

JAMILE PELISSONI MARANGONI

**ESTUDO DA SECAGEM DA MACADÂMIA
E PROPRIEDADES FÍSICAS DA AMÊNDOA**



1910001325



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS - DETA
CAMPUS DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO - SP

**ESTUDO DA SECAGEM DA MACADÂMIA
E PROPRIEDADES FÍSICAS DA AMÊNDOA**

Jamile Pelissoni Marangoni
Engenheira de Alimentos

Prof. Dr. José Antônio Gomes Vieira
Orientador

São José do Rio Preto - SP

2004



JAMILE PELISSONI MARANGONI

ESTUDO DA SECAGEM DA MACADÂMIA E PROPRIEDADES FÍSICAS DA AMÊNDOA

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências,
Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de São
José do Rio Preto, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Alimentos (Área de Concentração:
Engenharia de Alimentos).



T. 1325/05

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Gomes Vieira

São José do Rio Preto

Agosto/ 2004



+ 637.51
M311e

13/01/2005

Doação

R\$ 24,00

Autor(a)

076/2005

50702009

JAMILE PELISSONI MARANGONI

ESTUDO DA SECAGEM DA MACADÂMIA E

PROPRIEDADES FÍSICAS DA AMÊNDOA

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências,
Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de São
José do Rio Preto, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Alimentos (Área de Concentração:
Engenharia de Alimentos).

Marangoni, Jamile Pelissoni.

Estudo da secagem da macadâmia e propriedades físicas da amêndoa
/ Jamile Pelissoni Marangoni – São José do Rio Preto : [s.n.], 2004
98 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: José Antônio Gomes Vieira

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Instituto de
Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Noz macadâmia - Secagem. 2. Noz macadâmia - Propriedades
físicas. I. Vieira, José Antônio Gomes. II. Universidade Estadual
Paulista. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. III. Título.

CDU – 637.51

São José do Rio Preto

Agosto 2004

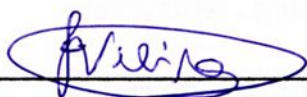


JAMILE PELISSONI MARANGONI

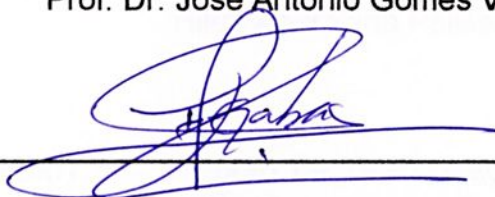
**ESTUDO DA SECAGEM DA MACADÂMIA
E PROPRIEDADES FÍSICAS DA AMÊNDOA**

COMISSÃO JULGADORA

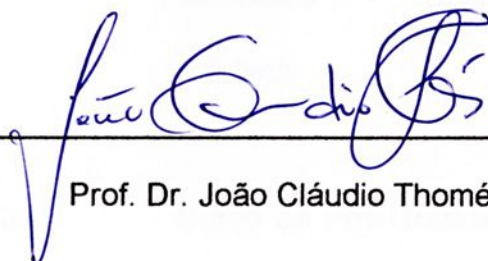
DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE



Prof. Dr. José Antônio Gomes Vieira



Profa. Dra. Ana Lúcia Gabas



Prof. Dr. João Cláudio Thoméo

Profa. Dra. Vânia Regina Nicoletti Telis

Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes

São José do Rio Preto, de

de 2004.



DADOS CURRICULARES

JAMILE PELISSONI MARANGONI

NASCIMENTO	26/11/1978 - MIRASSOL/ SP
FILIAÇÃO	Sebastião Marangoni Hilda Aparecida Pelissoni Marangoni
03/1997 à 12/2001	Curso de Graduação em Engenharia de Alimentos - Universidade Estadual Paulista
03/2002 à 08/2004	Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Ciência de Alimentos, nível mestrado, na Universidade Estadual Paulista, Câmpus de São José do Rio Preto/ SP

ILUSTRACIONES

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

Ilustração de autoria do autor.

DEDICO

MEUS AGRADECIMENTOS

Pensaram que me esqueci de vocês? Pois se enganaram...

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida e pela oportunidade que me concedeu e ao Prof. Dr. José Antônio Gomes Vieira que, com suas idéias e incentivos, proporcionou meu crescimento profissional e acadêmico.

Aos meus queridos pais, Sebastião e Hilda, essa vitória foi de vocês! Graças ao planejamento e renúncia, vocês ofereceram-me as ferramentas materiais e humanas necessárias para a realização desse trabalho. Minha eterna gratidão, pois vocês foram as pessoas que acreditaram e investiram em mim! Amo vocês!

A Merihelli e Ana Caroline, minhas irmãs, que sempre me acolheram com muita alegria, risadas, descontração e a todo momento lembraram-me que na vida há muita diversão e prazer. Valeu meninas!

À vovó Adelina, meu agradecimento pelo seu exemplo de FÉ! Jamais esquecerei...

Aos técnicos João Jesuíno e Nilton, que me acompanharam durante a parte experimental. Grata pelo APOIO!

Ao Prof. Dr. João Cláudio e à Prof. Dr. Ana Lúcia, pelas sugestões de correção da dissertação.

A todos os meus amigos, pela presença e incentivo.

Aos meus avós, tios, tias, primos e primas, que são o segmento da minha FAMÍLIA. Obrigada por sua existência!

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVO	22
3 MENSAGEM DE LITERATURA	22
3.1 Mensagem	22
3.1.1 Características da Mensagem Literária	23
3.1.2 Características da Mensagem Literária	23
3.1.3 Características da Mensagem Literária	26
3.2 Mensagem Literária	27
3.2.1 Características	27
3.2.2 Características	29
3.3 Mensagem Literária	32
3.3.1 Características	32
3.3.2 Características	32
3.4 Mensagem Literária	32
3.4.1 Características	32
3.4.2 Características	32
3.4.3 Características	32
3.4.4 Características	32
3.4.5 Características	32
3.4.6 Características	32
3.4.7 Características	32
3.4.8 Características	32
3.4.9 Características	32
3.4.10 Características	32
3.4.11 Características	32
3.4.12 Características	32
3.4.13 Características	32
3.4.14 Características	32
3.4.15 Características	32
3.4.16 Características	32
3.4.17 Características	32
3.4.18 Características	32
3.4.19 Características	32
3.4.20 Características	32
3.4.21 Características	32
3.4.22 Características	32
3.4.23 Características	32
3.4.24 Características	32
3.4.25 Características	32
3.4.26 Características	32
3.4.27 Características	32
3.4.28 Características	32
3.4.29 Características	32
3.4.30 Características	32
3.4.31 Características	32
3.4.32 Características	32
3.4.33 Características	32
3.4.34 Características	32
3.4.35 Características	32
3.4.36 Características	32
3.4.37 Características	32
3.4.38 Características	32
3.4.39 Características	32
3.4.40 Características	32
3.4.41 Características	32
3.4.42 Características	32
3.4.43 Características	32
3.4.44 Características	32
3.4.45 Características	32
3.4.46 Características	32
3.4.47 Características	32
3.4.48 Características	32
3.4.49 Características	32
3.4.50 Características	32
3.4.51 Características	32
3.4.52 Características	32
3.4.53 Características	32
3.4.54 Características	32
3.4.55 Características	32
3.4.56 Características	32
3.4.57 Características	32
3.4.58 Características	32
3.4.59 Características	32
3.4.60 Características	32
3.4.61 Características	32
3.4.62 Características	32
3.4.63 Características	32
3.4.64 Características	32
3.4.65 Características	32
3.4.66 Características	32
3.4.67 Características	32
3.4.68 Características	32
3.4.69 Características	32
3.4.70 Características	32
3.4.71 Características	32
3.4.72 Características	32
3.4.73 Características	32
3.4.74 Características	32
3.4.75 Características	32
3.4.76 Características	32
3.4.77 Características	32
3.4.78 Características	32
3.4.79 Características	32
3.4.80 Características	32
3.4.81 Características	32
3.4.82 Características	32
3.4.83 Características	32
3.4.84 Características	32
3.4.85 Características	32
3.4.86 Características	32
3.4.87 Características	32
3.4.88 Características	32
3.4.89 Características	32
3.4.90 Características	32
3.4.91 Características	32
3.4.92 Características	32
3.4.93 Características	32
3.4.94 Características	32
3.4.95 Características	32
3.4.96 Características	32
3.4.97 Características	32
3.4.98 Características	32
3.4.99 Características	32
3.4.100 Características	32

Há homens que lutam um dia, e são bons;
 Há outros que lutam um ano, e são melhores;
 Há aqueles que lutam muitos anos, e são muito bons;
 Porém há os que lutam toda a vida
 Estes são os imprescindíveis.

Bertold Brecht

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVOS.....	21
3. REVISÃO DE LITERATURA	22
3.1. Macadâmia.....	22
3.1.1. Caracterização do Fruto da Noz Macadâmia.....	23
3.1.2. Colheita do Fruto da Noz Macadâmia.....	25
3.1.3. Descarpelamento do Fruto da Noz Macadâmia.....	26
3.2. Propriedades Físicas	27
3.2.1. Densidade.....	27
3.2.2. Ângulo de Repouso	30
3.3. Propriedades Térmicas	35
3.3.1. Calor Específico.....	35
3.3.2. Difusividade térmica.....	38
3.4. Isotermas de Sorção.....	41
3.4.1. Considerações sobre os fenômenos de sorção e dessorção	41
3.4.2. Determinação da Umidade de Equilíbrio	42
3.4.3. Modelos Matemáticos para Ajuste das Isotermas.....	43
3.5. Cinética de Secagem	46
4. MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1. Matéria Prima.....	52
4.2. Composição Química	52



4.3. Caracterização Física	53
4.4. Propriedades Físicas	54
4.4.1. Densidades e Porosidade	54
4.4.2. Ângulo de Repouso	57
4.4.3. Velocidade Terminal	58
4.5. Propriedades Térmicas	59
4.5.1. Calor Específico	59
4.5.2. Difusividade Térmica	60
4.6. Isotermas de Sorção	62
4.7. Curvas de Secagem	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
5.1. Composição Química	66
5.2. Caracterização Física	66
5.3. Propriedades Físicas	67
5.3.1. Densidade Aparente e Real	67
5.3.2. Porosidade	71
5.3.3. Ângulo de Repouso	72
5.3.4. Velocidade Terminal	74
5.4. Propriedades Térmicas	75
5.4.1. Calor Específico	75
5.4.2. Difusividade Térmica	77
5.5. Isotermas de Sorção	79
5.6. Cinética de Secagem	82
6. CONCLUSÕES	91
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1: Curva típica de secagem.	47
Figura 4.1: Esquema do calorímetro.	59
Figura 4.2: Esquema da célula utilizada para medir a difusividade 30térmica da amêndoa de macadâmia.	61
Figura 4.3: Esquema do secador (vista lateral).	64
Figura 5.1: Densidade aparente da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.	68
Figura 5.2: Densidade real da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.	70
Figura 5.3: Porosidade da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.	71
Figura 5.4: Ângulo de repouso da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.	73
Figura 5.5: Velocidade terminal da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.	74
Figura 5.6: Calor específico da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.	76
Figura 5.7: Difusividade térmica da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.	78
Figura 5.8: Isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia à 20, 30, 40, 50 e 60°C.	80



Figura 5.9:	Comportamento da secagem da noz de macadâmia utilizando secador de leito fixo e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s, em diferentes temperaturas.	82
Figura 5.10:	Umidade adimensional em função do tempo para noz de macadâmia em diferentes temperaturas e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.	83
Figura 5.11:	Comportamento da secagem da amêndoa de macadâmia utilizando secador de leito fixo e velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s, em diferentes temperaturas.	85
Figura 5.12:	Comportamento da secagem da amêndoa de macadâmia utilizando secador de leito fixo e velocidade do ar de secagem de 2,5 m/s, em diferentes temperaturas.	85
Figura 5.13:	Comportamento da secagem da amêndoa de macadâmia utilizando secador de leito fixo à temperatura de 40°C e velocidade do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.	86
Figura 5.14:	Comportamento da secagem da amêndoa de macadâmia utilizando secador de leito fixo à temperatura de 50°C e velocidade do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.	87
Figura 5.15:	Comportamento de secagem da amêndoa de macadâmia utilizando secador de leito fixo à temperatura de 60°C e velocidade do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.	87
Figura 5.16:	Umidade adimensional em função do tempo para a amêndoa de macadâmia na temperatura de 40°C e velocidades do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.	88

Figura 5.17: Umidade adimensional em função do tempo para a amêndoa de macadâmia na temperatura de 50°C e velocidades do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s..... 89

Figura 5.18: Umidade adimensional em função do tempo para a amêndoa de macadâmia na temperatura de 60°C e velocidades do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s..... 89

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 3.1: Estimativa de produção mundial de noz macadâmia - Safra 2000.	22
Tabela 3.2: Composição química das amêndoas, cascas e nozes de macadâmia.	23
Tabela 3.3: Densidade da noz macadâmia em casca, contendo diferentes teores de umidade.....	29
Tabela 4.1: Umidade relativa das soluções salinas em função da temperatura.....	63
Tabela 5.1: Composição química média da amêndoa de macadâmia.	66
Tabela 5.2: Distribuição de tamanho da noz de macadâmia à 3% de umidade (b.u.).....	67
Tabela 5.3: Valores dos parâmetros dos modelos de isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia.....	79
Tabela 5.4: Parâmetros do modelo de Page (Eq. 3.25) para noz de macadâmia.	84
Tabela 5.5: Parâmetros do modelo de Page (Eq. 3.25) para amêndoa de macadâmia.	90



NOMENCLATURA

F_r:	força resistente, $[MLT^{-2}]$
V_t:	velocidade terminal, $[LT^{-1}]$
t:	tempo, $[T]$
ρ_{ap}:	densidade aparente, $[ML^{-3}]$
ρ_r:	densidade real, $[ML^{-3}]$
m:	massa, $[M]$
A_p:	área projetada, $[L^2]$
C:	coeficiente aerodinâmico de arraste, [adimensional]
W:	peso da partícula, $[MLT^{-2}]$
N_R:	número de Reynolds, [adimensional]
η:	viscosidade do fluido, $[MT^{-1}L^{-1}]$
c_p:	calor específico, $[FLM^{-1}\theta^{-1}]$
X:	fração em peso, [adimensional]
α:	difusividade térmica, $[L^2T^{-1}]$
C:	capacidade calorífica do calorímetro, $[FL\theta^{-1}]$
T:	temperatura, $[\theta]$
A:	taxa constante de elevação da temperatura em todos os pontos da célula utilizada para medir a difusividade térmica
T_s:	temperatura do sólido, $[\theta]$
X:	conteúdo de umidade de equilíbrio em base seca, $[M_{\text{água}}/M_{\text{prod. seco}}]$
X_m:	conteúdo de umidade na monocamada molecular
k:	constante, [adimensional]

K:	constante, [adimensional]
a_w:	atividade de água, [adimensional]
a, b, c:	constantes, [adimensional]
D_{EF}:	difusividade efetiva, [L^2T^{-1}]
C:	constante, [adimensional]
K_L:	parâmetro de secagem de Lewis, [T^{-1}]
X_0:	umidade inicial em base seca, [$M_{\text{água}}/M_{\text{prod. seco}}$]
X_{eq}:	umidade de equilíbrio em base seca, [$M_{\text{água}}/M_{\text{prod. seco}}$]
K_p e n:	parâmetros de secagem de Page, [T^{-n}], [adimensional]
P:	pressão absoluta, [$ML^{-1}T^{-2}$]
V:	volume, [L^3]
R:	constante dos gases, [$L^2T^{-2}\theta^{-1}$]
P:	porosidade, [adimensional]
M:	teor de umidade em base seca, [$M_{\text{água}}/M_{\text{prod. seco}}$]
θ:	ângulo de repouso
T_s:	temperatura na superfície, [θ]
T_c:	temperatura no centro, [θ]

RESUMO

Neste trabalho determinou-se a dimensão 1, a dimensão 2 e o peso das nozes de macadâmia e suas respectivas amêndoas, a fim de classificá-las em pequena, média e grande. As propriedades físicas da amêndoa de macadâmia foram calculadas em função do teor de umidade. As isotermas de sorção foram realizadas nas temperaturas de 20, 30, 40, 50 e 60°C. Estudou-se a cinética de secagem da noz e da amêndoa de macadâmia nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s, e temperaturas de 40, 50 e 60°C e velocidade do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s, respectivamente.

A macadâmia utilizada nesse trabalho apresenta a classificação: 21% pequena, 66% média e 13% grande.

Verificou-se que o teor de umidade tem influência direta na densidade aparente, densidade real, porosidade, ângulo de repouso, velocidade terminal, calor específico e difusividade térmica da amêndoa de macadâmia.

As curvas experimentais das isotermas de sorção foram ajustadas aos modelos de GAB, Henderson, Henderson Modificada, Chung Pfof e de Halsey Modificada, sendo que o modelo que apresentou melhor ajuste foi o de GAB.

No estudo da cinética de secagem, verificou-se que o modelo de Page pode ser utilizado para descrever o processo de secagem da noz e da amêndoa de macadâmia. Verificou-se também que o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem conduziu ao aumento do potencial de secagem.



ABSTRACT

The objectives of this work were to determine the dimension 1, dimension 2 and weight of macadâmnia nuts and its respective almonds, in order to classify them in small, regular and great, to determine the physical properties of the almond of the macadâmnia as functions of the moisture content, the sorption isotherms in the temperatures of 20, 30, 40, 50 and 60°C, and to study the drying kinetics of macadamia nut in the temperatures of 30, 40, 50 and 60°C and air velocity of drying of 1,0 m/s, and drying kinetics of the almond of macadâmnia in the temperatures of 40, 50 and 60°C and air velocity of drying of 1,5 and 2,5 m/s.

