caramelização dos açúcares presentes no suco, em todas as temperaturas, da mesma maneira que foi observada no endocarpo.

O comportamento observado na secagem das fatias de limão é resultado da contribuição de cada uma das frações, portanto é influenciado pela composição e características de todas elas.

Foi demonstrado, pela análise da secagem do epicarpo, mesocarpo e endocarpo que as diferentes frações comportam-se de forma diferente no processo de desidratação. Isto fica evidente, por exemplo, pelo fato das taxas de secagem do epicarpo e mesocarpo não serem afetadas pelo aumento da temperatura acima de 50°C, ao passo que na secagem do endocarpo e das fatias, este comportamento não foi observado ou foi observado em menor grau. Além disso, as frações quando unidas na fatia formam um conjunto estruturado, com área exposta para transferência de calor e massa bem diferente das de suas frações analisadas isoladamente.

A Figura 4.16 apresenta os resultados obtidos para as taxas de secagem calculadas em função do MR para as fatias em todas as condições estudadas.

Figura 4.16 – Taxa de secagem em função de MR, para a secagem das fatias do limão tahiti, nas temperaturas avaliadas.



Fonte: Acervo pessoal.

Os ensaios mostraram que de modo geral, a secagem se processa com maior rapidez nos instantes em que os níveis de umidade são maiores e torna-se mais difícil à medida que o produto se torna mais seco.

Verificou-se que as temperaturas mais elevadas resultaram em taxas máximas de 0,020 (g_{água}/g_{ss}.min) para altos valores de umidade, comparando-se

essas taxas com as observadas para as suas frações individuais, verifica-se que as fatias apresentaram as menores taxas.

O aumento da temperatura favorece a remoção da água na superfície pelo aumento da pressão de vapor e favorece também o transporte de umidade do interior para a superfície da fatia, contribuindo para o aumento da taxa de secagem.

As taxas de secagem das fatias mostram que todas as temperaturas utilizadas nos experimentos apresentaram o período inicial de aquecimento, caracterizado pela transferência de calor do ar para a fatia, até que o sólido atinja o equilíbrio térmico com o ar de secagem no interior do secador.

Não foi observado o período de secagem à taxa constante, assim como relatam outros autores que estudaram a secagem de produtos alimentícios (PARK *et al.*, 2001). Assim como nas frações analisadas, a fatia também apresentou predominância do período de secagem à taxa decrescente, indicando que a migração de umidade do interior da fatia para a superfície foi o fator limitante do processo de secagem.

4.2.4.3 Ajustes das curvas de cinética de secagem das fatias

4.2.4.3.1 Modelo difusivo

Assim como foi feito para o endocarpo, realizou-se o tratamento dos dados experimentais obtidos da cinética de secagem, utilizando-se para o ajuste a equação resultante da solução do modelo difusivo. As dimensões das fatias foram aproximadas à geometria de uma placa plana infinita, uma vez que a espessura da fatia possui dimensão muito pequena se comparada às outras dimensões.

A Tabela 4.9 traz os resultados dos ajustes, para cada temperatura avaliada, ao modelo difusivo com a solução truncada no décimo terceiro termo e seus parâmetros estatísticos.

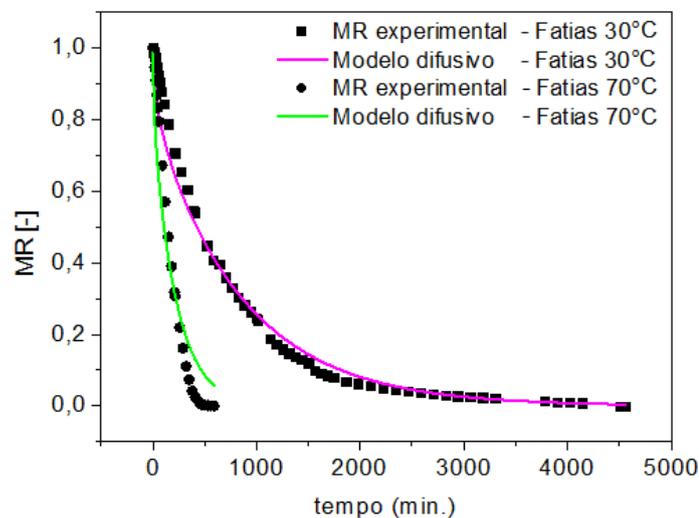
Nota-se que conforme a temperatura de operação aumenta a difusividade efetiva também aumenta, o que era esperado, uma vez que a resistência à remoção de umidade diminui com o aumento da temperatura, favorecendo a migração de umidade.

Tabela 4.9 – Resultados estatísticos para ajuste do modelo difusivo, para as fatias.

Matéria prima	T(°C)	D_{ef} (m ² /s)	R ²	SQR
Fatias	30	$1,12 \cdot 10^{-11}$	0,995	0,1072
	40	$1,28 \cdot 10^{-11}$	0,995	0,1767
	50	$2,26 \cdot 10^{-11}$	0,981	0,2704
	60	$3,06 \cdot 10^{-11}$	0,992	0,2223
	70	$4,36 \cdot 10^{-11}$	0,979	0,2732

Fonte: Acervo pessoal.

Percebe-se que o modelo difusivo apresentou coeficientes de correlação quadráticos sempre acima de 0,99. Em todos os casos, a soma do quadrado dos resíduos forneceram resultados relativamente altos (alguns acima de 20%), se comparados aos que já foram mostrados até aqui. Pois o critério para que o ajuste seja considerado bom, é necessário obter-se bons resultados para os diferentes parâmetros estatísticos utilizados nas análises dos resultados e não apenas um dos parâmetros atender a este critério. A qualidade do ajuste é mostrada na Figura 4.17 para duas temperaturas de secagem.

Figura 4.17 – Umidades adimensionais em função do tempo experimentais e com os ajustes do modelo difusivo para as fatias do limão nas temperaturas de 30°C e 70°C.

Fonte: Acervo pessoal.

Observa-se que para a temperatura de 70°C os dados experimentais foram subestimados pelo modelo difusivo nos pontos iniciais e nos pontos finais da secagem se equiparou com o resultado experimental, entre esses pontos, os dados experimentais foram superestimados pelo modelo. Para a temperatura de 30°C, inicialmente os dados experimentais foram subestimados e na região intermediária da secagem a curva ajustada superestimou a redução de umidade, além de não ter

atingido, ao final da secagem, a umidade de equilíbrio dinâmica observada experimentalmente.