The macadâmnia used in this work presented the classification: small 21%, 66% regular and great 13%.

It was verified that the moisture content influenced in the apparent density, real density, porosity, angle of repose, terminal velocity, specific heat and thermal diffusivity of the almond of macadâmnia. Experimental data of the sorption isotherms were adjusted to the models of GAB, Henderson, Modified Henderson, Chung Pfoest and of Modified Halsey, and GAB model presented better fit.

In the study of the drying kinetics, it was verified that the model of Page can be used to describe the process of drying of the nut and the almond of macadâmnia. It was also verified that the increase of the temperature and the air velocity of drying lead to the increase of the drying potential.

1. INTRODUÇÃO

Nativa da Austrália, a *Nogueira Macadâmia* pertence à família das *Proteaceas*, sendo que, das várias espécies catalogadas, duas são comestíveis, *Macadâmia tetraphylla* e *Macadâmia integrifolia*. Esta última, devido à sua palatabilidade e coloração, é a mais plantada no mundo e a única em produção no Brasil. A amêndoa pode ser consumida crua, em doces e pratos finos, ou torrada e salgada em forma de petiscos. Seu óleo, rico em ácido palmitoleico, é disputado pela indústria de cosméticos, para ser usado na composição de hidratantes e por laboratórios farmacêuticos, sendo usado como redutor dos níveis de colesterol (Toledo Piza, 1991).

A macadâmia foi descoberta e botanicamente catalogada na Austrália entre 1840 e 1860. Na época, os fazendeiros da região ignoraram seu grande potencial econômico, iniciando os primeiros plantios comerciais somente cem anos depois. No Havaí, a noz foi introduzida em 1881 e, em poucos anos, surgiram os primeiros pomares da noqueira. Investimentos em tecnologia e comercialização colocaram a região na posição de maior produtora mundial de noz macadâmia por quase um século (Toledo Piza, 1991).

No Brasil, a noz macadâmia foi introduzida pelo Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo em 1948, visando adaptar a planta às condições do estado, desenvolvendo e testando variedades no sentido de viabilizar a exploração dessa cultura. A macadâmia vem sendo cultivada em vários estados brasileiros, destacando-se os estados de São Paulo, Espírito Santo, Bahia, Minas Gerais e Rio de Janeiro. Outros estados como Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Paraná



e Santa Catarina, também possuem uma pequena área cultivada. Atualmente o país possui 6.000 hectares plantados, com produção anual estimada de 2.000 toneladas em casca, adequada para a idade dos pomares brasileiros (Toledo Piza e Toledo Piza, 1999).

A safra brasileira deste ano é estimada em 2800 toneladas, dando ao país o sétimo lugar no ranking de produção de macadâmia. A expectativa para 2005 é de aumento de até 35% na produção.

Outros países como Costa Rica, Guatemala, África do Sul, Quênia, Malawi e Tanzânia, também possuem pomares jovens que produzirão macadâmia em escala crescente nos próximos anos. Este fato permite prever um incremento na competição pelos mercados de consumo, onde o preço e qualidade são fatores primordiais para disputá-los (Toledo Piza e Toledo Piza, 1999).

A noz macadâmia possui casca dura e mede aproximadamente 2,5 cm de diâmetro e tem peso médio de 8g. A amêndoa contém 75% de óleo de alta qualidade e 10% de proteína. Apesar de sua riqueza em óleo, 70% da produção é utilizada nas formas crua, torrada, frita e salgada, e o restante em confeitarias. Considerando a sua forma de utilização e seu alto preço no mercado internacional, as amêndoas de macadâmia sofrem uma rigorosa seleção nas indústrias processadoras, sendo o preço pago em função da qualidade do produto. Conforme normas estabelecidas por empresas da Austrália e adotadas por algumas empresas brasileiras, são considerados parâmetros de qualidade o teor de óleo, rendimento de amêndoa, maturidade, presença de fungos, decomposição, descoloração e ranço. O teor de óleo e o rendimento de amêndoa variam de acordo com o cultivar (Ito & Hamilton, 1987), clima e altitude (Bittenbender & Mc Gregor, 1991), manejo



(Stenphenson & Galagher, 1987) e sistema de plantio (Ito & Hamilton, 1987), entre outros fatores.

Além da necessidade de estudo sobre o comportamento de diferentes variedades de noz macadâmia, o pleno desenvolvimento dessa cultura, que apresenta grande potencial no país, só se dará com o profundo conhecimento da tecnologia de processamento e acondicionamento adequado para obter um produto de alta qualidade e competitivo no mercado externo. De acordo com Camargo (1992), o Brasil precisa desenvolver sua própria tecnologia, já que nos últimos anos o Havaí decidiu boicotar a difusão da mesma.

São poucas, entretanto, as informações disponíveis sobre a macadâmia brasileira, o que explica o uso muito restrito das técnicas atuais de modelagem aplicadas ao processamento e à elaboração de projetos. A macadâmia, de modo geral, requer operações pós-colheita, tais como: seleção, transporte, secagem, aeração, manuseio e estocagem, que visam à manutenção de sua qualidade ou mesmo o preparo para o consumo. A evolução desses processos e o desenvolvimento de novos métodos requerem o conhecimento das propriedades físicas do produto.

Informações concernentes ao tamanho e forma, densidade, porosidade, ângulo de repouso e velocidade terminal são parâmetros considerados relevantes em estudos de hidrodinâmica, aerodinâmica e transferência de calor e massa em volume de amêndoas. Juntamente com o teor de umidade, a densidade é utilizada para determinar as condições de armazenamento e o grau de comercialização do produto. O conhecimento das propriedades térmicas, por outro lado, é essencial para dimensionamento de equipamentos e otimização de processos. A aplicação de tais propriedades, no entanto, apresenta inúmeras restrições, pois variam segundo



as condições ambientais, variedade, localização e fertilidade de solos, práticas agrícolas empregadas e período de armazenamento.

Em face da crescente demanda de amêndoa de macadâmia, das condições favoráveis do clima e o alto preço atingido no mercado internacional, a secagem artificial da macadâmia vem se tornando um dos objetivos primordiais dos produtores. Entretanto, a secagem da macadâmia constitui, ainda, um setor de experimentação, em fase de desenvolvimento.

Devido à expansão dessa cultura pelo país e à necessidade do aperfeiçoamento de técnicas de secagem para um melhor acondicionamento e processamento, e em virtude da escassez de informações sobre as propriedades físicas da macadâmia, propôs-se, neste trabalho, determinar a cinética de secagem e as propriedades físicas da macadâmia.



2. OBJETIVOS

- 1) Determinar o comprimento, largura e peso das nozes de macadâmia, e suas respectivas amêndoas, a fim de estabelecer padrões para estas variáveis, ou seja, classificá-las em três categorias: pequena, média e grande.
- 2) Determinar as propriedades físicas da amêndoa de macadâmia: densidade aparente, densidade real, porosidade de leito, ângulo de repouso, velocidade terminal, calor específico e difusividade térmica em função do teor de umidade.
- 3) Determinar as isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia nas temperaturas de 20, 30, 40, 50 e 60°C.
- 4) Estudar a cinética de secagem da noz de macadâmia nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C, e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.
- 5) Estudar a cinética de secagem da amêndoa de macadâmia nas temperaturas de 40, 50 e 60°C, e velocidade do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Macadâmia

Como a cultura de macadâmia é pouco conhecida no Brasil, serão abordados na revisão de literatura aspectos que englobam desde a composição química até a colheita e descarpelamento do fruto da noz macadâmia.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as produções de macadâmia nos principais países onde a cultura foi estabelecida. Equador, Bolívia, Argentina e Nova Zelândia também produzem macadâmia, porém, por possuírem pequenos e recentes plantios da noz, não figuram nas estatísticas atuais.

Tabela 3.1: Estimativa de produção mundial de noz macadâmia - Safra 2000.

País	Noz em casca* (t)	Amêndoas (t)	% do total
Austrália	33.000	9.154	45,79
EUA - Havai	25.000	6.000	30,01
África do Sul	7.600	1.824	9,12
Quênia	5.900	1.239	6,20
Costa Rica	2.500	525	2,63
Guatemala	2.200	450	2,25
Brasil	2.000	420	2,10
Malauí	1.516	379	1,90
TOTAL	79.716	19.991	100,00

* 10% de umidade b.s.
Fonte: Toledo Piza & Toledo Piza (1999)



A macadâmia produz seus primeiros frutos quatro anos após o plantio e atinge sua maturidade produtiva com doze anos, fato já constatado no Brasil. Quanto à sua longevidade, sabe-se que, no Havaí, há pomares com até sessenta anos em plena produção comercial.

Palipane et al. (1992) determinaram a composição química das amêndoas, das cascas e das nozes em casca de macadâmia, como mostra a Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Composição química das amêndoas, cascas e nozes de macadâmia.

(g/ 100g)	Amêndoa	Casca	Noz em casca*
Umidade	1,9	7,0	4,9
Proteínas	7,6	1,7	4,2
Óleo	74,0	0,3	31,3
Carboidratos	13,4	13,5	13,4
Cinzas	1,2	0,3	0,7
Fibras	1,8	77,2	45,5

* Calculado com os dados da composição da amêndoa e da casca, assumindo-se a relação amêndoa-casca como sendo de 42:58

Fonte: Palipane et al. (1992).

3.1.1. Caracterização do Fruto da Noz Macadâmia

Segundo Storey, citado por Cereda & De Marchi (1991), a macadâmia é uma noz só no sentido popular, botanicamente não é uma noz. É a semente de uma classe de frutos conhecida como folículo. Botanicamente, uma noz é definida como um fruto constituído de vários carpelos abrindo-se em uma câmara comum em que somente um óvulo se desenvolve em semente e que não se fende e não se abre na maturidade. Um folículo, como é o caso da macadâmia, é um fruto com um único

lóculo contendo de uma a muitas sementes o qual se fende e se abre na maturidade, usualmente quando seco.

O fruto de macadâmia possui uma capa externa de consistência carnosa e cor verde, cujo nome técnico é pericarpo, usualmente chamado carpelo. Envolvida pelo carpelo encontra-se a noz em casca, de coloração marrom brilhante, e no interior da noz está a amêndoa de cor creme. A parte interna da noz, denominada endosperma, é formada por uma amêndoa de consistência frágil, com alto teor de óleo e que quando convenientemente preparada é extremamente saborosa (Toledo Piza, 1991).

A frutificação da nogueira macadâmia segue três fases distintas, a partir da polinização das flores: a primeira, denominada final do período zigoto, dura duas semanas, a segunda, chamada fase do embrião ou do desenvolvimento da semente, dura doze semanas, e a terceira, fase de acúmulo de óleo (maturação), dura dezessete semanas, totalizando trinta e uma semanas até a maturação completa e conseqüente queda dos frutos (Joubert, 1994).

Segundo Allen (1996) e Kermond & Baumgart (1996), o fruto maduro é um folículo de 25 mm de diâmetro, coloração verde e forma globosa. A noz é formada por uma casca dura, com espessura entre 2 e 5 mm e coloração marrom. Em seu interior encontra-se o embrião, de cor creme e composto por dois cotilédones hemisféricos.



3.1.2. Colheita do Fruto da Noz Macadâmia

Segundo Toledo Piza (1991), no Brasil, o período de safra das nozes macadâmia se estende de janeiro à junho, dependendo da variedade e da região. A duração média da safra é de noventa dias.

O'Hare & Vock (1990) relataram que, na Austrália, as nozes são colhidas manualmente ou de forma mecânica e que investimentos em equipamentos de colheita somente são econômicos quando a produção excede 35 toneladas de noz em casca por ano, para o custo da mão de obra australiana. A superfície do solo deve ser nivelada para que a máquina trabalhe de forma eficiente e não danifique o sistema radicular das árvores.

Segundo Toledo Piza (1991), os frutos caem naturalmente no chão quando maduros e, nessa ocasião contêm, aproximadamente, de 20 à 25% de umidade. A periodicidade da colheita deve ser definida de acordo com as peculiaridades de cada propriedade, influenciada por fatores climáticos, do solo e da própria umidade do produto.

Para a colheita mecanizada deve-se preparar o pomar mais cuidadosamente do que para a colheita manual. Na colheita mecanizada o pomar deve ser completamente limpo antes do início da queda de frutos. Galhos, ramos, folhas secas e frutos que tiverem queda prematura devem ser removidos do pomar. O contato dos frutos com a matéria orgânica decomposta acelera o processo de germinação das nozes. É recomendado um acompanhamento do pomar nesta fase de pré-colheita, monitorando-se a queda e maturidade dos frutos nos meses de janeiro e fevereiro. Quando o nível de frutos imaturos ou danificados por insetos



diminuir, deve-se limpar o pomar, queimar este material de primeira colheita e iniciar a colheita definitiva. A preparação inadequada do chão do pomar pode causar dificuldades na colheita e aumentar o número de nozes deterioradas. Os intervalos de colheita devem ser de quatro semanas em épocas úmidas e onde os frutos estejam expostos diretamente ao sol, e a cada seis semanas em épocas secas e pomares sombreados (plantas adultas). Caso o fruto fique sobre o solo por um longo período, especialmente em condições de alta umidade, as amêndoas ficarão mofadas, descoloridas e o índice de pré-germinação aumentará. Se estiver muito úmido para o uso de colhedadeiras mecânicas, a colheita manual deve ser utilizada (Allen, 1996).

3.1.3. Descarpelamento do Fruto da Noz Macadâmia

Dierberger & Marino Neto (1985) recomendaram não deixar passar mais do que dois ou três dias para descarpelar os frutos após a colheita, porque depois que os pericarpos secam e endurecem sua remoção torna-se difícil. Se, por qualquer motivo, o carpelo não puder ser removido neste período, as nozes devem ser esparramadas em camadas delgadas para que sequem sem maiores prejuízos, devido à umidade presente no mesmo.

Segundo Hobson (1991), o carpelo deve ser retirado no mesmo dia da colheita, evitando-se a fermentação do produto. Quando o produto fermenta ocorre o aumento da temperatura e conseqüentemente perda de sabor e indução ao processo de rancidez. Para evitar esses problemas, o autor sugere que o volume



colhido diariamente seja compatível com a capacidade do sistema de descarpelamento.

Lee (1998) sugeriu que o descarpelador seja regulado para diminuir a pressão sobre a noz em casca (NIS, nuts-in-shell, noz em casca), alertando que a excessiva pressão provocará anéis marrons nas amêndoas depois de secas.

3.2. Propriedades Físicas

3.2.1. Densidade

Benedetti (1987) definiu as propriedades físicas:

- Densidade real: É a relação existente entre certa massa de produto e seu volume real (ρ_r).
- Volume real: O volume ocupado pelo produto (V_r).
- Densidade aparente: É a relação existente entre certa massa de produto e o volume aparente correspondente (ρ_a).
- Volume aparente: O volume ocupado pelo produto mais o volume intersticial (V_a).
- Porosidade de leito: É a relação entre o volume intersticial e o volume aparente do leito do material biológico, expressa em porcentagem (E).

O conhecimento da densidade aparente e real, e da porosidade dos produtos agrícolas tem importância fundamental em projetos de engenharia, envolvendo



dimensionamento de máquinas e equipamentos para colheita, manuseio, armazenamento, secagem e aeração.

A forma irregular, o pequeno tamanho e a porosidade da maioria dos produtos agrícolas dificultam a determinação do volume real e da densidade real. Devido à forma irregular desses produtos, o volume real é usualmente determinado através do deslocamento de água, quando uma massa conhecida do produto é imersa e, posteriormente, é medido o volume de líquido deslocado, que corresponde ao volume do produto.

A porosidade é definida como o volume intersticial entre o material agrícola ocupado pelo ar. É uma propriedade extremamente importante na movimentação de ar através do produto, tanto para secagem quanto para a aeração (Cordeiro, 1987). Segundo Benedetti (1987), a porosidade aumenta com o aumento do teor de umidade do produto agrícola.

A densidade aparente é um dado de suma importância no dimensionamento de silos, secadores e transportadores.

Gupta & Das (1997), verificaram que a densidade real da semente de girassol aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade, porém, Deshpande et al. (1993), verificaram que a densidade real da soja diminui com o aumento do teor de umidade. Essa diferença nos resultados encontrados para esses dois materiais biológicos pode ser devido à diferença na estrutura celular das sementes e dos grãos (Baryeh, 2002). Para o amendoim que, assim como a amêndoa de macadâmia, possui alto teor de óleo, Olajide e Igbeka (2003) obtiveram o valor da densidade real de $1,01 \text{ g/cm}^3$ à 4,6% (b.s.) de umidade.



3.2.2 Deshpande et al. (1993) verificaram que a densidade aparente da soja diminui linearmente com o aumento do teor de umidade. Resultado similar foi encontrado por Gupta & Das (1997) para a semente de girassol.

Gupta & Das (1997) verificaram que a porosidade da semente de girassol aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade. Porém, Deshpande et al. (1993) verificaram que a porosidade da soja diminui linearmente com o aumento do teor de umidade.

Os valores de densidade real, densidade aparente e porosidade da canola (*Brassica napus*), com 7,03% (b.u.) de umidade, encontrados por Vasconcelos (1998) foram, respectivamente, 1,183 g/cm³, 0,668 g/cm³ e 43,53%.

Palipane et al. (1992) determinaram a densidade aparente (massa de nozes) e real (uma única noz) para as nozes de macadâmia em casca contendo diferentes teores de umidade, de acordo com a Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Densidade da noz macadâmia em casca, contendo diferentes teores de umidade.

Umidade (% b.s.)	Aparente (kg/ m³)	Real (kg/ m³)
2,0		1016,6 ± 12,2 _a
3,2	600,8 ± 2,7 _a	1021,6 ± 11,9 _a
6,0	604,3 ± 5,1 _b	1060,1 ± 8,4 _{ab}
7,9	605,0 ± 2,7 _b	1034,4 ± 1,9 _{ab}
13,1	606,3 ± 3,8 _b	1042,6 ± 19,0 _b
18,1	612,4 ± 3,8 _c	1064,0 ± 17,0 _c
23,2	626,9 ± 3,1 _d	1098,8 ± 12,4 _d
24,2	629,8 ± 3,0 _d	

Fonte: Palipane et al. (1992) - resultados seguidos pelas mesmas letras não são significativamente diferentes de acordo com o teste de Duncan (multirange).

3.2.2. Ângulo de Repouso

Ângulo de repouso, ou ângulo de talude, é aquele formado pelo produto com o plano horizontal, ao escoar através de um fluxo constante (Tosello & Jorge, 1976).

O ângulo de repouso é importante na elaboração de projetos de silos, correia transportadora, entre outros.

Segundo Mohsenin (1986), tamanho, forma, orientação das partículas e a umidade do produto influenciam decisivamente no ângulo de repouso.

Gupta & Das (1997) estudaram o ângulo de repouso da semente de girassol e constataram que o ângulo de repouso varia de 33° , com 3,6% de umidade (b.s.), à 41° , com 20,2% (b.s.). Olajide & Igbeka (2003) obtiveram para o ângulo de repouso do amendoim com 4,6% de umidade (b.s.) o valor de 17° . O valor do ângulo de repouso da canola, variedade Iciola 41, com 7,03% de umidade (b.u.) é de $30,6^\circ$ (Vasconcelos, 1998).

Fowler & Wyatt, citado por Benedetti (1987) estudaram o efeito da umidade sobre o ângulo de repouso de materiais granulares. Trabalhando com diversos produtos, entre os quais o trigo, concluíram que o ângulo de repouso aumenta com o aumento da umidade. Para tal fenômeno, os autores sugeriram que a variação do ângulo de repouso em função do teor de umidade é devido ao efeito da tensão superficial que torna-se predominante para manter os sólidos agregados.



3.2.3. Velocidade Terminal

Uma partícula em queda livre em uma corrente de ar ascendente está sujeita a três tipos de forças: a força gravitacional, a força devido ao empuxo do ar e a força de resistência. Considerando a partícula: o peso atua para baixo, o empuxo para cima e a força resistente para cima, Bird (1960).

A velocidade terminal será a velocidade constante da partícula, quando as forças citadas estiverem em equilíbrio.

Então:

$$\text{PESO} - \text{EMPUXO} = \text{FORÇA RESISTENTE}$$

Segundo Mohsenin (1986), a força resistente é dada por:

$$F_r = \frac{1}{2} C A_p \rho_f V_t^2 \quad (3.1)$$

Portanto,

$$m_p g \left[\frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} \right] = \frac{1}{2} C A_p \rho_f V_t^2 \quad (3.2)$$

A velocidade terminal é expressa:

$$V_t = \left(\frac{2W(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f \rho_p C A_p} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$



e

$$C = \frac{2W(\rho_p - \rho_f)}{V_t^2 A_p \rho_p \rho_f} \quad (3.4)$$

Onde:

V_t : Velocidade terminal;

g : Aceleração da gravidade;

ρ_p : Densidade da partícula;

m_p : Massa da partícula;

A_p : Área projetada da partícula;

ρ_f : Densidade do fluido;

C : Coeficiente aerodinâmico de arraste;

W : Peso da partícula.

Dessa maneira pode-se calcular a velocidade terminal de uma partícula teoricamente, desde que se conheçam os parâmetros envolvidos. O coeficiente aerodinâmico de arraste (C) e a velocidade terminal (V_t) são, ambos, funções da forma da partícula e do número de Reynolds (N_R), de acordo com Hawk et al. citado por Benedetti (1987).

Segundo Mohsenin (1986), para uma esfera de diâmetro d_p , substituindo a área projetada da partícula por $A_p = (\pi/4)d_p^2$ e o peso da área projetada da partícula por $W = (\pi/6)\rho_p g d_p^3$, temos a seguinte equação para a velocidade terminal:

$$V_t = \left[\frac{4gd_p(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C} \right]^{1/2} \quad (3.5)$$



Para condições de escoamento laminar de um fluido newtoniano, os valores do coeficiente aerodinâmico de arraste, C , são calculados a partir da Equação 3.6 para número de Reynolds (N_R) menor do que 1,0.

$$C = \frac{24}{N_R} \quad (3.6)$$

e

$$N_R = \frac{V d \rho_f}{\eta} \quad (3.7)$$

Onde:

η : Viscosidade do fluido.

Substituindo C e N_R na Equação 3.8, temos a equação da velocidade terminal de acordo com a Lei de Stokes.

$$V_t = \frac{g d_p^2 (\rho_p - \rho_f)}{18 \eta} \quad (3.8)$$

Assim sendo, a velocidade terminal depende do coeficiente de arraste, número de Reynolds, peso e diâmetro da partícula, e de duas propriedades do fluido, viscosidade e densidade.

Dois métodos são utilizados para a determinação da velocidade terminal e do coeficiente de arraste. Um deles é baseado no tempo gasto na queda livre de uma partícula em diversas alturas. No outro, as partículas são colocadas em um escoamento de ar vertical, sendo que a velocidade do ar deve ser ajustada para que as partículas fiquem suspensas com pequeno ou nenhum movimento. Neste ponto

de equilíbrio, a velocidade do ar é a velocidade terminal da partícula, segundo Hawk et al., citado por Benedetti (1987).

A velocidade terminal pode ser utilizada em projetos de equipamentos de transporte aerodinâmico ou hidrodinâmico de produtos agrícolas.

Vasconcelos (1998) determinou a velocidade terminal experimental para a canola, variedade Iciola 41, e obteve valor médio de 622,30 cm/s. A velocidade terminal teórica calculada pelo mesmo autor foi de 681,52 cm/s. O autor verificou que a velocidade terminal teórica foi maior do que a velocidade terminal experimental, e concluiu que esse comportamento pode ser devido à aproximação feita para a forma da canola, considerando a mesma como uma esfera e sendo utilizado o seu diâmetro equivalente, o que implicaria em uma rotação dos grãos em torno de si mesmo, com possíveis desvios para a velocidade terminal experimental. Outra explicação mencionada pelo autor é que a determinação da velocidade terminal experimental foi realizada com grande quantidade de grãos, enquanto que a velocidade terminal teórica é determinada com base nas medidas do grão individual.

Gupta & Das (1997) verificaram que a velocidade terminal da semente de girassol aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade.



3.3. Propriedades Térmicas

3.3.1. Calor Específico

O calor específico de um corpo é definido como a razão entre a capacidade térmica e a massa do corpo, sendo que a capacidade térmica é a razão entre o calor fornecido ao corpo e a correspondente variação de temperatura.

Segundo Vieira (1996), é necessário conhecer o calor específico para determinar a quantidade de energia a ser adicionada ou removida nos processos de aquecimento e resfriamento de alimentos. Este valor pode dar uma indicação de energia envolvida, e nos processos contínuos pode ter influência sobre as dimensões do equipamento.

A variação de pressão para os processos que envolvem transferência de calor em materiais agrícolas é muito pequena. Em decorrência desse fato, utiliza-se o conceito de calor específico à pressão constante.

Várias expressões estão disponíveis na literatura para a determinação do calor específico de materiais biológicos com base na composição química dos mesmos. Siebel, citado por Mohsenin (1986), propôs uma equação simplificada para o calor específico de produtos agrícolas, baseado no teor de umidade do produto.

Para calcular o calor específico de grãos, Heldman (1975) apresenta a seguinte expressão:



$$c_p = 1422,5X_c + 1548,1X_p + 1673,6X_f + 836,8X_a + 4184X_m \quad (3.9)$$

Em que:

c_p : Calor específico do produto;

X_c : Fração em peso de carboidratos no produto;

X_p : Fração em peso de proteínas no produto;

X_f : Fração em peso de gordura no produto;

X_a : Fração em peso de cinzas no produto;

X_m : Fração em peso de umidade no produto.

Disney (1954), Kazarian & Hall (1975) e Sasseron (1984) relataram a dificuldade da obtenção do calor específico de materiais biológicos. A obtenção é complicada devido ao teor de umidade do material, calor de sorção e dessorção, movimentos internos de umidade e outros processos internos reversíveis ou irreversíveis.

Existem vários métodos para determinar o calor específico que se baseiam no equilíbrio térmico estabelecido entre o corpo, cujo calor específico se pretende determinar, e um segundo corpo de calor específico conhecido. Pode-se, também, calcular esta propriedade conhecendo-se a condutividade térmica (k), a difusividade térmica (α) e a densidade (ρ) do material em questão, a partir da definição de α , ou seja:

$$c_p = k/\alpha \cdot \rho \quad (3.10)$$



Dois métodos são mais conhecidos para a determinação experimental do calor específico de produtos agrícolas: método transiente, ou método de mistura direta, e método do estado estacionário. O segundo método consiste em colocar a amostra numa pequena câmara aquecida através de corrente elétrica. A maior fonte de erro deste método está relacionada com a determinação da temperatura da amostra, devido ao gradiente de temperatura no interior da amostra, segundo Whight & Poterfield (1970).

Segundo Kazarian & Hall (1975), Mohsenin (1986), Disney (1954), Hwang & Hayakawa (1979), o método mais usado é o da mistura direta, que consiste em utilizar um recipiente isolado, de capacidade calorífica conhecida, contendo um líquido inerte. Neste método, a amostra, a uma temperatura diferente da temperatura do líquido calorimétrico, é colocada no recipiente e a temperatura de equilíbrio é medida. Para determinar o calor específico da amostra, é assumido que o calor cedido pela amostra é igual ao calor recebido pelo fluido e calorímetro (Lewis, 1987).

Através de um balanço de energia, calcula-se o calor específico da amostra pela equação:

$$c_a m_a (T_a - T_e) + C(T_a - T_e) = c_m m_m (T_e - T_m) \quad (3.11)$$

Onde:

c_a : Calor específico da água;

c_m : Calor específico do material;

C : Capacidade calorífica do calorímetro;

m_a : Massa da água;

m_m : Massa do material;

T_a : Temperatura da água;

T_m : Temperatura do material;

T_e : Temperatura de equilíbrio;

Dentre as fontes de erro desse método, as duas mais importantes são: a troca de calor entre o calorímetro e o ambiente, e a energia adicionada ao sistema por agitação (Vieira, 1991).

Alam e Shove (1973) encontraram uma relação linear para o calor específico da soja com teor de umidade entre 9,5 e 38%. Sreenarayanan e Chattopadhyay (1986) determinaram o calor específico para o farelo de arroz no intervalo de umidade e temperatura de 4,3 à 18% e 38 à 63°C, respectivamente, e verificaram que o calor específico varia linearmente de 1,702 à 2,189 kJkg⁻¹K⁻¹. Chandrasekar e Viswanathan (1999) também verificaram que o calor específico do café arábica e robusta aumenta linearmente com o aumento do teor de umidade, no intervalo de 9,9 à 26% de umidade para o café arábica, e de 10,6 à 30,6% de umidade para o café robusta.

3.3.2. Difusividade térmica

Em termos físicos, a difusividade térmica nos fornece uma medida de como a temperatura pode variar quando um material é aquecido ou resfriado. Assim, essa propriedade é importante quando considera transferência de calor em regime



transiente. Essa propriedade pode ser determinada indiretamente utilizando a relação entre a condutividade térmica, calor específico e densidade, através da Equação 3.10. Nas determinações experimentais, a metodologia proposta por Dickerson (1965) é a mais utilizada, segundo Magee (1995), Subramanian e Viswanathan (2003), Aviara e Haque (2001), entre outros. A teoria deste método está baseada em uma condição de transferência de calor em regime transiente, onde as temperaturas da amostra variam linearmente com o tempo.

Foi construído um gráfico temperatura versus tempo para o aquecimento da amostra na superfície e no centro da célula de Dickerson, obtendo-se duas curvas de aquecimento da amostra: uma no centro e outra na superfície da célula. Após certo tempo, as duas curvas permaneceram paralelas, indicando que a taxa de aquecimento na superfície da célula era igual à taxa de aquecimento no centro da célula. A difusividade térmica da amêndoa de macadâmia foi calculada através da Equação 3.14.

Segundo Telis-Romero (1992), o método produz dados aplicáveis ao intervalo de temperatura através do qual o fluido é aquecido ou resfriado e permite o cálculo da difusividade térmica a partir de um único experimento. As condições necessárias são satisfeitas quando a taxa de aquecimento ($\partial T/\partial t$) na equação de transferência de calor é constante. Baseando-se na geometria cilíndrica da célula, a equação de variação de energia se reduz a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \quad (3.12)$$

Se a transferência de calor é exclusivamente radial, a Equação 3.12 é simplificada para:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial t} \right\} \quad (3.13)$$

Onde:

A: Taxa constante de elevação da temperatura em todos os pontos do cilindro.

Condições de contorno:

Para $r = 0$, $dT/dr = 0$

Para $r = R$, $T_s = At$

Dickerson (1965) obteve:

$$\alpha = \frac{AR^2}{4(T_s - T_c)} \quad (3.14)$$

Onde:

R: Raio do cilindro;

T_s : Temperatura na superfície do cilindro;

T_c : Temperatura no centro do cilindro.

Vélez et al. (1991) utilizaram esse método para determinar a difusividade térmica da água, solução de cabornato de cálcio e cloreto de sódio, e concluíram que os dados obtidos apresentaram uma variação de menos de 2% em relação à literatura. A mesma conclusão foi apresentada por Telis-Romero (1992) na determinação da difusividade térmica de soluções de amido de milho e goma



xantana. Vieira (1996) também utilizou esse método para determinar a difusividade térmica do suco de laranja e verificou que a difusividade térmica diminuiu com a concentração do suco, segundo uma relação cúbica. Chandrasekar e Viswanathan (1999) estudaram a dependência da difusividade térmica do café arábica e robusta com o teor de umidade, e verificaram que a difusividade térmica diminui com o aumento do teor de umidade. Verificaram também que os valores da difusividade térmica são menores para a variedade robusta.

3.4. Isotermas de Sorção

3.4.1. Considerações sobre os fenômenos de sorção e dessorção

O conhecimento das isotermas de sorção de água é muito importante na concentração, desidratação e secagem, previsão de estabilidade química, enzimática e microbiológica, seleção de material para embalagens, bem como na determinação da qualidade e vida de prateleira de alimentos (Dural e Hines, 1993).

A umidade de equilíbrio higroscópico é relevante no estudo da secagem porque determina o teor de umidade até o qual o produto poderá ser seco sob condições estabelecidas de secagem.

Uma substância higroscópica, como é o caso de grãos e cereais, tende a manter uma determinada pressão de vapor a uma dada temperatura e umidade



relativa. Essa pressão de vapor é conhecida como pressão de vapor de equilíbrio e a umidade relativa correspondente é conhecida como umidade relativa de equilíbrio.

Barrozo (1995) definiu a umidade de equilíbrio de um material, numa determinada temperatura, como sendo o teor de umidade correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no meio ambiente. Segundo este autor, a umidade de equilíbrio é que vai determinar o teor mínimo de umidade que o material pode atingir em um determinado conjunto de condições operacionais, sendo, deste modo, de importância fundamental na modelagem do processo de secagem.

O teor de umidade de equilíbrio de um material higroscópico, para certa condição de temperatura, umidade relativa de equilíbrio e determinada pressão, depende do caminho utilizado para atingir o equilíbrio. Assim, para uma mesma umidade relativa pode haver duas isotermas, chamadas isotermas de sorção e dessorção. Tanto o processo de sorção quanto o de dessorção dependem do teor de umidade inicial em que cada processo começa, ou seja, se o material está com o teor de umidade menor ou maior que o da umidade de equilíbrio para as condições do ambiente, respectivamente.

3.4.2. Determinação da Umidade de Equilíbrio

Dois métodos são bastante usados para a determinação da umidade de equilíbrio: método estático e dinâmico. No método estático a umidade de equilíbrio entre o produto e a atmosfera circundante é atingida sem movimentação do ar. No



método dinâmico, o ar ou o material é movimentado até que o equilíbrio seja atingido.

A obtenção experimental das isotermas de sorção pelo método estático pode ser realizada com a utilização de soluções ácidas de diversas concentrações ou soluções salinas saturadas, para regular a pressão de vapor nas vizinhanças do produto. O uso das soluções salinas é mais comum devido à segurança no manuseio e pela maior facilidade de manter a umidade relativa constante. Se houver evaporação de água, alguns sais precipitam, mas a umidade relativa não varia (Labuza et al., 1985).

3.4.3. Modelos Matemáticos para Ajuste das Isotermas

Um grande número de equações teóricas, semi-empíricas e empíricas tem sido proposto para estimativa da umidade de equilíbrio dos materiais biológicos.

Segundo Barrozo (1995), os modelos teóricos não conseguem prever, com precisão, a umidade de equilíbrio para materiais biológicos em uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar. Este fato motivou o aparecimento de vários modelos empíricos e semi-empíricos, na tentativa de aumentar a precisão na estimativa desta variável.

Algumas das equações mais utilizadas para descrever o comportamento das curvas de sorção estão relacionadas a seguir.



Equação de GAB - este modelo está sendo utilizado em vários laboratórios oficiais de alimentos nos EUA e na Comunidade Européia como padrão de descrição e comparação de isotermas por apresentar maior quantidade de parâmetros. Esta equação tem sido muito aplicada para vários alimentos e é recomendada pelo projeto europeu COST 90 (Jowitt et al., 1983). A equação de GAB é dada por:

$$X = \frac{X_m K c a_w}{(1 - k a_w) [1 + (c - 1) k a_w]} \quad (3.15)$$

Onde:

c: Constante do modelo;

K: Constante do modelo;

a_w : Atividade de água;

X: Conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

X_m : Conteúdo de umidade na monocamada molecular.