São várias as causas dos desvios observados, associados ao fato de que o modelo difusivo simplifica os fenômenos de transferência de massa que ocorrem na secagem de alimentos, em um único parâmetro ajustável, que é a difusividade efetiva. Como já observado anteriormente o modelo difusivo não considera a heterogeneidade do material, nem o encolhimento ou a dependência da difusividade efetiva com a temperatura ou a umidade do sólido. Além disto, o truncamento da solução no 13º termo pode não ter sido suficiente para minimizar os erros de truncamento, o que também pode ter contribuído na piora da qualidade do ajuste (VIEIRA, 2012).

4.2.4.3.2 Equações empíricas e semi-empíricas

Os resultados estatísticos para o ajuste das equações empíricas e semi-empíricas realizados para as fatias, em todas as temperaturas avaliadas são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Resultados estatísticos para ajuste das equações empíricas e semi-empíricas para as fatias.

Modelo	Parâmetro	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Lewis	k	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-3}$	$3,97 \cdot 10^{-3}$	$5,63 \cdot 10^{-3}$
	R ²	0,999	0,999	0,995	0,999	0,993
	SQR	0,006	0,014	0,070	0,024	0,076
Page	k	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$8,44 \cdot 10^{-4}$	$4,85 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$7,95 \cdot 10^{-4}$
	n	0,954	1,098	1,292	1,134	1,370
	R ²	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
	SQR	0,004	0,004	0,003	0,006	0,005
Overhults	k	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$2,72 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-3}$	$5,46 \cdot 10^{-3}$
	n	0,954	1,097	1,291	1,134	1,370
	R ²	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
	SQR	0,004	0,004	0,003	0,006	0,005
Henderson e Pabis	k	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$1,65 \cdot 10^{-3}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$	$4,18 \cdot 10^{-3}$	$6,15 \cdot 10^{-3}$
	a	0,994	1,019	1,101	1,043	1,084
	R ²	0,999	0,999	0,993	0,998	0,989
	SQR	0,006	0,011	0,035	0,013	0,046

Fonte: Acervo pessoal.

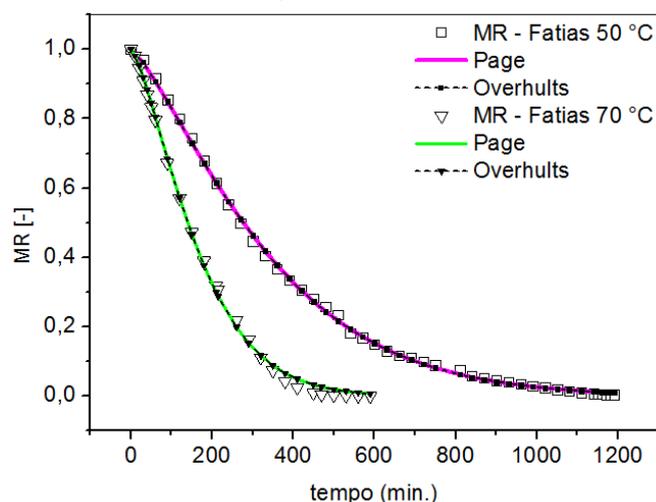
De maneira geral, os ajustes dessas equações aos dados experimentais, em todas as condições estudadas mostraram-se bons, visto que a maioria resultou

em valores de R^2 próximos a unidade e baixos valores de SQR. Todavia, assim como nos ajustes realizados para as frações do limão, as equações que em algumas condições de secagem não apresentaram bons resultados dos parâmetros estatísticos foram as equações de Lewis e de Henderson & Pabis. A equação de Lewis neste caso resultou em maior valor do SQR sendo de 0,070 e 0,076 e valores de R^2 de 0,995 e 0,996, ambos nas temperaturas de 50°C e 70°C, respectivamente. A equação de Henderson e Pabis, apresentou o pior resultado na temperatura de 70°C, com o valor do coeficiente de correlação de 0,989 e soma do quadrado dos resíduos de 0,046.

É fato que sólidos biológicos, como produtos do gênero alimentício, em geral têm seus dados experimentais de cinética de secagem bem representados pelas equações de Page e de Overhults, como reportam alguns estudos de secagem de diversos produtos, tais como fatias de abacaxi (HOFISKY *et al.*, 2009), polpa de figo-da-índia (MADUREIRA *et al.* 2011), semente de linhaça (VIEIRA, 2012), fatia de laranja (KHAFAJEH, 2013) e folha de hortelã (COSTA, 2013).

Do ponto de vista da análise dos critérios estatísticos apresentados, pode-se afirmar que a melhor representação da cinética de secagem da fatia e de suas frações é dada pelas equações de Page e Overhults. Os gráficos apresentados nas Figuras 4.18 mostra os resultados experimentais das umidades adimensionais em função do tempo experimentais e com os ajustes das equações de Page e Overhults nas temperaturas de 50°C e 70°C para as fatias de limão tahiti.

Figura 4.18 – Umidades adimensionais em função do tempo experimentais e com os ajustes das equações de Page e de Overhults aos dados experimentais nas temperaturas de 50°C e 70°C para as fatias.



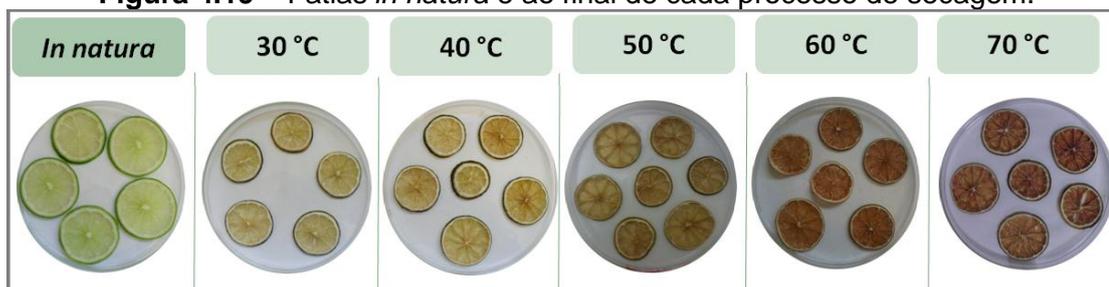
Fonte: Acervo pessoal.

4.2.4.4 Atributos de qualidade das fatias

4.2.4.4.1 Análise colorimétrica

Os efeitos das diferentes temperaturas nas quais as fatias foram submetidas nos experimentos são mostradas na Figura 4.19. Num primeiro instante, verifica-se nitidamente que as alterações de cor sofridas pelas amostras foram diferentes em cada caso, sendo o escurecimento mais brando na temperatura de 30°C e mais intenso na temperatura de 70°C. E que o escurecimento percebido ao analisar as fotos desta figura, está relacionado principalmente ao escurecimento ocorrido no endocopo. Além disso, verifica-se também que as amostras mantiveram o formato original mesmo com significativo encolhimento, fato que será devidamente abordado em tópico futuro.