Equação de Henderson - é uma das mais conhecidas expressões para previsão da umidade de equilíbrio de produtos biológicos. A equação de Henderson é baseada no modelo de adsorção de Gibbs (Barrozo, 1995).

$$X = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-a T_s} \right]^{1/b} \quad (3.16)$$

Onde:

a e b: Constantes do modelo;



Equação de Henderson Modificada - modificação da Equação de Henderson, proposta por Thompson (1968).

$$X = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-a(T_s + c)} \right]^{1/b} \quad (3.17)$$

Onde:

a, b e c: Constantes do modelo;

Equação de Chung Pfost (1967) - foi proposta a partir de modificações empíricas na equação de Harkins e Jura (1944). Esta equação foi desenvolvida a partir da consideração de que o trabalho requerido para adsorver (ou desorver) uma molécula é igual à soma do trabalho requerido para vencer a resistência de retirar uma molécula de vapor localizada na superfície, mais o trabalho de condensação. Segundo Brooker et al., citado por Barrozo (1995), esta equação ajusta-se bem aos dados de equilíbrio dos grãos numa faixa de umidade relativa do ar de 20 à 90%.

$$X = \frac{-1}{b} \ln \left[\frac{(T_s + c) \ln(a_w)}{-a} \right] \quad (3.18)$$

Onde:

a, b e c: Constantes do modelo;

Equação de Halsey modificada (Osborn et al., 1989) - esta equação é proveniente de modificações da equação de Halsey, que é baseada no modelo



teórico de BET e na hipótese de interação das moléculas adsorvidas na multicamada.

$$X = \left[\frac{-\exp(aT_s + c)}{\ln a_w} \right]^{1/b} \quad (3.19)$$

Onde:

a, b e c: Constantes do modelo;

3.5. Cinética de Secagem

A secagem é uma operação que envolve transferência simultânea de calor e massa. A transferência de calor, necessária para evaporação da umidade, é geralmente baseada no mecanismo de convecção. Quanto à transferência de massa, existem dois aspectos importantes a serem considerados: o transporte de água no interior do sólido a ser seco até a superfície e a remoção do vapor a partir da mesma. O processo, usualmente representado por uma curva de secagem (Figura 3.1), pode ser dividido em três fases (Queiroz, 2003):

1ª Fase (AB) - Aquecimento do material até a temperatura de secagem desejada: a elevação da temperatura causa um rápido aumento na taxa de secagem.



2ª Fase (BC) - Período de taxa constante: a velocidade de transferência de massa (umidade) no interior do sólido poroso é igual à velocidade de evaporação da água na superfície do mesmo.

3ª Fase (CD) - Período de taxa decrescente: a velocidade de transferência de massa no interior do sólido é menor que a taxa de evaporação na superfície. Ocorre a elevação da temperatura do produto.

Na Figura 3.1, X é a umidade em base seca (kg água/ kg matéria seca), k é a taxa de evaporação de umidade (kg água/ kg matéria seca.h), X_c é a umidade crítica e k_c é a taxa crítica correspondente.

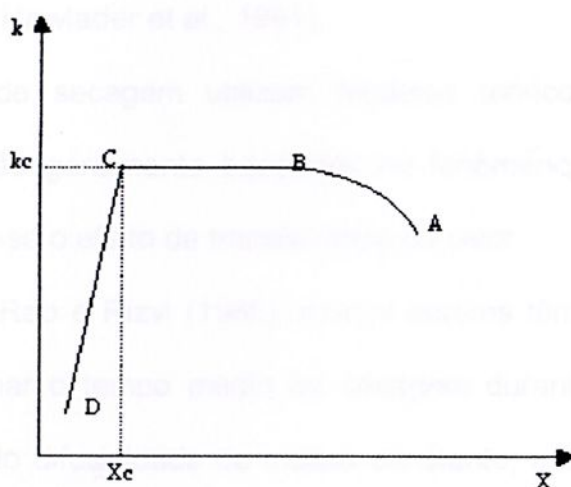


Figura 3.1: Curva típica de secagem.

No estudo da secagem, depois da obtenção das curvas e da caracterização dos períodos de secagem, é interessante descrever o processo matematicamente, de forma que as equações obtidas possam ser utilizadas no próprio estudo da cinética de secagem ou em projetos de secadores.

Muitos autores têm definido uma curva generalizada de secagem que inclui as regiões de taxa constante e taxa decrescente de secagem. Entretanto, nem todos os materiais seguem este padrão.

Um produto apresenta o período de taxa constante quando há um filme de água livremente disponível na superfície de secagem, sendo similar à evaporação da água de um reservatório. As regiões de taxa decrescente são indicativas de um aumento da resistência tanto para a transferência de calor quanto de massa, ocorrendo quando a superfície do alimento já não está totalmente molhada, tendo a umidade que percorrer o sólido até chegar à corrente de ar. Em alguns casos, poderá não ser observada uma continuidade na curva de secagem, pois mudanças na estrutura do produto - endurecimento e/ ou encolhimento - poderão interferir no processo de secagem (Hawladar et al., 1991).

Os processos de secagem utilizam modelos teóricos, semi-empíricos e empíricos, os quais são geralmente baseados no fenômeno de transferência de massa, negligenciando-se o efeito de transferência de calor.

De acordo com Rao e Rizvi (1986), muitos autores têm utilizado a segunda Lei de Fick para estimar o tempo médio de secagem durante o período de taxa decrescente. Assumindo difusividade de massa constante, a equação para difusão unidimensional é dada por:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{EF} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{C}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (3.20)$$

Onde C é a constante que assume valores de zero para geometria plana, 1 para geometria cilíndrica e 2 para esférica, X é a umidade em base seca, t é o tempo e D_{EF} é a difusividade efetiva de massa.



As condições iniciais de contorno geralmente utilizadas são:

$$X(r, 0) = X_0 \quad \text{para } t = 0$$

$$X(0, t) = X_E \quad \text{para } r = r_0 \text{ (na superfície)}$$

$$X(0, t) = \infty \quad \text{para } r = 0 \text{ (no centro)}$$

Assumindo distribuição uniforme da umidade inicial e ausência de resistências externas, as soluções analíticas da Equação 3.20 para as geometrias mais simples (Crank, 1975) são dadas na forma de séries infinitas:

1. Para placa plana infinita:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2}{4} \pi^2 \frac{D_{EF} t}{L^2} \right] \quad (3.21)$$

2. Para um cilindro infinito:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\gamma n^2} \exp \left[-\frac{\gamma n^2}{4} \frac{D_{EF} t}{L^2} \right] \quad (3.22)$$

3. Para uma esfera:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \pi^2}{9} \frac{D_{EF} t}{L^2} \right] \quad (3.23)$$

Onde L é a dimensão característica, X_{eq} é a umidade de equilíbrio em base seca, X_0 é a umidade inicial em base seca.



A maioria dos cereais (arroz, trigo, feijão, soja, entre outros) apresenta uma pequena mudança de volume durante a secagem. Desta maneira, a solução analítica pode ser aplicada satisfatoriamente no estudo destes materiais (Queiroz, 2003).

Alguns modelos semi-empíricos são baseados na teoria da difusão, assumindo que a resistência ocorre numa fina camada na superfície das partículas, como o modelo de Lewis, análogo à lei de resfriamento de Newton, que estabelece que a taxa de secagem seja proporcional ao teor de água livre, sendo normalmente utilizada na sua forma integrada (Queiroz, 2003):

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k_L t) \quad (3.24)$$

Onde k_L é o parâmetro de secagem de Lewis.

O modelo de Page (Eq. 3.25) é uma modificação do modelo de Lewis, sendo freqüentemente usado nos estudos de secagem de produtos agrícolas e alimentos, com excelentes resultados. A utilização de dois parâmetros faz com que sua aplicabilidade seja maior, levando a valores estimados mais próximos dos reais (Queiroz, 2003).

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k_P t^n) \quad (3.25)$$

Onde k_P e n são os parâmetros de secagem de Page.



A taxa de secagem para o modelo de Page é dada por:

$$\frac{dX}{dt} = (-k_p n t^{n-1})(X - X_{eq}) \quad (3.26)$$

3.1. Materiais

Diversos autores como Panchariya et al. (2002), Yaldiz et al. (2001) e Madamba et al. (1996) compararam diversos modelos de secagem, obtendo bons resultados para o modelo de Page.

Devido às poucas informações sobre as características físicas e a cinética de secagem da noz e amêndoa de macadâmia, e as propriedades físicas e isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia, elaborou-se o presente trabalho.

3.2. Caracterização Química

Foram utilizados os métodos descritos pela AOAC (1994) para determinação de lipídios, proteínas, cinzas e açúcares totais da amêndoa de macadâmia.

O teor de umidade foi corrigido para as amostras, contendo aproximadamente 75 gramas cada uma, no forno a 105°C durante 24 horas. Após esse período, as amostras foram resfriadas em dessecador e pesadas em balança

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Matéria Prima

As nozes de macadâmia, variedade Havaí, foram colhidas em plantações da região de São José do Rio Preto, estado de São Paulo, após terem atingido o grau de maturação. Foram descarpeladas, selecionadas e conduzidas ao laboratório para caracterização física e secagem. Após a secagem, as nozes de macadâmia foram quebradas e suas amêndoas utilizadas na determinação da composição química, propriedades físicas, isoterma de sorção e curvas de secagem. O experimento foi conduzido no laboratório do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos da UNESP, campus de São José do Rio Preto.

4.2. Composição Química

Foram utilizados os métodos descritos pela A.O.A.C. (1984) para determinação de lipídios, proteínas, cinzas e açúcares totais da amêndoa de macadâmia.

O teor de umidade foi obtido colocando-se as amostras, contendo aproximadamente 25 gramas cada uma, na estufa à 105°C durante 24 horas. Após esse período, as amostras foram resfriadas em dessecador e pesadas em balança



semi-analítica (precisão de 0,01 g) para determinação da umidade. Essa determinação foi realizada com 3 repetições.

Na determinação dos lipídios, utilizou-se o método de Bligh-Dyer (A.O.A.C., 1984).

A determinação da proteína foi realizada pelo método de Kjeldahal (A.O.A.C., 1984). O fator utilizado para obter-se a porcentagem de proteína na amostra foi de 6,25.

O teor de cinzas foi obtido por incineração em mufla à 550°C até peso constante.

A determinação dos açúcares totais foi realizada por titulação de oxiredução. Nesse método relativamente rápido, uma solução alcalina de Cu^{++} na forma de um complexo tartarato foi titulada com a solução de açúcar redutor, formando Cu_2O e o ácido do açúcar. O indicador oxi-redutor foi o azul de metileno e sua forma reduzida é incolor. Uma solução fervente foi usada para aumentar a velocidade da reação e prevenir a entrada de oxigênio (que pode reoxidar o azul de metileno) pela formação de corrente de vapor d'água.

4.3. Caracterização Física

Para a caracterização física das nozes e amêndoas de macadâmia, 500 (quinhentas) nozes de macadâmia foram, aleatoriamente, retiradas de uma amostra de 10 kg. Foram determinadas duas dimensões para cada uma das 500 nozes



(contendo 3% de umidade em base úmida) e suas respectivas amêndoas, utilizando-se um paquímetro com menor divisão igual a 0,05 mm.

Para a determinação do peso de cada amêndoa foi utilizada uma balança semi-analítica com precisão de 0,01g.

4.4. Propriedades Físicas

Para determinação das propriedades físicas da amêndoa de macadâmia foram utilizadas amostras com diferentes teores de umidade, obtidos durante o processo de secagem à 40°C. Após a secagem, as amostras de cada nível de umidade foram resfriadas em dessecadores e acondicionadas em sacos plásticos dentro de uma câmara climática (25°C e 40% de umidade relativa) durante 48 horas, com o objetivo de entrar em equilíbrio térmico com o ambiente para as posteriores determinações.

4.4.1. Densidades e Porosidade

Utilizou-se um picnômetro de dois cilindros de 0,2 m de diâmetro e 0,2 m de altura, interligados por um tubo contendo uma válvula, para a determinação da densidade aparente e da porosidade da amêndoa de macadâmia.



Para a porosidade da amêndoa de macadâmia, uma massa conhecida da amêndoa foi inserida no cilindro 1 e a válvula presente entre os dois cilindros foi fechada. Introduziu-se ar no cilindro 2 e determinou-se a pressão P_1 . Após a determinação de P_1 , abriu-se a válvula e realizou-se a leitura no manômetro com a válvula aberta, determinando-se a pressão P_2 .

De acordo com a lei dos gases perfeitos:

$$PV = MRT \quad (4.1)$$

Onde:

P: Pressão absoluta do cilindro;

V: Volume do cilindro;

M: Massa do ar;

R: Constante universal dos gases;

T: Temperatura absoluta;

Assumindo $R_1T_1 = R_2T_2 = RT$, temos:

$$M = M_1 + M_2 \quad (4.2)$$

$$\frac{PV}{RT} = \frac{P_1V_1}{RT} + \frac{P_2V_2}{RT} \quad (4.3)$$

Sabemos que:

$$\rho_{ap} = \frac{P_1}{RT} \quad (4.4)$$



e

$$\rho_r = \frac{P_2}{RT} \quad (4.5)$$

Portanto, a porosidade foi obtida com 10 repetições a partir de (Mohsenin, 1986):

$$V_1/V_2 = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \quad (4.6)$$

Onde:

V_2 : Volume do cilindro 2;

P_1 : Pressão absoluta antes de abrir válvula;

P_2 : Pressão absoluta após abrir válvula;

Para a determinação da densidade aparente, um dos cilindros do picnômetro, de volume igual a $0,006 \text{ m}^3$, foi preenchido com uma massa conhecida da amêndoa. A densidade aparente da amêndoa de macadâmia, ρ_a , foi determinada com 10 repetições, através da relação entre a massa, m , e o volume aparente, V_a , ocupado pela mesma massa de amêndoas de macadâmia, de acordo com a Equação 4.7.

$$\rho_a = \frac{m}{V_a} \quad (4.7)$$

Onde:

ρ_a : Densidade aparente;

m : Massa;

V_a : Volume aparente.



O volume aparente é a soma do volume ocupado pela massa de amêndoas de macadâmia e do volume do espaço intersticial.

As medidas foram realizadas no interior de uma câmara climática à 25°C.

A densidade real da amêndoa de macadâmia, ρ_r , foi determinada com 10 repetições, através dos valores experimentais da densidade aparente e da porosidade, nos respectivos teores de umidade, de acordo com a Equação 4.8.

$$\rho_r = \frac{\rho_a}{(1-E)} \quad (4.8)$$

Onde:

ρ_r : Densidade real;

ρ_a : Densidade aparente;

E: Porosidade.

4.4.2. Ângulo de Repouso

Para determinação do ângulo de repouso da amêndoa de macadâmia, utilizou-se uma caixa de madeira de 300 x 300 x 300 mm³ que possuía a parte frontal móvel. A caixa foi preenchida com as amêndoas de macadâmia e a parte frontal da caixa foi removida, deixando as amêndoas escoarem e assumirem um ângulo natural.

O ângulo de repouso foi calculado através da altura das amêndoas de macadâmia livres até a base da caixa de madeira, e da distância, na horizontal, entre o centro da superfície fixa e o final da base da caixa. Este método já foi utilizado por outros pesquisadores para diferentes tipos de grãos e sementes (Singh e Goswami, 1996; Gupta e Das, 1997; Baryeh, 2002; Olajide e Igbeka, 2003).

Essa determinação foi realizada com 5 repetições.

4.4.3. Velocidade Terminal

Para determinação da velocidade terminal da amêndoa de macadâmia, foi utilizado um equipamento construído no Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, UNESP.

O equipamento consiste de uma coluna de acrílico com, aproximadamente, 30 cm de diâmetro, permitindo a visualização do fenômeno. Nessa coluna foi injetado ar através de um ventilador, e a vazão de ar foi controlada através da velocidade do ventilador. A alimentação das amêndoas foi realizada através da parte superior da coluna.

Foi procurado o ponto de equilíbrio para as amostras de amêndoas de macadâmia que estavam submetidas ao fluxo de ar, regulando-se a velocidade do ventilador. O ponto de equilíbrio foi obtido no momento em que a amêndoa de macadâmia não foi mais arrastada pelo fluxo de ar. Cada amostra foi constituída de 20 gramas de amêndoa de macadâmia. No momento em que o equilíbrio foi

atingido, a velocidade do ar foi determinada através da leitura realizada por um anemômetro, marca Airflow, modelo LCA 6000.

Foram realizadas 10 repetições para cada determinação.

4.5. Propriedades Térmicas

4.5.1. Calor Específico

Na determinação do calor específico da amêndoa de macadâmia utilizou-se um calorímetro constituído de uma garrafa térmica de parede dupla no interior de um cilindro de PVC, com isolamento de lã de vidro e isopor, e base de madeira, conforme ilustrado na Figura 4.1.

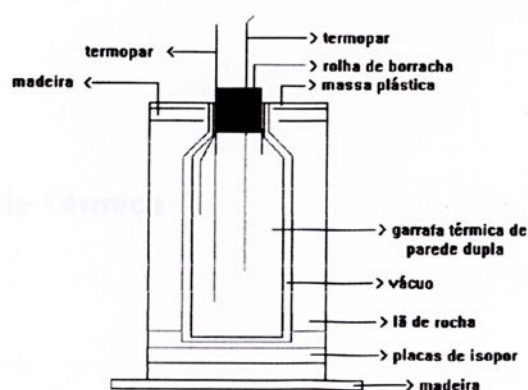


Figura 4.1: Esquema do calorímetro.

Antes de iniciar a determinação do calor específico da amêndoa de macadâmia, foi determinada a capacidade térmica do calorímetro, utilizando-se água destilada. A capacidade térmica foi determinada em duas fases, sendo que a primeira constituiu-se da adição de 200 ml de água destilada à 25°C e agitação manual do calorímetro até que se estabeleceu o equilíbrio térmico. A segunda fase constituiu-se da adição de mais 200 ml de água destilada à 5°C ao sistema, totalizando um volume de 400 ml. O calorímetro foi novamente agitado e a temperatura de equilíbrio foi determinada. A capacidade térmica do calorímetro foi calculada através da Equação 3.11.

A determinação do calor específico da amêndoa de macadâmia também foi realizada em duas fases. A primeira fase constituiu-se da introdução de 200 gramas da amostra à 25°C no calorímetro e em seguida a adição de 200 gramas de água à 5°C. O calorímetro foi agitado até obter-se o equilíbrio térmico entre o sistema e a amostra. As massas e as temperaturas da amostra e da água, antes e após o equilíbrio térmico, foram anotadas e utilizadas para a determinação do calor específico, de acordo com a Equação 3.11.

Esta determinação foi realizada com 10 repetições.

4.5.2. Difusividade Térmica

Foi construída uma célula para medir a difusividade térmica da amêndoa de macadâmia, baseada na metodologia proposta por Dickerson (1965), que consiste no uso de uma cápsula cilíndrica (15,08 cm de diâmetro interno e 61,8 cm de



comprimento) feita de latão cromado com duas tampas de nylon. A célula foi calibrada com glicerina.

A cápsula cilíndrica foi considerada de comprimento infinito e o fluxo de calor axial desprezível.

A cápsula foi preenchida com uma quantidade conhecida de amêndoa de macadâmia e tampada. Em seguida, o sistema foi imerso em um banho termostatzado com agitação e temperatura constantes. O banho foi aquecido a uma taxa constante de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. O aumento da temperatura da parede e do centro da amostra foi monitorado através de termopares, localizados no centro e na superfície do tubo, à mesma altura, e ligados a uma chave seletora polarizada, que foi ligada a um indicador de temperatura. As temperaturas interna e externa foram determinadas a cada 1 minuto.

A difusividade térmica da amêndoa de macadâmia foi obtida como descrito no item 3.3.2, através da Equação 3.14.

O equipamento está esquematizado na Figura 4.2.

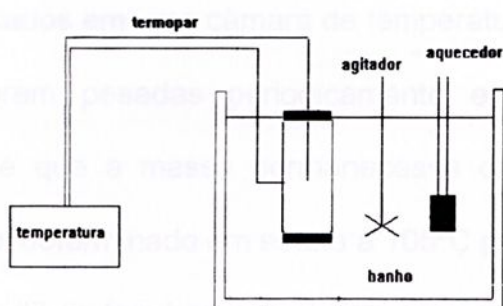


Figura 4.2: Esquema da célula utilizada para medir a difusividade térmica da amêndoa de macadâmia.

4.6. Isotermas de Sorção

As isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia foram determinadas empregando o método estático gravimétrico, seguindo um procedimento de dessorção, nas temperaturas de 20, 30, 40, 50 e 60°C.

Sete soluções salinas saturadas foram preparadas, promovendo no interior dos potes ambientes com diferentes teores de umidade relativa, correspondendo à faixa de atividade de água de 0,111 à 0,850 (Tabela 4.1). As soluções foram distribuídas em potes individuais com capacidade para apenas uma amostra. Cada pote possuía em seu interior um suporte de acrílico, sobre o qual foi colocado o recipiente contendo a amostra. Essa determinação foi realizada com 3 repetições.

As soluções salinas foram colocadas nos potes até uma altura de, aproximadamente, 1 cm a partir do fundo, sendo adicionadas três gotas de formol em cada pote, para evitar a deterioração das amostras. As amostras, de peso inicial conhecido, foram colocadas sobre os tripés, os potes foram fechados hermeticamente e colocados em uma câmara de temperatura controlada.

As amostras foram pesadas periodicamente em balança semi-analítica (precisão de 0,01g) até que a massa permanecesse constante. O conteúdo de umidade de equilíbrio foi determinado em estufa à 105°C por 24 horas.

A umidade de equilíbrio (em base seca) foi calculada da seguinte forma:

$$X_{eq} = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (4.9)$$



Onde:

X_{eq}: Umidade de equilíbrio em base seca;

m_{eq}: Massa da amostra quando é atingido o equilíbrio;

m_s: Massa seca da amostra.

Tabela 4.1: Umidade relativa das soluções salinas em função da temperatura.

Solução salina	Temperatura (°C)				
	20	30	40	50	60
LiCl	0,114	0,113	0,112	0,111	0,110
MgCl ₂ 6H ₂ O	0,330	0,324	0,318	0,312	0,306
Mg(NO ₃) ₂	0,543	0,514	0,485	0,456	0,427
KI	0,693	0,677	0,661	0,645	0,631
NaNO ₃	0,750	0,730	0,710	0,690	0,673
NaCl	0,752	0,750	0,748	0,746	0,744
KCl	0,850	0,834	0,818	0,802	0,786

Fonte: Greenspan, 1977.

4.7. Curvas de Secagem

As amostras de macadâmia foram conduzidas ao secador de leito fixo existente no laboratório do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos/ UNESP após terem sido preparadas conforme descrito no item 4.1. O esquema do secador de leito fixo é apresentado na Figura 4.3.

As amostras foram pesadas e colocadas em uma bandeja (monocamada com aproximadamente 100 gramas de amostra). A bandeja foi projetada de forma que a passagem de massa do secador para a passagem fosse rápida. Para a passagem, foi

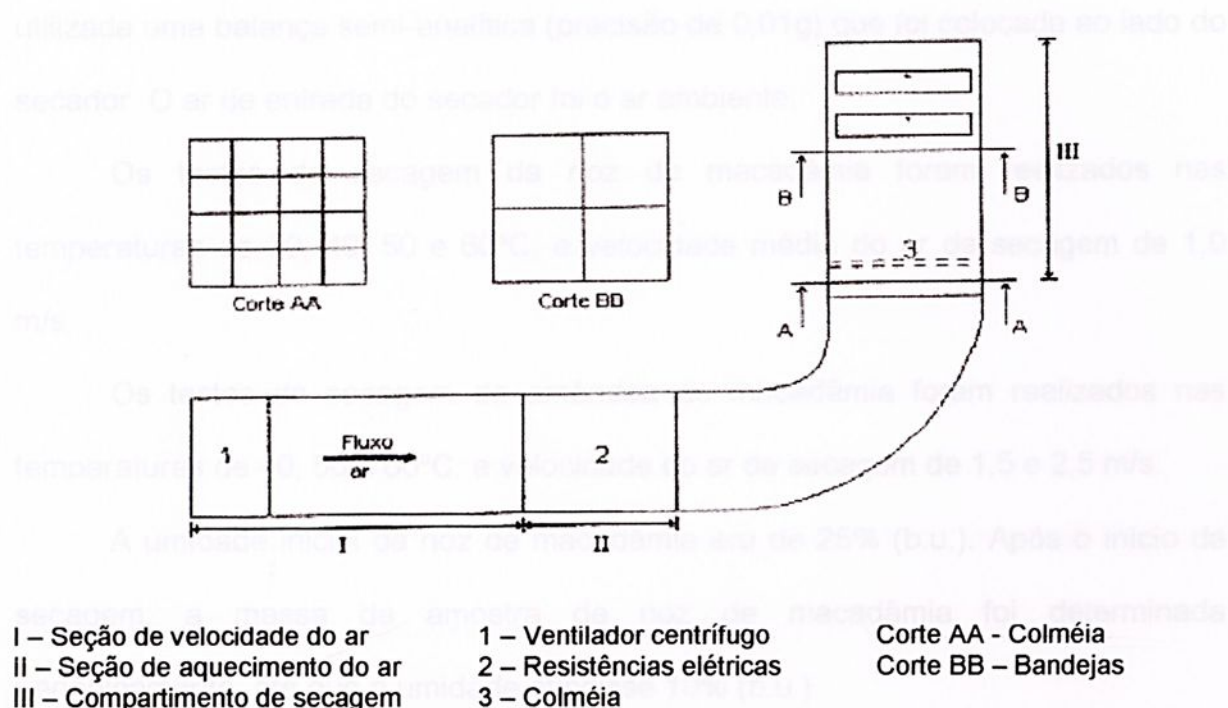


Figura 4.3: Esquema do secador (vista lateral).

No secador, o ar foi forçado por meio de um ventilador axial, sendo a vazão controlada por um variador de tensão que permitiu um ajuste da mesma. A velocidade do ar foi medida por um anemômetro de hélice localizado no compartimento de secagem. Um conjunto de resistências elétricas foi utilizado para o aquecimento, sendo a potência controlada por um variador de tensão que permitiu o ajuste da temperatura. A temperatura do ar foi determinada por um termopar localizado logo após a seção de aquecimento do ar. A conexão entre as seções de movimentação e aquecimento do ar com a câmara de secagem foi feita por uma curva em ângulo de 90° , fazendo com que o ar escoasse perpendicularmente às bandejas de tela de arame galvanizado que suportam o produto.

As amostras foram pesadas e colocadas em uma bandeja (monocamada com aproximadamente 400 gramas de amostra). A bandeja foi projetada de forma que a remoção da mesma do secador para a pesagem fosse rápida. Para a pesagem, foi

utilizada uma balança semi-analítica (precisão de 0,01g) que foi colocada ao lado do secador. O ar de entrada do secador foi o ar ambiente.

Os testes de secagem da noz de macadâmia foram realizados nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C, e velocidade média do ar de secagem de 1,0 m/s.

Os testes de secagem da amêndoa de macadâmia foram realizados nas temperaturas de 40, 50 e 60°C, e velocidade do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.

A umidade inicial da noz de macadâmia era de 25% (b.u.). Após o início da secagem, a massa da amostra de noz de macadâmia foi determinada periodicamente, até que a umidade atingisse 10% (b.u.).

Após o início da secagem da amêndoa de macadâmia, a massa da amostra foi determinada periodicamente até a umidade atingir 2% (b.u.).

A umidade de equilíbrio das amostras de nozes de macadâmia foi determinada deixando-se as mesmas na estufa com circulação de ar forçada até peso permanecer constante, à mesma temperatura do ar de secagem. A umidade de equilíbrio das amostras de amêndoa de macadâmia foi obtida a partir das isotermas de sorção das mesmas.



5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Composição Química

Na Tabela 5.1 é apresentada a composição química média da amêndoa de macadâmia. Os valores obtidos experimentalmente estão de acordo com a literatura (Tabela 3.2).

Tabela 5.1: Composição química média da amêndoa de macadâmia.

(g/100g)	Base úmida	Base seca
Umidade	3,39	3,51
Cinzas	1,56	1,61
Lipídios	70,03	72,49
Proteína	8,25	8,56
Açúcares totais	3,07	3,18

5.2. Caracterização Física

A distribuição do tamanho das nozes de macadâmia é apresentada na Tabela 5.2. Verificou-se que 21% das nozes apresentaram dimensão 1 superior a 28,3mm, 66% das nozes apresentaram dimensão 1 entre 22,9mm e 28,3mm, e 13%, dimensão 1 inferior a 22,9mm. As amêndoas das nozes grandes, médias e pequenas apresentaram dimensão 1 média de 15,9mm, 13,7mm e 11,6mm, dimensão 2 média de 19,7mm, 17,2mm e 14,6mm, e peso médio de 2,76g, 1,95g e

1,35g, respectivamente. A classificação em grande, média e pequena foi de acordo com a tabela proposta por Camargo (1992).

Tabela 5.2: Distribuição de tamanho da noz de macadâmia à 3% de umidade (b.u.).

Categoria de Tamanho das Nozes			
	Grande	Média	Pequena
Dimensão 1 (mm)	> 28,3	22,9 - 28,3	< 22,9
Em número (%)	21	66	13
Média das Dimensões das Amêndoas			
Dimensão 1 (mm)	15,9 ± 0,1	13,7 ± 0,06	11,6 ± 0,06
Dimensão 2 (mm)	19,7 ± 0,13	17,2 ± 0,08	14,6 ± 0,07
Peso (g)	2,76 ± 0,49	1,95 ± 0,21	1,35 ± 0,10

5.3. Propriedades Físicas

5.3.1. Densidade Aparente e Real

A variação da densidade aparente da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade (b.s.) é apresentada na Figura 5.1. A relação entre a densidade aparente e o teor de umidade pode ser escrita matematicamente de acordo com a Equação 5.1, cujo coeficiente de determinação (R^2) foi superior a 99%.

$$\rho_{ap} = 448,04 + 11,05M \quad (5.1)$$

Onde:

ρ_a : Densidade aparente, kg/m^3 ;

M: Teor de umidade, % em base seca.

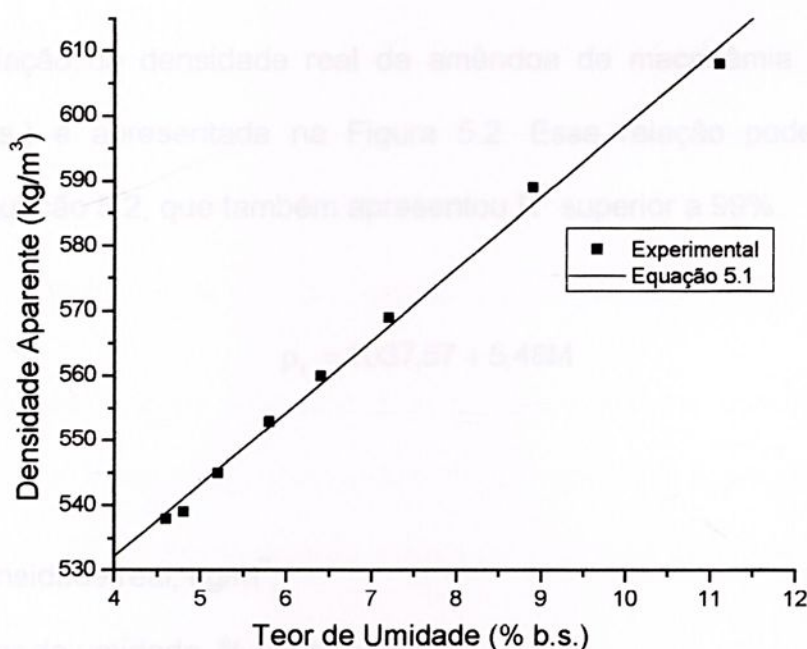


Figura 5.1: Densidade aparente da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.

A densidade aparente da amêndoa de macadâmia diminuiu linearmente com o decréscimo do teor de umidade. Esse comportamento pode ser atribuído à pequena variação do volume comparado ao decréscimo da massa da amêndoa de macadâmia, resultado do processo de secagem.

Balasubramanian (2001) verificou que a densidade aparente da castanha de caju decresce linearmente com o aumento do teor de umidade (b.s.). Resultados similares foram encontrados para a semente de girassol (Gupta & Das, 1997), e para a soja (Deshpande et al. 1993). A diferença entre os resultados encontrados para a

amêndoa de macadâmia e para a castanha de caju, semente de girassol e soja pode ser atribuída à estrutura celular, às características de aumento de volume e massa dos grãos, sementes e amêndoas, com o aumento do teor de umidade, e à composição química desses materiais biológicos, sendo que os mesmos podem possuir quantidades diferentes de óleos que, por sua vez, podem possuir densidades distintas e influenciar decisivamente na densidade aparente.

A variação da densidade real da amêndoa de macadâmia com o teor de umidade (b.s.) é apresentada na Figura 5.2. Essa relação pode ser expressa conforme Equação 5.2, que também apresentou R^2 superior a 99%.

$$\rho_r = 1037,57 + 5,48M \quad (5.2)$$

Onde:

ρ_r : Densidade real, kg/m^3 ;

M: Teor de umidade, % em base seca.

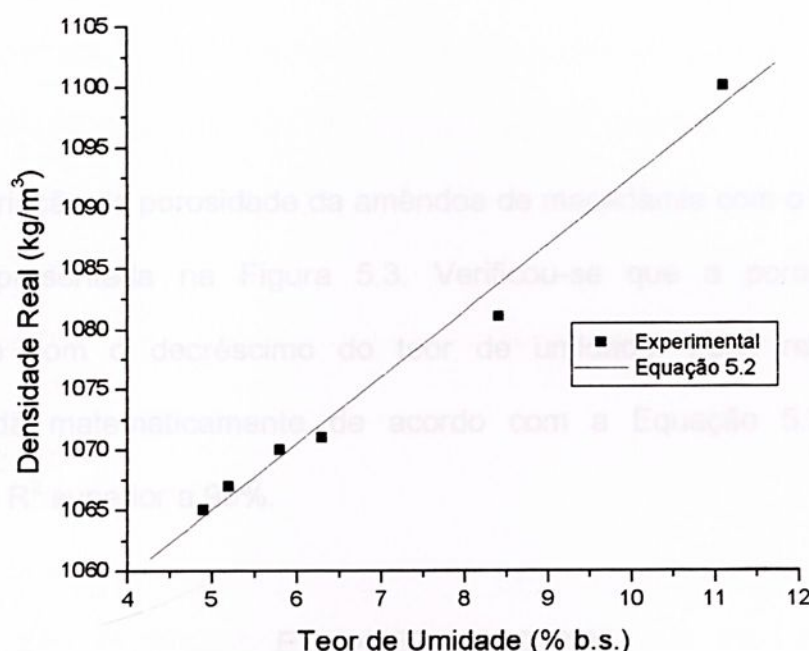


Figura 5.2: Densidade real da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.

A densidade real da amêndoa de macadâmia diminuiu com o decréscimo do teor de umidade. Esse comportamento pode ser atribuído à pequena variação do volume comparado ao decréscimo da massa da amêndoa de macadâmia, resultado do processo de secagem.