Figura 4.19 – Fatias *in natura* e ao final de cada processo de secagem.



Fonte: Acervo Pessoal.

A maneira adotada para medição dos valores de cada parâmetro colorimétrico se deu em três pontos da fatia, sendo centro, polpa e borda, conforme especificado na metodologia. Os valores obtidos de cada ponto foram somados e as médias resultantes dos três pontos compõe o resultado do escurecimento de cada fatia, com seu devido desvio padrão. Esses resultados forneceram quantitativamente a magnitude dessas alterações de cor, conforme é mostrado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Parâmetros colorimétricos (L^*), (a^*) e (b^*), das amostras *in natura* e desidratadas das fatias, nas temperaturas avaliadas.

Parâmetros	<i>In-natura</i>	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
L^*	68±5	67±10	65±10	63±11	58±9	52±8
a^*	(-)4±2	0,1±2	2±2	3±2	5±4	5±2
b^*	23±2	23±2	23±2	23±3	24±3	25±3

Fonte: Acervo pessoal.

Percebe-se que o parâmetro de luminosidade (L^*) diminuiu gradativamente em consequência do aumento da temperatura de operação do secador. Em relação à amostra fresca, o escurecimento foi mais acentuado a partir de 60°C , representando uma diminuição da luminosidade de 14% e em 70°C de aproximadamente 23%. Os altos desvios padrão observados tanto nas amostras *in natura*, como nas processadas, devem-se ao fato de haver grandes diferenças entre cada ponto investigado (centro, polpa e bordas).

O parâmetro cromático (a^*) de cada temperatura utilizada também teve diferença significativa em relação a amostra fresca. Este parâmetro colorimétrico indicava inicialmente posição na região negativa dos eixos coordenados, $(-)\pm 4$, sugerindo tonalidade verde ($-a^*$), passando gradualmente para a região positiva dos eixos ($+a^*$). Portanto, foi demonstrado quantitativamente que a cada acréscimo de 10°C na temperatura do ar de secagem, a amostra adquiria tonalidade mais avermelhada, evidenciando o aspecto “queimado” observado visualmente.

Para o parâmetro cromático (b^*) que indica a intensidade das cores amarelas se positivos, ou azuis se negativos, as variações ocorridas entre as amostras *in natura* e as amostras secas a 70°C ficaram em torno de 10%. Os valores deste parâmetro oscilaram entre 23 ± 2 até 25 ± 3 , ou seja, mantiveram-se dentro da faixa das tonalidades amarelas ($+b^*$) e sem diferença significativa entre eles, uma vez que a variação encontra-se dentro da faixa de incerteza experimental.

Como complemento das análises efetuadas individualmente, foi realizada também a verificação de variação total da cor (ΔE) das frações individuais e das fatias, dada pela Equação (3.1), apresentada na revisão de literatura. Essa variação de cor engloba todos os índices dos parâmetros (L^* , a^* e b^*) tomando por base os resultados iniciais e finais obtidos em cada temperatura e para cada material estudado.

A Tabela 4.12 a seguir fornece os resultados calculados da variação total da cor. Nota-se que houve pequena variação na cor do epicarpo, apresentando um valor médio de 19 ± 1 e do mesocarpo de 6 ± 1 , sendo essas frações as que apresentaram a menor variação de cor, entre as temperaturas. Entretanto, o endocarpo demonstrou quantitativamente a maior variação total, sendo encontrado um acréscimo de 63% no intervalo entre a menor e a maior temperatura. As fatias também mostram alta variação total da cor, representando uma diferença de 73% para o mesmo intervalo de temperatura.

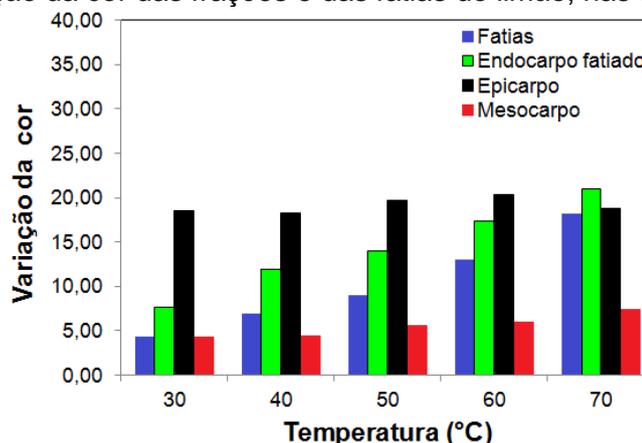
Tabela 4.12 – Resultados das variações de cor das frações individuais e das fatias do limão, nas temperaturas avaliadas.

Material	ΔE				
	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
Epicarpo	18,6	18	19,7	20,3	18,8
Mesocarpo	4,4	4,5	5,6	6	7,4
Endocarpo	7,7	11,9	14	17,3	21
Fatias	4,3	6,9	9	13	18

Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.20 apresenta as variações percebidas visualmente e quantitativamente na análise colorimétrica das fatias, do endocarpo, do epicarpo e do mesocarpo, em todas as temperaturas estudadas.

Figura 4.20 – Variação da cor das frações e das fatias do limão, nas temperatura avaliadas.



Fonte: Acervo pessoal.

4.2.4.4.2 Encolhimento das fatias

Todas as fatias que passaram pelo processo de secagem convectiva apresentaram acentuada redução de tamanho e para apresentar o encolhimento foi escolhido aleatoriamente a temperatura de 30°C, conforme pode ser visto na Figura 4.21.

Figura 4.21 – Imagens do encolhimento das fatias *in natura* e secas a 30°C.



Fonte: Acervo pessoal.

As amostras foram submetidas à análise de imagem pelo *software* Image-Pro Plus 6[®] e com as dimensões das áreas superficiais coletadas pelo *software*, realizou-se a análise do encolhimento ocorrido em cada temperatura. A Tabela 4.13 apresenta os valores médios obtidos pelo *software* das áreas iniciais e finais para cada experimento realizado com seus respectivos desvios.

Tabela 4.13 – Resultado médios das fatias em termos das áreas superficiais iniciais e finais, nas temperaturas avaliadas.

Fatias									
30°C		40°C		50°C		60°C		70°C	
Área inicial (cm ²)	Área final (cm ²)	Área inicial (cm ²)	Área final (cm ²)	Área inicial (cm ²)	Área final (cm ²)	Área inicial (cm ²)	Área final (cm ²)	Área inicial (cm ²)	Área final (cm ²)
21±2	14±1	20±2	12±1,50	20±2	13±2	21±1	14±1	20±1	13±1

Fonte: Acervo pessoal.

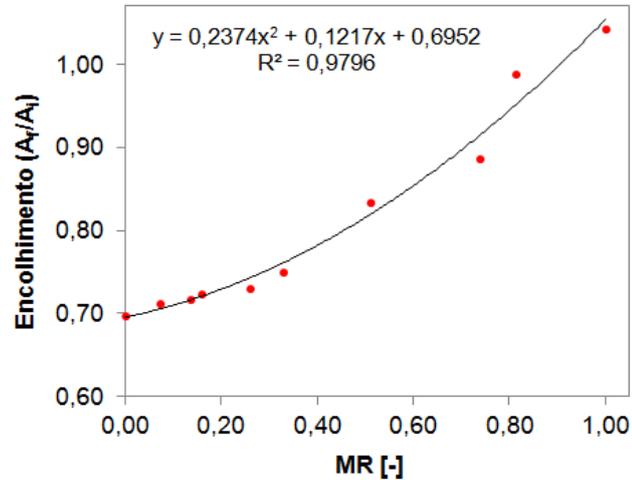
A partir da Tabela 4.13 verifica-se que para todas as temperaturas avaliadas, houve um encolhimento considerável ao final de cada processo de secagem, atingindo uma redução da área superficial de aproximadamente 7 cm², o que representa uma perda em torno de 33% em relação a área inicial. O encolhimento apresentado foi praticamente o mesmo em todos os ensaios e isso se justifica pelo fato do encolhimento estar associado à quantidade de água removida do material que foi similar para todas as condições.

O encolhimento é normalmente expresso pela razão entre o volume da amostra antes e após a secagem (YAN *et al.*, 2008), todavia, não foi possível neste trabalho medir a espessura das amostras secas, porque serem muito frágeis e quebradiças. Por esta razão o encolhimento em função da umidade foi medido em termos da área superficial das amostras, ao longo da secagem. A Figura 4.22 mostra a razão entre a área superficial da amostra e a área inicial em função da umidade, sendo apresentados os resultados apenas para a secagem realizada em 60°C, visto que as demais temperaturas avaliadas apresentaram característica similar.

O encolhimento observado nas fatias foi mais intenso nos instantes iniciais da secagem, quando a umidade ainda estava elevada e foi mais suave a partir do adimensional de umidade de 0,33. A relação de umidade com o encolhimento também foi estudada por Yan *et al.* (2008), na secagem de fatias de banana, abacaxi e manga e também observaram que o encolhimento ocorreu com maior intensidade para altas umidades. Ainda, verificaram que a partir da umidade em torno de 30%

(b.u.), o encolhimento tende a se estabilizar até os instantes finais de secagem.

Figura 4.22 – Dependência do encolhimento com a umidade para a secagem das fatias do limão tahiti na temperatura de 60°C.



Fonte: Acervo pessoal.

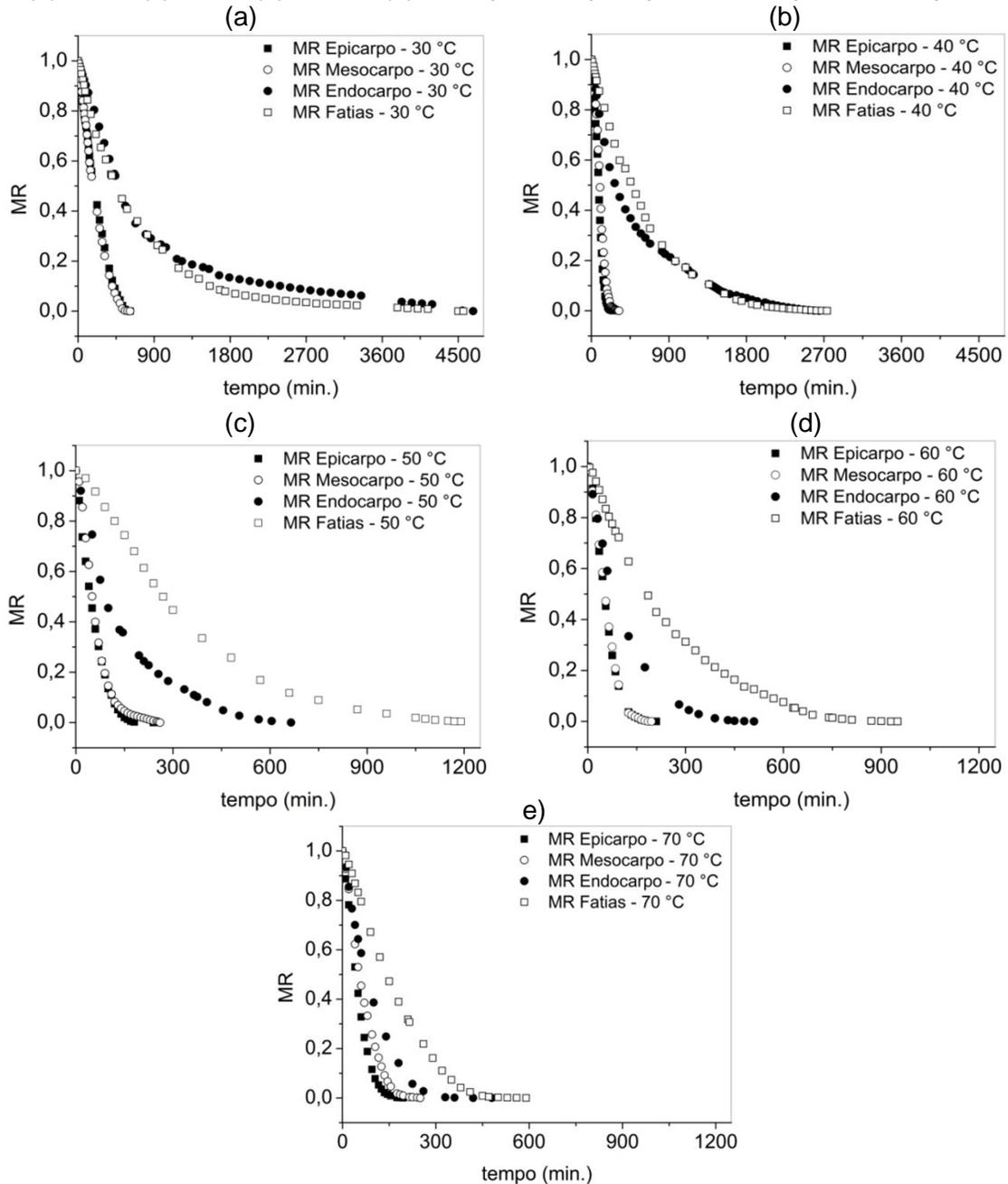
Os valores calculados para o encolhimento da área superficial das amostras mostraram tendência polinomial de segunda ordem, fornecendo valor de R^2 de 0,9796. Valor similar aos fornecidos de R^2 para o encolhimento da banana (0,938), do abacaxi (0,988) e da manga (0,999) (YAN *et al.*, (2008).