Este resultado é similar aos obtidos para a castanha de caju (Balasubramanian, 2001) e para a semente de girassol (Gupta e Das, 1997). Porém, a densidade real da soja diminui linearmente com o aumento do teor de umidade (Deshpande et al., 1993). Essa diferença, assim como na densidade aparente, também pode ser atribuída à estrutura celular e às características de aumento de volume e massa dos grãos e amêndoas, com o aumento do teor de umidade, e à composição química desses materiais biológicos, sendo que os mesmos podem possuir quantidades diferentes de óleos que, por sua vez, podem possuir densidades distintas e influenciar decisivamente na densidade real.

Resultados similares foram encontrados para a castanha de caju (Balasubramanian, 2001) e para a semente de girassol (Gupta e Das, 1997). Porém, a porosidade da soja diminuiu linearmente com o aumento do teor de umidade (Deshpande et al., 1993).

5.3.3. Ângulo de Repouso

O ângulo de repouso da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade é apresentado na Figura 5.4. A relação entre o ângulo de repouso e o teor de umidade pode ser escrita matematicamente de acordo com a Equação 5.4, que apresentou R^2 superior a 99%.

$$\theta = 33,725 + 3,467M - 0,158M^2 \quad (5.4)$$

Onde:

θ : Ângulo de repouso, em graus;

M: Teor de umidade, % em base seca.

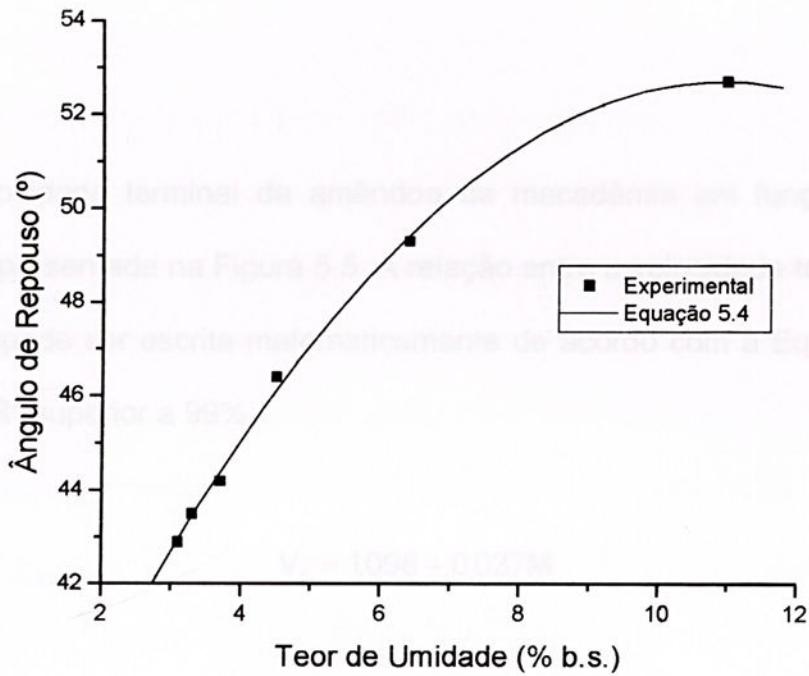


Figura 5.4: Ângulo de repouso da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.

O ângulo de repouso da amêndoa de macadâmia aumentou com o aumento do teor de umidade. Esse comportamento do ângulo de repouso com o teor de umidade é devido ao efeito da tensão superficial que se torna predominante para manter as amêndoas agregadas.

Gupta e Das (1997) obtiveram resultado similar para a semente de girassol, sendo que o ângulo de repouso deste produto aumentou linearmente com o aumento do teor de umidade.

5.3.4. Velocidade Terminal

A velocidade terminal da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade é apresentada na Figura 5.5. A relação entre a velocidade terminal e o teor de umidade pode ser escrita matematicamente de acordo com a Equação 5.5, que apresentou R^2 superior a 99%.

$$V_t = 1,098 + 0,037M \quad (5.5)$$

Onde:

V_t : Velocidade terminal, m/s;

M : Teor de umidade, % em base seca;

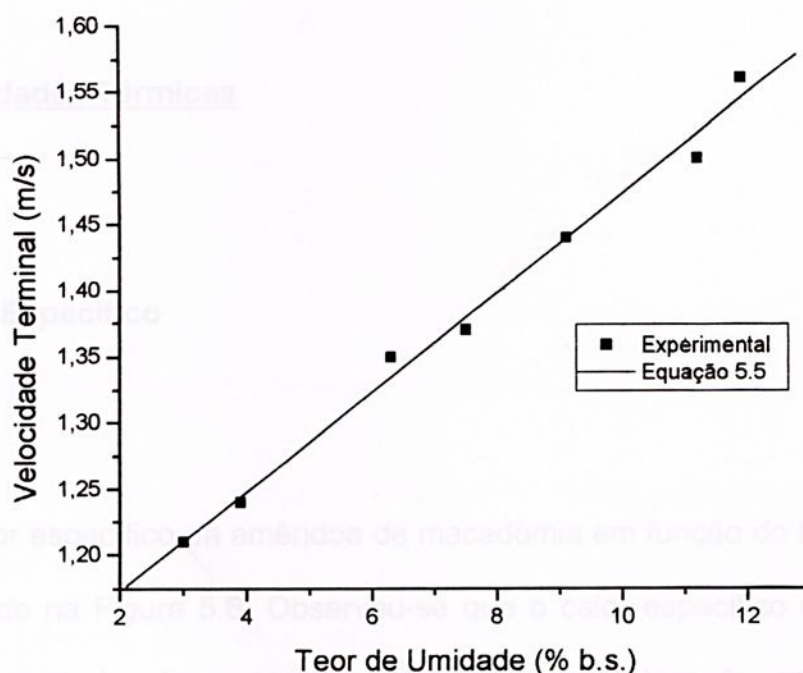


Figura 5.5: Velocidade terminal da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.

A velocidade terminal aumentou linearmente com o aumento do teor de umidade. Resultados semelhantes foram obtidos por Joshi et al. (1993) para a semente de abóbora e Gupta e Das (1997) para a semente de girassol. Vasconcelos (1998) determinou experimentalmente a velocidade terminal da canola e comparou com a velocidade terminal teórica, verificando que a velocidade terminal teórica foi maior que a velocidade terminal experimental. Segundo o mesmo autor, esse resultado pode ser explicado, em parte, pelo fato de que, para o cálculo da velocidade terminal teórica, os grãos foram considerados uma esfera, com a utilização de seu diâmetro equivalente, o que implicaria em uma rotação dos grãos em torno de si mesmo, com possíveis desvios para a velocidade terminal experimental. Outro fator apontado pelo autor foi a determinação da velocidade terminal experimental com grande quantidade de grãos, enquanto que a velocidade terminal teórica foi determinada com base na medida do grão individualmente.

5.4. Propriedades Térmicas

5.4.1. Calor Específico

Figura 5.6: Calor específico da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.

O calor específico da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade é apresentado na Figura 5.6. Observou-se que o calor específico da amêndoa de macadâmia aumentou linearmente com o aumento do teor de umidade de 1,3 à 11,4% em base seca. A relação entre o calor específico da amêndoa de macadâmia

e o teor de umidade (b.s.) pode ser representada pela Equação 5.6, cujo coeficiente de determinação (R^2) foi superior a 99%:

$$cp = 1,29423 + 0,03889M \tag{5.6}$$

Onde:

cp: Calor específico da amêndoa de macadâmia, kJ/ kgK;

M: Teor de umidade, % em base seca.

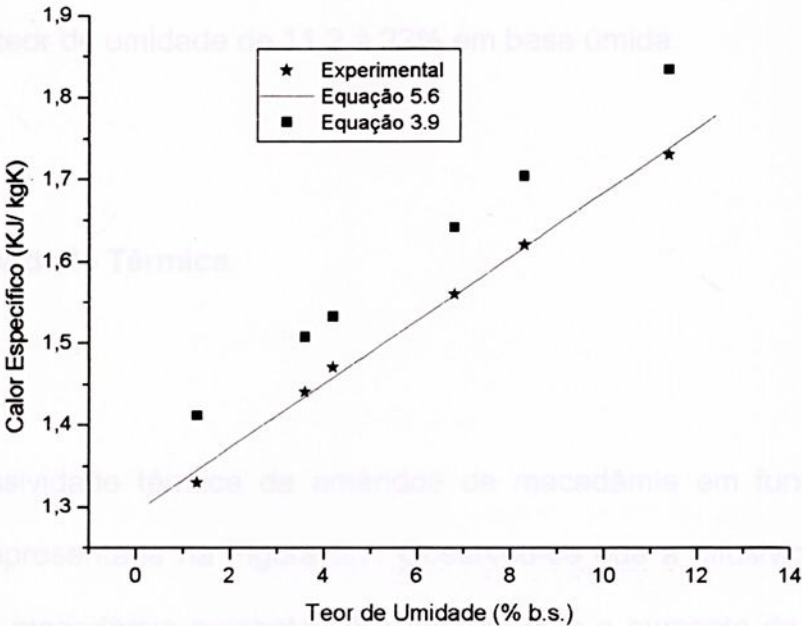


Figura 5.6: Calor específico da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.

Comparando os valores do calor específico obtido experimentalmente com os valores obtidos a partir da Equação 3.9, observou-se que os valores obtidos a partir da Equação 3.9 foram maiores do que os valores obtidos experimentalmente. Essa diferença pode ser devido à alguns erros que tenham ocorrido durante a fase experimental, tais como: a agitação, levando em consideração a energia dissipada

durante a agitação, e a troca de calor calorímetro-ambiente durante o tempo necessário para atingir o equilíbrio.

Resultados semelhantes foram obtidos por Subramanian e Viswanathan (2003), Aviara e Haque (2001), e Nidal e Abu-Hamdeh (2003).

Omobuwajo et al. (2003) determinaram o calor específico da noz moscada à 80°C e obtiveram o valor de 1,85 kJ/ kg K. Chandrasekar e Viswanathan (1999) verificaram que o calor específico do café arábica e do café robusta aumentaram de 1,04 à 2,36 kJ/ kg K e de 0,78 à 2,18 kJ/ kg K, respectivamente, com o aumento do teor de umidade de 9,9 à 30,6% em base úmida. Morita e Paul Singh (1979) verificaram que o calor específico do arroz aumentou de 1,68 à 2,01 kJ/ kg K com o aumento do teor de umidade de 11,2 à 22% em base úmida.

5.4.2. Difusividade Térmica

A difusividade térmica da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade é apresentada na Figura 5.7. Observou-se que a difusividade térmica da amêndoa de macadâmia aumentou linearmente com o aumento de 2 à 8,6% (b.s.) do teor de umidade. A relação entre a difusividade térmica da amêndoa de macadâmia e o teor de umidade (b.s.) pode ser representada pela Equação 5.7, que também apresentou coeficiente de determinação superior a 99%:



$$\alpha = 0,18864 + 0,05473M$$

(5.7)

Onde:

α : Difusividade térmica, $\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$;

M: Teor de umidade, % base seca;

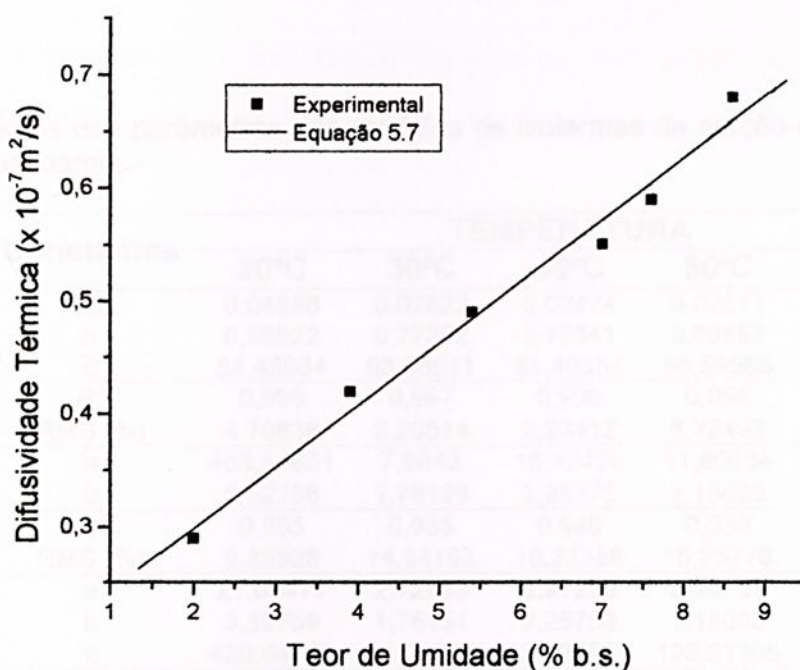


Figura 5.7: Difusividade térmica da amêndoa de macadâmia em função do teor de umidade.

Resultados semelhantes foram obtidos por Aviara e Haque (2001). Chandrasekar e Viswanathan (1999) verificaram que a difusividade térmica do café arábica e robusta decresce com o aumento do teor de umidade. Os autores também verificaram que os valores da difusividade térmica são menores para o café robusta.

5.5. Isotermas de Sorção

As isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia foram ajustadas para os modelos descritos no item 3.4.3. Na Tabela 5.3 são apresentados os valores dos parâmetros calculados para os ajustes, o coeficiente de determinação (R^2) e as raízes das médias dos quadrados dos desvios (RMS).

Tabela 5.3: Valores dos parâmetros dos modelos de isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia.

MODELO	Constantes	TEMPERATURA				
		20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
GAB	X_m	0,04886	0,02822	0,02474	0,02311	0,02055
	K	0,56622	0,77252	0,79641	0,80853	0,85188
	C	54,46084	63,96011	61,40557	56,59088	60,77283
	R^2	0,999	0,997	0,998	0,996	0,991
	RMS (%)	4,70838	3,29514	2,93412	8,72493	4,19723
Henderson	a	463,54851	7,6643	16,12456	11,80634	3,17734
	b	3,52758	1,78199	2,25775	2,15028	1,79191
	R^2	0,955	0,935	0,949	0,950	0,957
	RMS (%)	5,85528	14,34103	10,22358	10,25776	12,86764
Henderson Modificada	a	21,05477	2,72533	3,97235	3,40757	1,77057
	b	3,52769	1,78151	2,25763	2,15023	1,79191
	c	420,44709	54,24647	122,31211	123,21305	47,67192
	R^2	0,955	0,935	0,949	0,950	0,957
	RMS (%)	5,85505	14,34681	10,22437	10,25815	12,86765
Chung Pfof	a	9,02457	7,0262	8,2239	8,50479	8,25151
	b	53,16744	50,94829	49,16653	52,25782	44,38889
	c	-19,60055	-28,61418	-38,8685	-48,70015	-58,297
	R^2	0,988	0,945	0,969	0,967	0,960
	RMS (%)	3,03413	11,70449	7,58525	7,81862	11,45339

O modelo que apresentou o melhor ajuste foi o de GAB, que, em geral, fornece bons ajustes para alimentos.

Ajustando as isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia para os modelos matemáticos descritos no item 3.4.3, obteve-se R^2 e RMS para cada um desses modelos. A escolha do modelo mais adequado para o cálculo da umidade de

equilíbrio baseou-se no valor do coeficiente de determinação (R^2) e no valor das raízes das médias dos quadrados dos desvios (RMS).

Segundo esta análise, verificou-se que o modelo de GAB foi o que apresentou melhor ajuste às isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia, obtendo-se R^2 acima de 99% e valores de RMS inferior à 25%, valor apontado por Lewicki (2000) como limite máximo para a aceitação de um modelo no ajuste dos dados experimentais de isotermas de sorção de diversos produtos. Os valores experimentais e os previstos pelo modelo de GAB para as temperaturas de 20, 30, 40, 50 e 60°C são apresentados na Figuras 5.8.

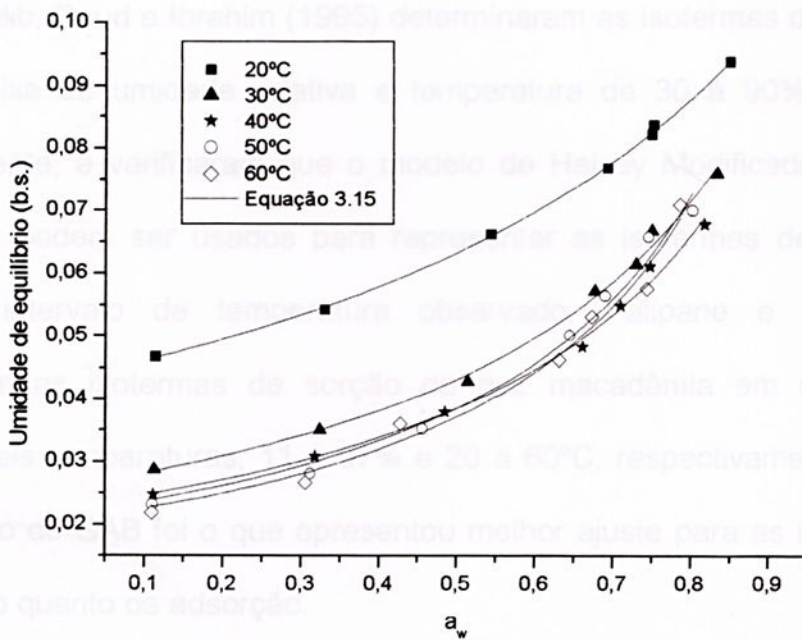


Figura 5.8: Isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia à 20, 30, 40, 50 e 60°C.

Observou-se a diminuição da umidade de equilíbrio da amêndoa de macadâmia com o aumento da temperatura, até atividade de água em torno de 0,7. Após esse valor de atividade de água, verificou-se que essa tendência se inverte

para as temperaturas de 40, 50 e 60°C, e permanece para as temperaturas de 20 e 30°C.

As isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia apresentaram curvas sigmoidais e podem ser classificadas como tipo II, de acordo com Brunauer et al. (1940). Esse comportamento é típico de materiais biológicos.

Park, Bin e Brod (2001) determinaram as isotermas de sorção para a pêra Bartlett (*Pyrus sp.*) com e sem desidratação osmótica, verificando que os modelos de Henderson, Peleg, Oswin e GAB apresentaram melhores ajustes às isotermas, tanto para pêra *in natura* quanto para a pêra desidratada. Park, Yado e Brod (2000) determinaram as isotermas de sorção para a pêra *in natura* nas temperaturas de 40, 60 e 70°C, e verificaram que o modelo que apresentou o melhor ajuste também foi o de Peleg. Talib, Daud e Ibrahim (1995) determinaram as isotermas de dessorção do cacau na faixa de umidade relativa e temperatura de 30 à 90% e 20 à 70°C, respectivamente, e verificaram que o modelo de Halsey Modificado, Henderson e Chung Pfost podem ser usados para representar as isotermas de dessorção do cacau, no intervalo de temperatura observado. Palipane e Driscoll (1992) determinaram as isotermas de sorção da noz macadâmia em nove umidades relativas e seis temperaturas, 11 à 97% e 20 à 60°C, respectivamente, verificando que o modelo de GAB foi o que apresentou melhor ajuste para as isotermas, tanto de dessorção quanto de adsorção.



Figura 5.9: Comportamento da secagem da noz de macadâmia utilizando secador de ar forçado e velocidade do ar de secagem de 1.0 m/s, em diferentes temperaturas.

5.6. Cinética de Secagem

A partir dos dados obtidos experimentalmente, foram construídas as curvas de secagem da noz e da amêndoa de macadâmia em secador de leito fixo nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C e velocidade do ar de secagem igual a 1,0 m/s, e nas temperaturas de 40, 50 e 60°C e velocidades do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s, respectivamente.

A Figura 5.9 apresenta a umidade adimensional em função do tempo durante a secagem da noz de macadâmia em secador de leito fixo, em diferentes temperaturas e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s. Observa-se que, para um mesmo tempo de permanência do material no secador, o aumento da temperatura conduziu a uma redução da razão de umidade, sendo assim, um indicativo do aumento do potencial de secagem em função da temperatura.

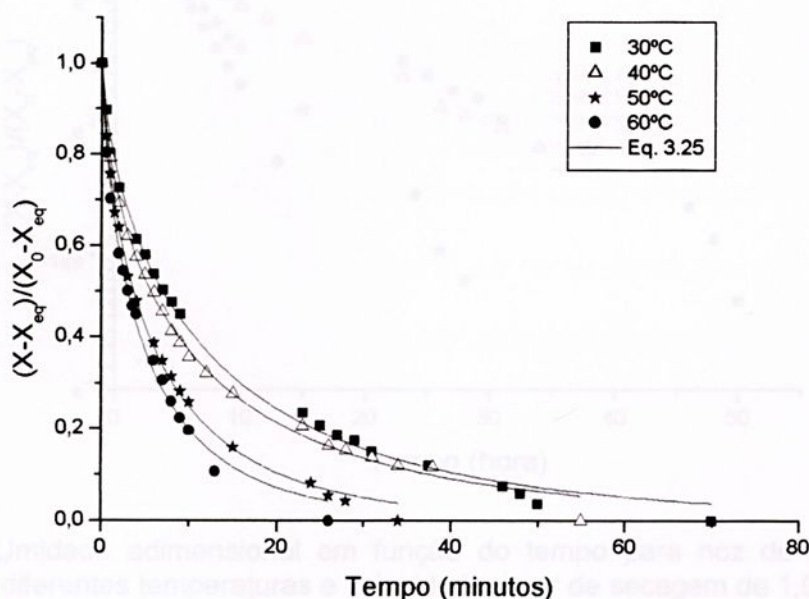


Figura 5.9: Comportamento da secagem da noz de macadâmia utilizando secador de leito fixo e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s, em diferentes temperaturas.

Inicialmente, foi testado o modelo de Fick (Eq. 3.23) para a descrição da cinética de secagem da noz de macadâmia. Entretanto, como mostra a Figura 5.10, a relação entre a umidade adimensional e o tempo em coordenadas semi-logarítmicas é não linear, indicando que a difusividade aparente da água no interior do produto não é constante ao longo de todo o processo.

Optou-se, então, pelo emprego do modelo de Page (Eq. 3.25) que, com dois parâmetros, procura justamente compensar a variação da constante de velocidade de secagem ao longo do processo. Os parâmetros do modelo foram calculados por regressão não-linear, utilizando o programa Origin 3.5, e os resultados são apresentados na Tabela 5.4. Na avaliação da qualidade dos ajustes foram considerados os coeficientes de determinação (R^2).

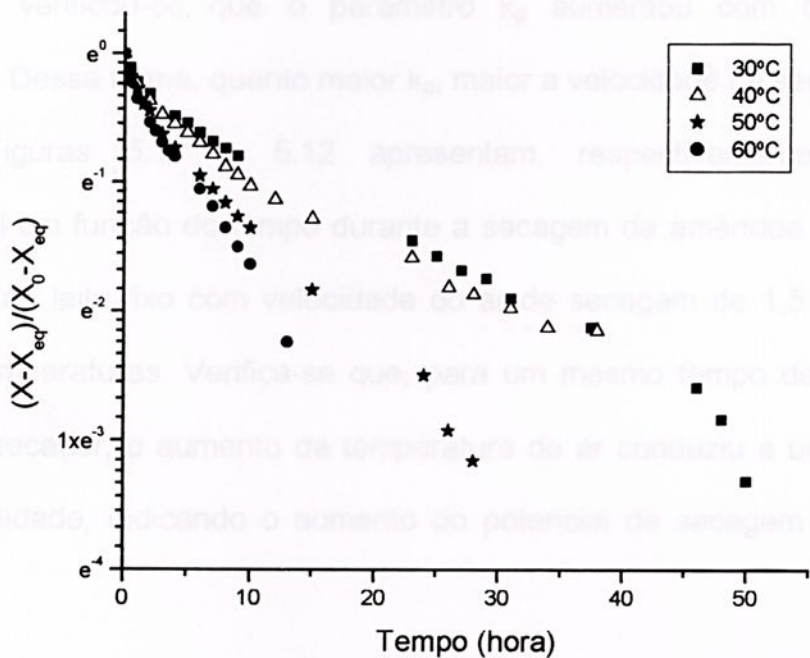


Figura 5.10: Umidade adimensional em função do tempo para noz de macadâmia em diferentes temperaturas e velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.

Tabela 5.4: Parâmetros do modelo de Page (Eq. 3.25) para noz de macadâmia.

Temperatura	k_p	n	R^2
30°C	0,18645	0,67505	0,997
40°C	0,23255	0,63131	0,996
50°C	0,27998	0,69653	0,997
60°C	0,32052	0,70146	0,994

Analizando a coluna R^2 na Tabela 5.4, observa-se que os valores são próximos de 1. Portanto, podemos dizer que o modelo de Page pode ser utilizado para descrever o processo de secagem da noz de macadâmia. Resultado semelhante foi obtido por Sasserón (1984) na secagem de amêndoas de cacau em camadas finas.

Segundo Cronin e Kearney (1998), embora k_p e n não tenham um significado físico direto, pode-se afirmar que o parâmetro k_p está ligado à inclinação média da curva de secagem, enquanto n reflete o grau de não linearidade da mesma. Na Tabela 5.4, verificou-se que o parâmetro k_p aumentou com o aumento da temperatura. Dessa forma, quanto maior k_p , maior a velocidade de secagem.

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam, respectivamente, a umidade adimensional em função do tempo durante a secagem da amêndoa de macadâmia em secador de leito fixo com velocidade do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s, em diferentes temperaturas. Verifica-se que, para um mesmo tempo de residência do material no secador, o aumento da temperatura do ar conduziu a uma redução da razão de umidade, indicando o aumento do potencial de secagem em função da temperatura.

Figura 5.12: Comportamento da secagem de amêndoas de macadâmia durante secagem de leito fixo a velocidade do ar de secagem de 2,5 m/s em diferentes temperaturas

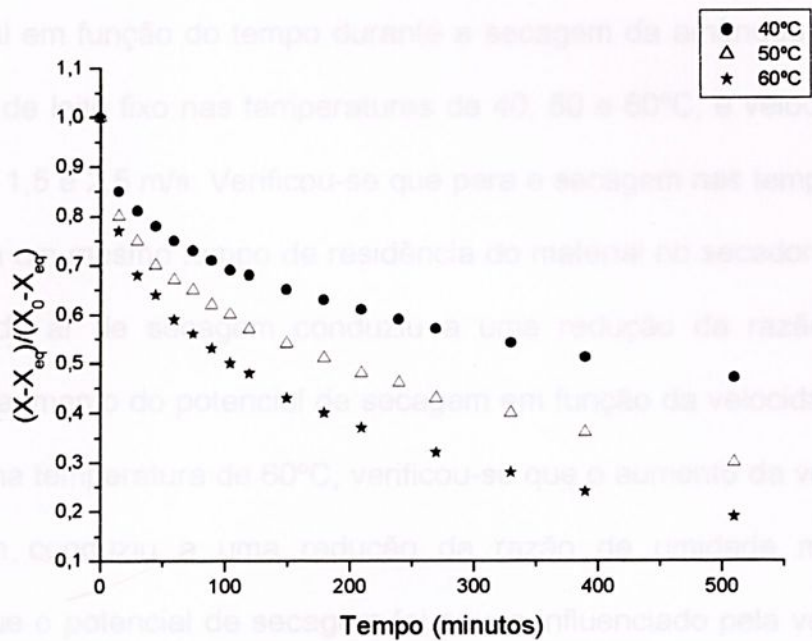


Figura 5.11: Comportamento da secagem da amêndoa de macadâmia utilizando secador de leito fixo e velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s, em diferentes temperaturas.

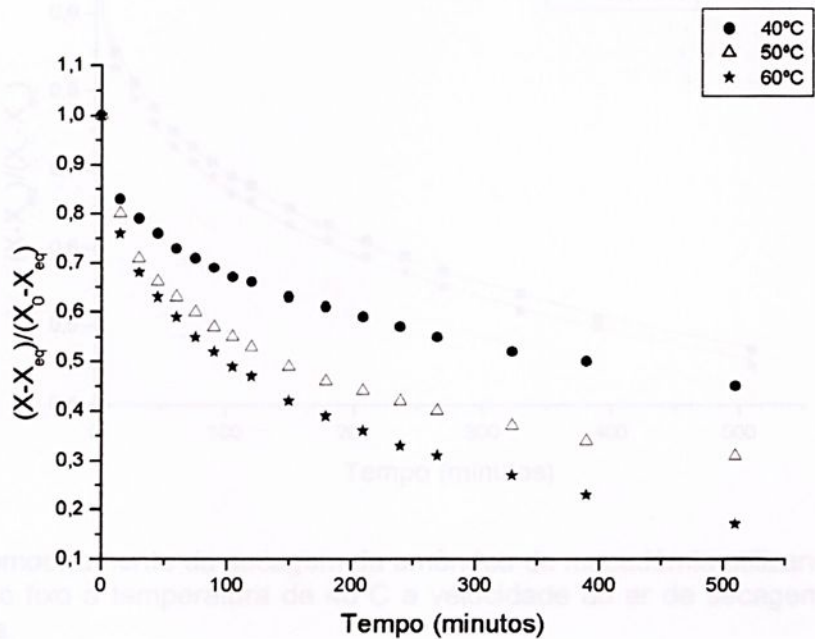


Figura 5.12: Comportamento da secagem da amêndoa de macadâmia utilizando secador de leito fixo e velocidade do ar de secagem de 2,5 m/s, em diferentes temperaturas.

As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 apresentam, respectivamente, a umidade adimensional em função do tempo durante a secagem da amêndoa de macadâmia em secador de leito fixo nas temperaturas de 40, 50 e 60°C, e velocidade do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s. Verificou-se que para a secagem nas temperaturas de 40 e 50°C, para um mesmo tempo de residência do material no secador, o aumento da velocidade do ar de secagem conduziu a uma redução da razão de umidade, indicando o aumento do potencial de secagem em função da velocidade do ar. Para a secagem na temperatura de 60°C, verificou-se que o aumento da velocidade do ar de secagem conduziu a uma redução da razão de umidade muito pequena, indicando que o potencial de secagem foi pouco influenciado pela velocidade do ar de secagem.

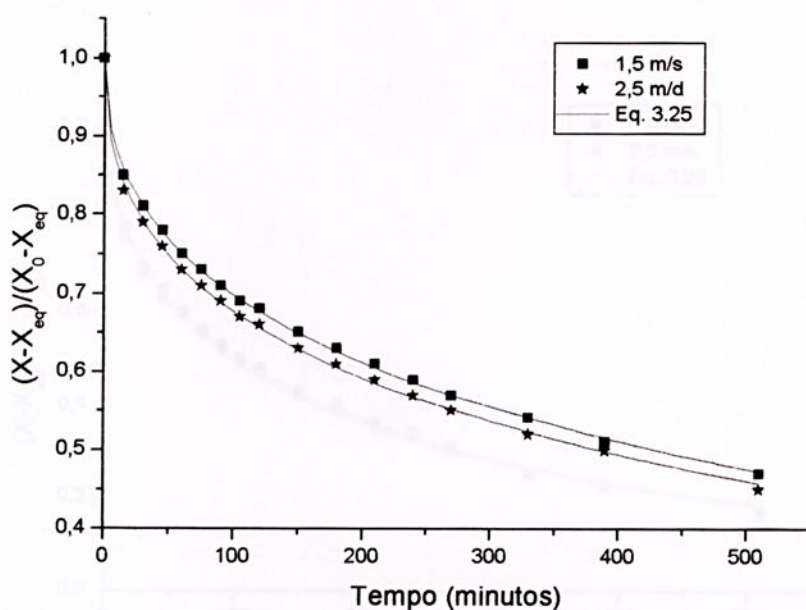


Figura 5.13: Comportamento da secagem da amêndoa de macadâmia utilizando secador de leito fixo à temperatura de 40°C e velocidade do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.

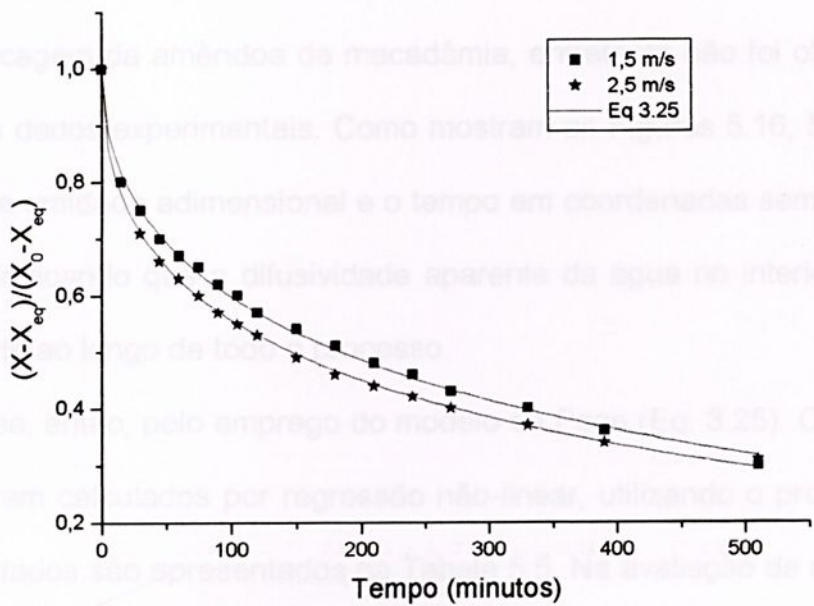


Figura 5.14: Comportamento da secagem da amêndoa de macadâmia utilizando secador de leito fixo à temperatura de 50°C e velocidade do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.

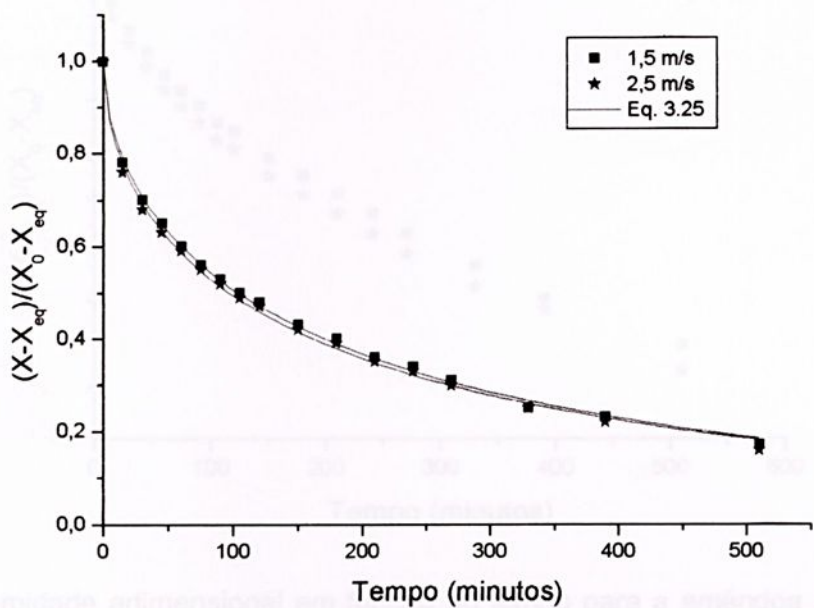


Figura 5.15: Comportamento de secagem da amêndoa de macadâmia utilizando secador de leito fixo à temperatura de 60°C e velocidade do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.