4.2.4.2 Comparativo da secagem das frações e das fatias

Dentre os materiais estudados neste trabalho, em todas as condições de secagem as fatias levaram mais tempo para atingirem a umidade de equilíbrio dinâmica. Este comportamento não era esperado, pois como a fatia é a reunião de suas frações, esperava-se que sua secagem fosse intermediária em relação às partes. Porém, vale ressaltar que a fatia do limão é uma estrutura única composta pelas três frações que se encontram conectadas entre si e a cinética de secagem é afetada pelo conjunto das propriedades de cada fração. Figura 4.23 mostra o comportamento de cada material submetido às mesmas condições de secagem.

Com a separação das partes que compõe a fatia, cada fração fornece cinéticas de secagem características, além de que, o formato e dimensões das partes isoladas, particularmente do epicarpo e do mesocarpo são muito diferentes das da fatia. Dessa forma, a cinética de secagem das fatias mostra que a resistência à perda de umidade do conjunto não corresponde à uma média das frações individuais

Figura 4.23 – Umidades adimensionais em função do tempo para as temperaturas de (a) 30°C, (b) 40°C, (c) 50°C, (d) 60°C e (e) 70°C para o epicarpo, mesocarpo, endocarpo e fatias.



Fonte: Acervo pessoal.

Nota-se que o epicarpo e o mesocarpo apresentaram cinéticas de secagem similares em todos os casos e isoladamente foram as frações em que a umidade foi removida mais rapidamente. Já a redução de umidade do endocarpo foi intermediária, nos casos onde a temperatura do ar de secagem foi mais alta. Entretanto, nas temperaturas de 30°C e de 40°C nota-se pouca diferença em relação à secagem das fatias. Isso pode ser atribuído ao fato do endocarpo manter as vesículas de suco, preservadas por maior tempo nessas temperaturas conforme já

dito anteriormente. Uma síntese dos resultados para os diferentes materiais estudados é apresentada no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Comparativo dos principais resultados do estudo da secagem das fatias e das frações do limão tahiti.

Componente e geometria	Influência da temperatura e período de secagem	Tempos aproximados de secagem (min.) (40°C - 70°C)	Taxas máxima de secagem (g _{água} /g _{ss} .min) (40°C - 70°C)	D _{ef} (m ² /s) (40°C - 70°C)	Variações de cor (ΔE)
Epicarpo em lascas	30°C – 50°C (decrecente)	40°C≈250 70°C≈200	40°C≈0,03 70°C≈0,035	-	19±1
Mesocarpo em lascas	30°C – 50°C (decrecente)	40°C≈250 70°C≈200	40°C≈0,02 70°C≈0,03	-	6±1
Endocarpo espessura: 2,5 mm ≈1/10 da fatia	30°C – 70°C (decrecente)	40°C≈2700 70°C≈480	40°C≈0,02 70°C≈0,07	40°C≈1,49 10 ⁻¹¹ 70°C≈7,24 10 ⁻¹¹	14±5
Fatias espessura: ≈2,4 mm	30°C – 70°C (decrecente)	40°C≈2800 70°C≈590	40°C≈0,013 70°C≈0,025	40°C≈1,28 10 ⁻¹¹ 70°C≈4,36 10 ⁻¹¹	10±5

Fonte: Acervo pessoal.

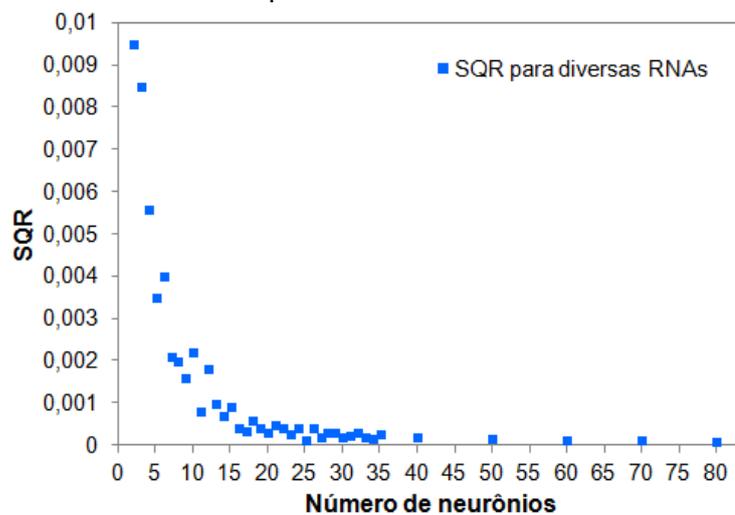
A partir do Quadro 4.1, constata-se que em nenhum caso foi observado o período à taxa de secagem constante, o que leva a concluir que os materiais não possuem água livre para evaporação, sendo possível inferir que os fenômenos de secagem envolvidos estão relacionados aos mecanismos internos de migração de umidade, de forma que a difusão interna de umidade é um fator limitante do processo. Os tempos de secagem e as taxas máximas de secagem de todos os materiais são apresentadas na temperatura de 40°C, pois a secagem na temperatura de 30°C foi muito lenta, por ser uma temperatura muito próxima à ambiente. Para comparativo são mostrados também esses resultados na temperatura de 70°C. A difusividade efetiva foi calculada apenas para o endocarpo e para a fatia, visto que suas geometrias foram aproximadas à uma placa plana infinita, diferentemente do epicarpo e do mesocarpo que não tiveram cortes com geometria definida. As variações de cor foram maiores para o epicarpo e endocarpo.

4.3 Redes Neurais Artificiais

Redes neurais foram construídas com a estrutura e a quantidade de neurônios na camada intermediária, conforme descrito na metodologia, exemplos dessas redes serão apresentadas neste tópico visando avaliar o desempenho deste método para descrever a cinética de secagem de fatias e frações de limões.

A Figura 4.24 mostra os resultados obtidos da soma dos quadrados dos resíduos em função do número de neurônios na camada intermediária contendo de 2 a 80 neurônios, para as redes com arquitetura construída com 3 neurônios na camada de entrada, sendo tempo, temperatura e variável qualitativa de indicação do material e 1 neurônio na camada de saída representando o MR.

Figura 4.24 – Soma do quadrado dos resíduos em função do número de neurônios na camada intermediária, testadas para a secagem das frações e fatias do limão, nas temperaturas avaliadas.



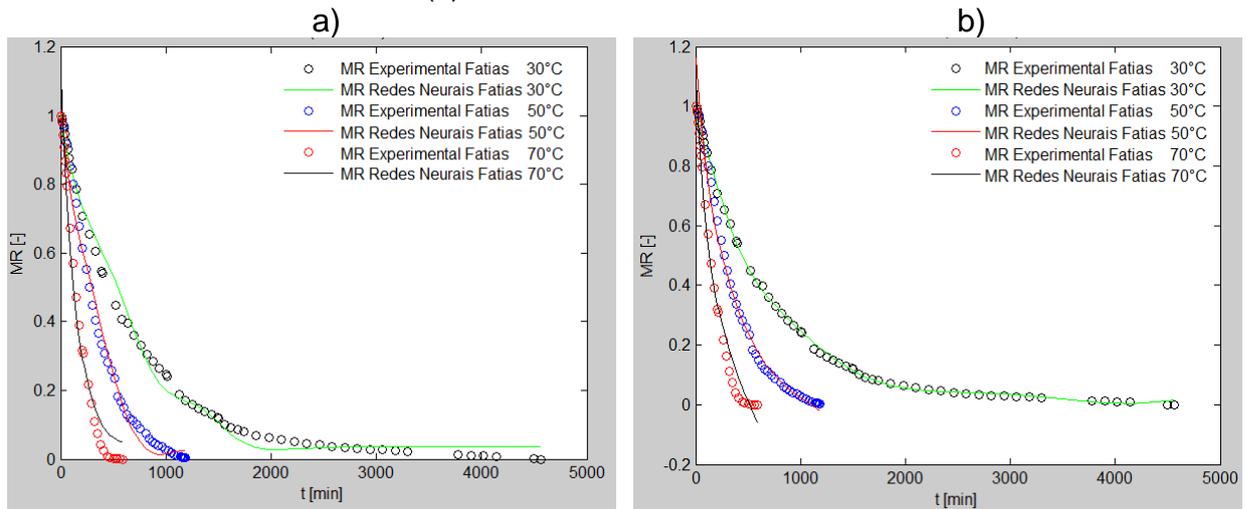
Fonte: Acervo pessoal.

O número excessivo de neurônios na camada intermediária pode ocasionar o superajuste aos dados experimentais e ainda a rede pode adquirir a capacidade de “aprender” com os erros experimentais e fornecer estimativas ruins dos resultados (HIMMELBLAU, 2008; NASCIMENTO, 2013; PERAZZINI, 2014; VIEIRA, 2014; VIEIRA *et al.*, 2014).

Portanto, apesar dos bons resultados de SQR a partir de 27 neurônios, serão mostradas na Figura 4.25a e 4.25b, apenas as estimativas da cinética de secagem para 9 e 20 neurônios na camada intermediária, especialmente para as

fatias, nas temperaturas de 30°C, 50°C e de 70°C, a título de demonstração dos ajustes obtidos. Para as condições selecionadas, os valores de SQR são, respectivamente, 0,002 e 0,0009 e os valores de R^2 são de 0,989 e 0,997.

Figura 4.25 – Adimensional de umidade em função do tempo dos dados experimentais e estimados pelas das RNAs, ambos nas temperaturas de 30°C, 50°C e de 70°C, para (a) 9 neurônios e (b) 20 neurônios, na camada intermediária.



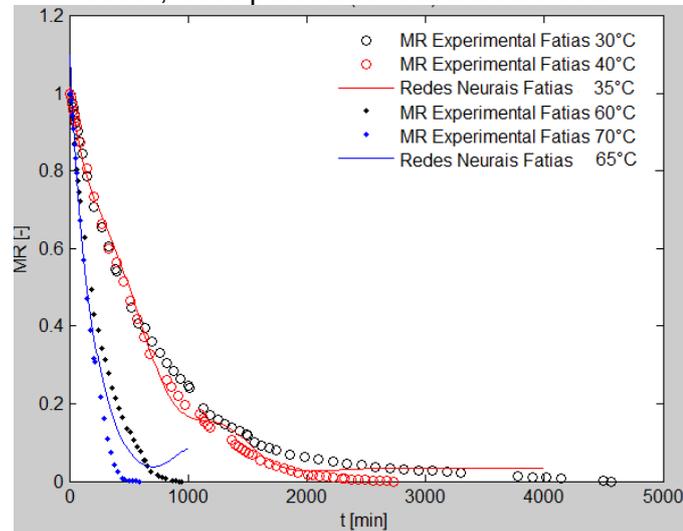
Fonte: Acervo pessoal.

É possível notar que mesmo com os bons resultados dos parâmetros estatísticos, os adimensionais de umidade estimados pelas Redes Neurais não se ajustaram bem aos dados de cinética de secagem. O mesmo ocorreu em outras condições estudadas, na maioria dos casos foram obtidos resultados ainda piores. Portanto, o ajuste obtido por meio de uma única rede, com um número definido de neurônios, não foi capaz de estimar a cinética de secagem dentro do intervalo de temperaturas estudado. Tal comportamento era esperado e é justificado, pois esta rede foi construída para estimar a umidade para quatro materiais diferentes, com estruturas muito diferentes entre si. Dada a heterogeneidade do material, seria necessário um banco de dados bem maior do que o utilizado para que melhore a qualidade das previsões dadas pela RNA.

A estimativa dos resultados para temperaturas que não foram testadas experimentalmente também foi realizada, utilizando a função *plot* do Matlab®. Escolhendo as temperaturas de 35°C, 45°C, 55°C e 65°C, por estarem dentro da faixa de operação utilizadas nos ensaios e optou-se pela rede composta por 9 neurônios na camada intermediária. As curvas obtidas que simulam a cinética de secagem, também para as fatias, foram de 35°C e 65°C, que são as temperaturas extremas

dentro da faixa de operação utilizada na secagem, conforme apresenta a Figura 4.26.

Figura 4.26 – Estimativa da cinética de secagem na temperatura de 35°C e 65°C, para as fatias, dada pela RNA com 9 neurônios.



Fonte: Acervo pessoal.

Fica claro na Figura 4.26 que para o número de neurônios escolhido houve oscilação na estimativa da temperatura de 35°C e para a simulação da temperatura de 65°C, a RNA proporcionou bom ajuste até MR de aproximadamente 0,5 e a partir disso a curva estimada mostrou comportamento parabólico, fisicamente inconsistente, uma tendência que foi observada também na figura 4.25a, nas temperaturas mais altas. Porém as curvas de cinética de secagem em geral se ajustam bem aos modelos exponenciais e isto não foi bem representado pela rede. Dessa forma, entende-se que para as RNAs serem efetivamente analisadas para prever o comportamento das curvas de secagem é necessário a obtenção de um número maior de pontos experimentais, que permitam um treinamento adequado para a rede como forma de melhorar a qualidade dos ajustes.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que a secagem de cada uma das frações ocorre de maneira diferente, visto que cada material analisado isoladamente tem suas características intrínsecas, resultando em cinéticas específicas. Em todas elas a secagem ocorreu predominantemente no período de taxa decrescente, demonstrando que os mecanismos internos de migração de umidade controlam o processo de secagem em todas as frações e nas fatias.

O aumento da temperatura de 30°C para 70°C provocou redução no tempo de secagem de aproximadamente 90% para as fatias e endocarpo e para o epicarpo e mesocarpo essa redução foi de aproximadamente 66%, até atingir a umidade de equilíbrio dinâmica. Isto mostrou que o efeito da temperatura na secagem representou em redução mais rápida da umidade, sendo este efeito significativo para o endocarpo e para as fatias, já para o epicarpo e o mesocarpo, o efeito da temperatura foi significativo no intervalo que compreende as temperaturas de 30°C à 50°C.

Os ajustes ao modelo difusional truncado no 13º termo da série da cinética de secagem do endocarpo e das fatias, foram bons, sendo possível sua utilização para descrever a cinética de secagem desses materiais. Os valores de difusividade efetiva obtidos para o endocarpo e para as fatias mostraram-se crescentes com o aumento da temperatura do ar, em todas as condições testadas como era esperado. O que permite concluir que a resistência à remoção de umidade diminui à medida que a temperatura aumenta, sendo encontradas as menores diferenças para a D_{ef} nas fatias, mostrando que o conjunto estruturado formado pela fatia, não possibilita a mobilidade da umidade com a mesma facilidade demonstrada no endocarpo, uma vez que o mesmo atingiu um valor muito maior em relação ao maior valor observado para a fatia, no mesmo intervalo de temperaturas.

Os ajustes das equações empíricas e semi-empíricas forneceram bons

resultados e em geral foram representativos. As equações de Page e Overhults, foram as que melhor estimaram as curvas cinética de secagem nas condições avaliadas.

A análise colorimétrica mostrou que houve expressiva variação na cor das fatias e do endocarpo com o aumento da temperatura, se comparada aos valores de ΔE *in natura*. Já para o epicarpo e o mesocarpo tal comportamento não foi significativo. Desse modo, pode-se concluir que o endocarpo foi o principal responsável pelo escurecimento observado na fatia.

A fatias apresentaram acentuado encolhimento, em torno de 33% em relação à fatia *in natura* e foi possível relacioná-lo com a perda da umidade do material, sendo observado maior encolhimento principalmente nos instantes iniciais da secagem.

A utilização das RNAs para a estimativa da cinética de secagem mostrou-se razoável, mesmo tendo sido fornecidos à rede poucos pontos experimentais para treinamento, dessa forma pode ser considerada uma ferramenta promissora para prever o comportamento das curvas de cinética de secagem.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar os efeitos da temperatura nas perdas das propriedades nutricionais do fruto.

Fornecer um número maior de pontos experimentais a uma RNA, que permitam um treinamento adequado, ou ainda efetuar a modelagem matemática, ou desenvolver um modelo híbrido por meio de RNA, como forma de melhorar a qualidade dos ajustes da cinética de secagem do limão ou frutos do gênero.

Avaliar as curvas de cinética de secagem utilizando o modelo difusivo considerando o encolhimento, como tentativa de se melhorar os ajustes do modelo aos dados experimentais do endocarpo e das fatias.

Desenvolver um aparato que possibilite o registro de imagens das espessuras das fatias, para que seja possível a análise do encolhimento volumétrico da amostra.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. R. F. **Análise da secagem de pastas em leite de jorro**. 2009. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

AOAC (Association of Official Analytical Chemists). **Official Methods of analysis of AOAC international**. 16 ed. Washington, DC.1995.

AZOUBEL, Patrícia Moreira. **Estudo da cinética de desidratação por imersão e secagem de tomate cereja (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*)**. 1999. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

BARROS, C. B. et al. **Óleos essenciais cítricos do Brasil**. 2 ed. Revisão Atualizada, Fundação Cargill, Campinas, 45p. 1986.

BARROZO, M. A. S. **Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leite deslizante e escoamentos cruzados**. 1995. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.

BORGES, S. V. et al. Secagem de fatias de abóboras (*Cucurbita moschata*, L.) por convecção natural e forçada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, 28 (Supl.), p. 245-251, dez. 2008.

BEHLING, E. et al. Flavonóide quercetina: aspectos gerais e ações biológicas. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 15, n. 3, p. 285-292, 2008. Disponível em: <<http://serv-bib.fcfar.unesp.br/seer/index.php/alimentos/article/viewArticle/89>>. Acesso em: 15 dez. 2014.

CHEN, H-H.; HERNANDES, C. E.; HUANG, T-C. A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer. **Solar Energy**, v.78, p. 97-103. 2005.

COELHO, Y. S. Limão tahiti para exportação: aspectos técnicos da produção. Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria de Desenvolvimento Rural, Programa de apoio à Produção e Exportação de Frutas, Hortaliças, Flores e Plantas Ornamentais. Brasília: EMBRAPA – SPI. **Série Publicações Técnicas FRUPEX**, 35 p., 1993.

COSTA, A. B. S. **Secagem convectiva de folhas de hortelã: análise baseada no ajuste de correlações empíricas, superfícies de resposta e redes neurais**. 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de transferência de massa**. Campinas, SP: Editora Unicamp - ed. 2, 2002

DEL RÍO, J. A. et al. *Citrus limon*: a source of flavonoids of pharmaceutical interest. **Food Chemistry**, Murcia, Spain, v 84, n. 3, p. 457-461, 2004.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, Mandioca e Fruticultura, Ministério da Agricultura e Abastecimento. **Produção brasileira de limão em 2011**. Disponível em: <http://www.cnpmf.embrapa.br/planilhas/Limao_Brasil_2011.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2013

FAO – Food and agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT Statistics database, Agriculture, Rome, Italy, p. 52-58, 2008.

FAO – Food and agriculture Organization of the United Nations. **Citrus Fruit – Fresh and Processed - Annual Statistics 2012**. Disponível em: <<http://www.fao.org/economic/est/est-commodities/citrus-fruit/en/>>. Acesso em: 15 jun. 2013

FIGUEIREDO, J. O. et al. Comportamento de catorze porta-enxertos para o limão eureka. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 73-76, abr. 2005.

FONSECA, R. B. F. **Identificação das substâncias voláteis em limão (*Citrus latifolia*, Tanaka), cv. tahiti, obtida por cultivo convencional e cultivo biodinâmico**, 2007. 66 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituição de Nutrição Josué de Castro, Rio de Janeiro, 2007.

GABAS, A. L. **Secagem de uva Itália em leito fixo**, 1998. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 1998.

GODOY, R. C. B. et al. Estudo de compotas e doces cristalizados elaborados com diferentes albedos cítricos. **Boletim do Centro de pesquisas de Processamento de Alimentos - CEPPA**, Curitiba, v. 23, n. 1, p. 95-108, 2005.

GOMES, M. S. **Caracterização química e atividade antifúngica dos óleos essenciais de cinco espécies do gênero *Citrus***, 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

GONÇALVES, L. C. et al. Reciclagem das cascas da laranja pêra na produção de suplemento alimentar de fibras solúveis (pectina). In: **Saneamento ambiental: desafio para o século 21**, ABES, 2001. p. 1-5.

GOUVEIA, J. P. G. **Avaliação da cinética de secagem de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) em um secador de leito fixo**, 1999. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 1999.

HONORES, W. J. C. **Estudo de secagem da maçã**, 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas.

KHAFAJEH, Hamid, et al. Drying of orange slices in CHP dryer. **Advances in Environmental Builogy**, v. 7, n. 9, p. 2326-2332, set. 2013. Disponível em <<http://connection.ebscohost.com/c/articles/90478324/drying-orange-slices-chp-dryer>> Acesso em: 18 ago. 2013.

KOUL, O.; WALIA, S.; DHALIWAL, G. S. Essential oils as Green pesticides: potential and constraints. **Biopesticides International**, v. 4, n. 1, p. 63-84, 2008.

KUMMER, R. et al. Evaluation of anti-inflammatory activity of *Citrus latifolia* Tanaka essential oil and limonene in experimental mouse models. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, v. 2013, p. 1-8. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2013/859083>>. Acesso em: 23 set. 2013.

LIMA, H. H. C. **Estudo do Efeito de Adsorvente Alternativo de Casca de Laranja Pera Rio (Citrus sinensis I. osbeck) na Adsorção de Corante Têxtil Vermelho Reativo BF-4G**. 2014. 57. f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) -Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

LIMÃO tahiti. Imagem. Disponível em: <<http://www.tecnologiaetreinamento.com.br/agricultura/fruticultura/producao-de-limao-taiti/>>. Acesso em: 11 jul. 2013.

LIMÃO siciliano. Imagem. Disponível em: <<http://eugourmet.wordpress.com/2013/05/07/limao-siciliano-um-novo-protagonista/>>. Acesso em: 11 jul. 2013.

LORENZI, H. et al. **Frutas brasileiras e exóticas cultivadas**. São Paulo, 2006, 581p.

MARQUES, L. G. **Liofilização de frutas tropicais**, 2008. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

MAZZUZ, C. F. Calidad de frutos cítricos: manual para sugestion desde la recoleccion hasta la expedición. **Ediciones de Horticultura**, Barcelona, España, 1996, 317p.

MENDONÇA, L. M. V. L. et al. Caracterização da composição química e do rendimento dos resíduos industriais do limão tahiti (*Citrus latifolia* - Tanaka). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 4, p. 870-874, 2006.

MILLEZI, A. F. et al. Caracterização e atividade antibacteriana de óleos essenciais de plantas condimentares e medicinais contra *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 373-379, 2013.

MURR, F. E. X. **Estudo dos fenômenos de secagem de batata**, 1992. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 1992.

PACHECO, C. R. F. Conceitos básicos de Secagem. **Curso de Especialização de Papel e Celulose**, p. 1-13, 2009.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra barlett (*Pyrus SP*) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 21, n. 3, p. 288-292, set-dez. 2001.

PARK, K. J.; TUBONI, C. T.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. Estudo da secagem de caqui giombo com encolhimento e sem encolhimento. **Revista Bras. De Prod. Agroindustriais**, v. 6, n. 1, p. 71-86, 2004.

PERAZZINI, H. **Secagem de resíduos cítricos em secador rotativo**, 2011. 86 f. dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

PIRES, M. M. et al. Análise do comportamento dos preços do limão tahiti do Brasil. **Revista Informações Econômicas**, São Paulo, v. 41, n. 9, p. 50-58, set. 2011.

RANGEL, C. N. **Limão (*Citrus latifolia* - Tanaka) cv tahiti cultivada em lavouras convencional e biodinâmica: caracterização física e química do suco e otimização da hidrólise enzimática**, 2008. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Alimentos) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Tecnologia, Seropédica, 2008.

REIS, F. R.; MASSON, M. L.; WASZCZYNSKYJ, N. Efeitos da secagem convectiva e a vácuo sobre parâmetros de qualidade de fatias de berinjela. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.8, n2, p. 163-169, 2006.

REIS, G. G. Estudo do efeito da secagem em convecção natural e forçada na composição do óleo essencial da citronela (***Cymbopogon nardus***). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 8, n. 4, p. 47-55, 2006.

ROCHA, R. P. **Avaliação do teor e da composição do óleo essencial de *Cymbopogon citratus* e *Thymus vulgaris* submetidos a processos de secagem e armazenamento**, 2011. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

ROSANOVA, A. H. **Análise comparativa de diferentes tratamentos para reduzir a deterioração de tomates**, 2013. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

SILVA, J. A.; SOARES, L. F.; COSTA, E. L. Sanitização de carcaças de frango com soluções de ácidos orgânicos comerciais e suco de limão - **Revista TeC Carnes** - Campinas, SP, v. 3, n. 1, p. 19-26, 2001. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/teccarnes/pdf/joao.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2014.

TITA, M. L. **Identificação dos componentes do óleo essencial de laranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck) e proposição de procedimentos industriais para a obtenção de produtos diferenciados**. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Química) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011

TRUCOM, C. Limão tahiti. **Doce Limão**. Disponível em: <<http://www.docelimão.com.br>>. Acesso em: 23 jun. 2013.

VIANA, D. S. **Limão (*Citrus latifolia*, Tanaka), cv. tahiti, de cultivos convencional e orgânico biodinâmico: avaliação da capacidade antioxidante dos sucos in natura e clarificados por membranas de microfiltração**, 2010. 100 f. Dissertação

(Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Farmácia, Rio de Janeiro, 2010.

VIEIRA, G. N. A. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.) em leite fixo e fluidizado**, 2012. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

WANG, N.; BRENNAN, J. G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. **Journal of Food Engineering**, n. 1, v. 24, p. 61-76, 1995.

ZIENA, H. M. S. Quality attributes of bearss seedless lime (*Citrus latifolia* - Tanaka) juice during storage. **Food Chemistry**, v. 71, 2000, p. 167-172. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814600000649#>>. Acesso em: 11 out. 2013.