Inicialmente, foi testado o modelo de Fick (Eq. 3.23) para a descrição da cinética de secagem da amêndoa de macadâmia, entretanto não foi obtido um bom ajuste para os dados experimentais. Como mostram as Figuras 5.16, 5.17 e 5.18, a relação entre a umidade adimensional e o tempo em coordenadas semi-logarítmicas é não linear, indicando que a difusividade aparente da água no interior do produto não é constante ao longo de todo o processo.

Optou-se, então, pelo emprego do modelo de Page (Eq. 3.25). Os parâmetros do modelo foram calculados por regressão não-linear, utilizando o programa Origin 3.5, e os resultados são apresentados na Tabela 5.5. Na avaliação da qualidade dos ajustes foram considerados os coeficientes de determinação (R^2).

Figura 5.17: Umidade adimensional em função do tempo para a amêndoa de macadâmia na temperatura de 50°C e velocidades do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s

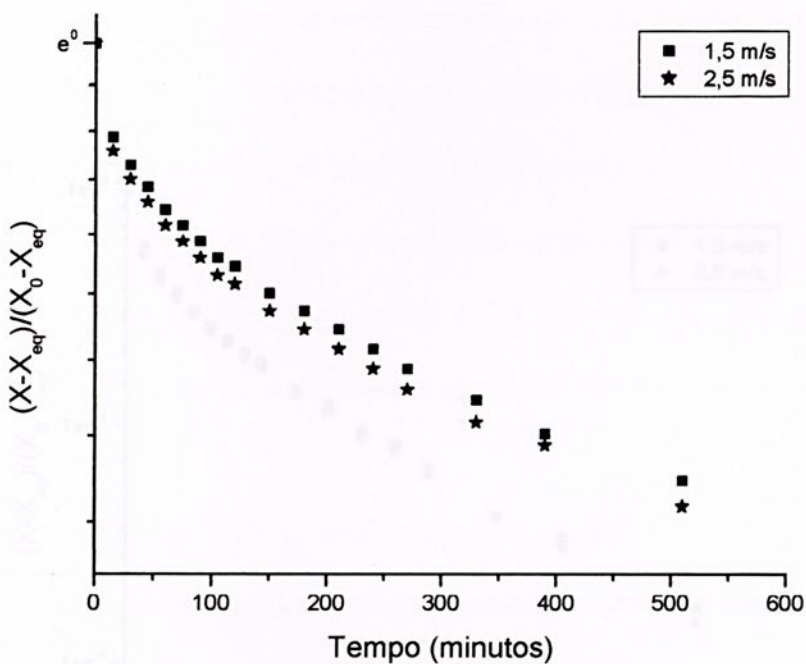


Figura 5.16: Umidade adimensional em função do tempo para a amêndoa de macadâmia na temperatura de 40°C e velocidades do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.

Figura 5.18: Umidade adimensional em função do tempo para a amêndoa de macadâmia na temperatura de 60°C e velocidades do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s

Tabela 3.5: Parâmetros do modelo de Page (Eq. 3.25) para amêndoas de macadâmia.

Temperatura	Velocidade ar	k_p	n	R^2
40°C	1,5 m/s	0,04544	0,42335	0,999
	2,5 m/s	0,05488	0,42335	0,999
50°C	1,5 m/s	0,05257	0,49490	0,997
	2,5 m/s	0,08142	0,48136	0,998
60°C	1,5 m/s	0,08146	0,58130	0,999
	2,5 m/s	0,08233	0,54346	0,997

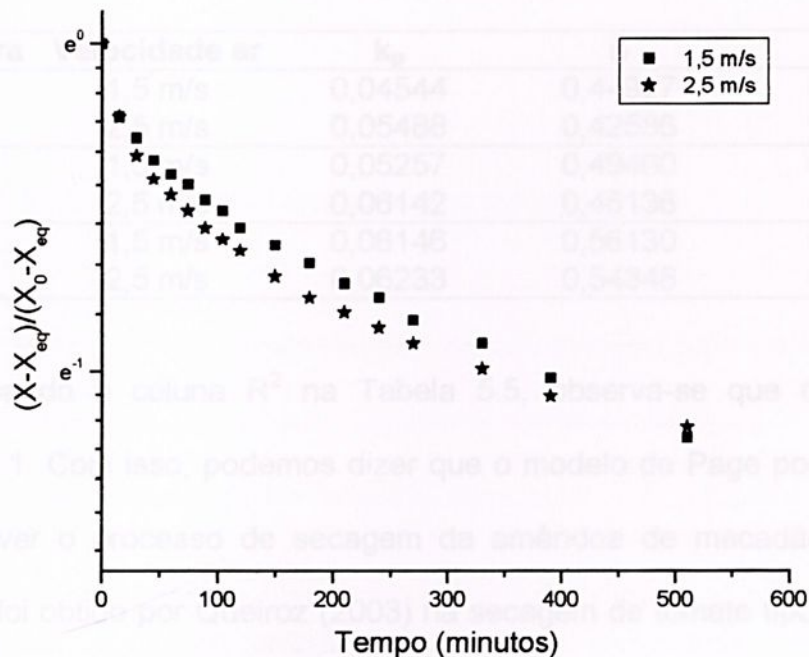


Figura 5.17: Umidade adimensional em função do tempo para a amêndoas de macadâmia na temperatura de 50°C e velocidades do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.

de velocidade do ar de secagem, e não aumentou com o aumento da temperatura do ar de secagem. Dessa forma, a temperatura e a velocidade do ar de secagem têm influência sobre o parâmetro k_p , e apenas a temperatura do ar de secagem teve influência sobre o parâmetro n . Observou-se que na temperatura de 40°C o aumento do valor de k_p para as velocidades do ar de 1,5 e 2,5 m/s foi muito pequeno, o que explica o pequeno aumento no tempo de secagem com o aumento da temperatura do ar de 1,5 para 2,5 m/s.

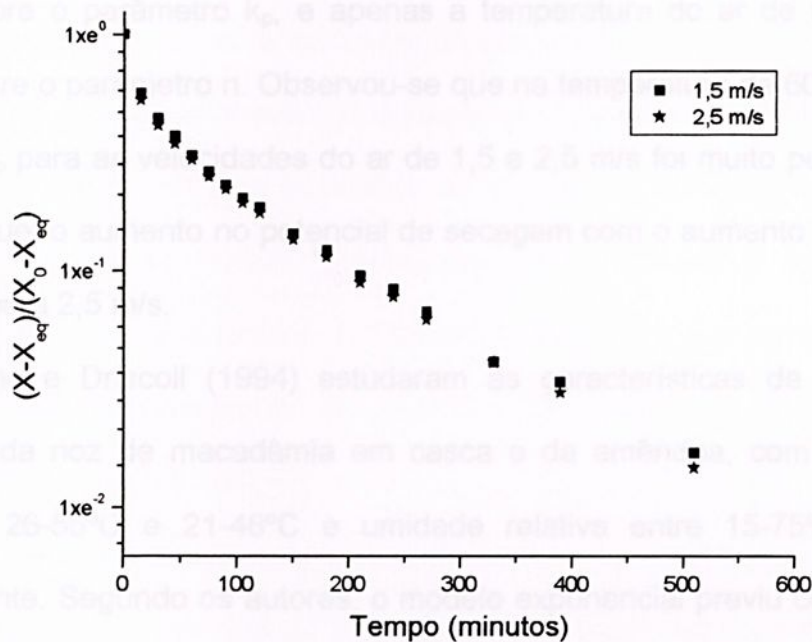


Figura 5.18: Umidade adimensional em função do tempo para a amêndoas de macadâmia na temperatura de 60°C e velocidades do ar de secagem de 1,5 e 2,5 m/s.

Tabela 5.5: Parâmetros do modelo de Page (Eq. 3.25) para amêndoa de macadâmia.

Temperatura	Velocidade ar	k_p	n	R^2
40°C	1,5 m/s	0,04544	0,44927	0,999
	2,5 m/s	0,05488	0,42586	0,999
50°C	1,5 m/s	0,05257	0,49460	0,997
	2,5 m/s	0,06142	0,45136	0,998
60°C	1,5 m/s	0,06146	0,56130	0,999
	2,5 m/s	0,06233	0,54348	0,997

Analisando a coluna R^2 na Tabela 5.5, observa-se que os valores são próximos de 1. Com isso, podemos dizer que o modelo de Page pode ser utilizado para descrever o processo de secagem da amêndoa de macadâmia. Resultado semelhante foi obtido por Queiroz (2003) na secagem de tomate tipo Pêra e tomate tipo Santa Cruz.

Na Tabela 5.5, verificou-se que k_p aumentou com o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem, e n aumentou com o aumento da temperatura do ar de secagem. Dessa forma, a temperatura e a velocidade do ar de secagem teve influência sobre o parâmetro k_p , e apenas a temperatura do ar de secagem teve influência sobre o parâmetro n . Observou-se que na temperatura de 60°C o aumento do valor de k_p para as velocidades do ar de 1,5 e 2,5 m/s foi muito pequeno, o que explica o pequeno aumento no potencial de secagem com o aumento da velocidade do ar de 1,5 para 2,5 m/s.

Palipane e Driscoll (1994) estudaram as características de secagem em camada fina da noz de macadâmia em casca e da amêndoa, com temperaturas variando de 26-56°C e 21-48°C e umidade relativa entre 15-75% e 14-63%, respectivamente. Segundo os autores, o modelo exponencial previu com precisão o comportamento da secagem das nozes e das amêndoas. Em baixos teores de umidade do produto, a secagem da noz em casca foi mais lenta do que a secagem da amêndoa.



6. CONCLUSÕES

Baseado nos dados apresentados, pode-se concluir que:

- Os valores obtidos experimentalmente da composição química da amêndoa de macadâmia estão de acordo com os mencionados na literatura.
- A macadâmia utilizada neste trabalho apresenta 21% pequena, 66% média e 13% grande.
- A densidade aparente, densidade real e a porosidade da amêndoa de macadâmia variaram em função do teor de umidade.
- O teor de umidade tem influência direta no ângulo de repouso, na velocidade terminal, no calor específico e na difusividade térmica da amêndoa de macadâmia.
- O valor do calor específico da amêndoa de macadâmia obtido experimentalmente é menor do que o obtido através da equação apresentada por Heldman (1975).
- O estudo experimental das isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia apresentou dados que foram fundamentais para encontrar a melhor equação para representar este fenômeno. O Modelo de GAB foi o que apresentou melhor ajuste às isotermas de sorção da amêndoa de macadâmia, com R^2 acima de 99% e RMS inferior à 25%.
- O modelo de Page mostrou-se adequado para a representação das curvas de secagem da noz e amêndoa de macadâmia e, a partir das curvas de secagem, observou-se que a velocidade de secagem da noz e amêndoa de macadâmia foi maior com o aumento da temperatura.



- Verificou-se que, para um mesmo tempo de residência do material no secador, o aumento da velocidade do ar de secagem da amêndoa de macadâmia conduziu a uma redução da razão de umidade, indicando o aumento do potencial de secagem em função da velocidade do ar.

Transactions of the ASAE, 16(4) p. 707-708, 1973.

ALLEN, J. W. The good food - the mountains bible. Australia, 1908, 107 p.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). Official methods of analysis, 14 ed. Arlington, Virginia, 1954, 1 v.

AYIAR, N. A., HAQUE, M. A. Moisture dependence of thermal properties of wheat. Journal of food engineering, Nigeria, 47, p. 109-116, 2001.

BALASUBRAMANIAN, D. Physical properties of raw grain. Journal of agricultural engineering research, 76(3), p. 281-287, 2001.

BARRAZO, M. A. 9. Transferência de calor e massa entre o ar e partículas de soja em alto cisalhamento e escoamentos cruzados. São Carlos, UFSCAR, 1993. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 1993.

BARTEN, E. A. Physical properties of millet. Journal of food engineering, 51, p. 39-45, 2002.

BENEDETTI, E. C. Influência do teor de umidade sobre as propriedades físicas de milho grão. Campinas, FEAGRI, UNICAMP, 123 p., 1987. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, UNICAMP, 1987.

BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N. Transport phenomena, 1960.

BITTENBENDER, H. C., McDREGOR, A. Situação e perspectivas da macadâmia no mundo. In: Macadâmia: tecnologia de produção e comercialização, 1994. Viçosa da Conselheira, Brasil: DFZ/UESB, 359 p. p. 188-191.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAM, A.; SHOVE, C. G. Hygroscopicity and thermal properties of soybean. Transactions of the ASAE, 16(4), p. 707-709, 1973.
- ALLEN, J. W. The good book - the macadamia bible. Australia, 1996. 107 p.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). Official methods of analysis, 14 ed. Arlington, Virginia, 1984, 1 v.
- AVIARA, N. A.; HAQUE, M. A. Moisture dependence of thermal properties of sharanut kernel. Journal of food engineering, Nigeria, 47, p. 109-113, 2001.
- BALASUBRAMANIAN, D. Physical properties of raw cashew nut. Journal of agricultural engineering research, 78(3), p. 291 - 297, 2001.
- BARROZO, M. A. S. Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados. São Carlos, UFSCAR, 1995. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade Federal de São Carlos, 1995.
- BARYEH, E. A. Physical properties of millet. Journal of food engineering, 51, p. 39 - 46, 2002.
- BENEDETTI, B. C. Influência do teor de umidade sobre as propriedades físicas de vários grãos. Campinas, FEAGRI, UNICAMP, 125 p., 1987. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, UNICAMP, 1987.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N. Transport phenomena, 1960.
- BITTENBENDER, H. C.; Mc GREGOR, A. Situação e perspectivas da macadâmia no mundo. In: Macadâmia: tecnologia de produção e comercialização, 1991. Vitória da Conquista, Brasil. DFZ/ UESB, 1991. p. 159 - 191.



- BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; DEMING, W. E.; TELLER, E. On the theory of the Van Der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical Society*, 62, 1723-1732, 1940.
- CAMARGO, J. E. Macadâmia é investimento de longo prazo - país desenvolveu seu próprio "know how". *Jornal Folha de São Paulo*, São Paulo, dez. 1992, Agrofolha.
- CEREDA, E.; DE MARCHI, M. J. Botânica caracterização da noqueira macadâmia. In: *Macadâmia: tecnologia de produção e comercialização*, 1991, Vitória da Conquista, Brasil. DFZ/ UESB, 1991. p. 05 - 28.
- CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of coffee. *Journal of agricultural engineering research*, 73, p. 227-234, 1999.
- CHUNG, D. S.; PFOST, H. B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products Part.II. *Transactions of the ASAE*, vol. 10(4), p. 549-551, 1967.
- CORDEIRO, J. A. B. Curso de armazenagem de grãos, FEAGRI, UNICAMP, 134 p., 1987.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion. Pergamon press, Oxford, 1975.
- CRONIN, K.; KEARNEY, S. Monte Carlo modeling of vegetables tray dryer. *Journal of food Engineering*, v. 35, 233-250, 1998.
- DESHPANDE, S. D., BAL, S. & OJHA, T. P. Physical properties of soybean. *Journal of agricultural engineering research*, 56, p. 89 - 98, 1993.
- DICKERSON, R. W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. *Food technology*, 19(5), p. 198-204, 1965.
- DIERBERGER, J. E.; MARINO NETO, L. Noz macadâmia: uma nova opção para fruticultura brasileira. São Paulo. Editora Nobel, 1985. 120p.



- DISNEY, R. W. The specific heat of some cereal grains. Cereal chemistry, St. Paul, 31(3):229-39, 1954.
- DURAL, N. H.; HINES, A. L. A. A new theoretical isotherm equation for water vapor-food systems: multilayer adsorption on heterogeneous surfaces. Journal of food engineering, v. 20, n. 1, p. 75-96, 1993.
- GOUVEIA, J. P. G. Estudo da secagem de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe). Campinas, UNICAMP, 1998. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, UNICAMP, 1998.
- GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. Journal Res. Natl. Bureau of Standards, vol. 81(A), p. 89-93, 1977.
- GUPTA, R. K.; DAS S. K. Physical properties of sunflower seeds. Journal of agricultural engineering research, 66, p. 1 - 8, 1997.
- HARKINS, W. D.; JURA, G. A vapor adsorption method for the determination of the area of a solid. J. Am. Chem. Soc., vol. 66, p. 1366-1371, 1944.
- HAWLADER, M. N. A.; UDDIN, M. S.; HO, J. C.; TENG, A. B. W. Drying characteristics of tomatoes. Journal of food engineering, 14, p. 259-268, 1991.
- HWANG, M. P.; HAYAKAWA, K. A. A specific heat calorimeter for foods. Journal of food science, 44(2):435-448, 1979.
- HELDMAN, D. R. Food process engineering. Westport, Conn. The AVI publishing company, 401 p., 1975.
- HOBSON, L. Macadamia harvesting and handling. Macadamia mini symposium - proceedings, SAMAC, Tzaneen, Africa do Sul, 1991. p. 30 - 34.
- ITO, P. J.; HAMILTON, R. A. Quality and yield of "Keauhou" macadamia nuts from mixed and pure blocks planting. Hort science, Alexandria, v. 15, p. 97 - 103, 1987.



- JOSHI, D. C.; DAS, S. K.; MUKHERJEE, R. K. Physical properties of pumpkin seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54, p. 219-229, 1993.
- JOUBERT, A. J. The cultivation of macadamias. Institute for tropical and subtropical crops, Africa do Sul, Bulletin 426, 66p., 1994.
- JOWITT, R.; ESCHER, F.; HALLSTOM, B.; MEFFERT, H. F. T.; SPIESS, W. E. L.; VOS, G. Physical properties of foods. Applied science publishers, London and New York, 1983.
- KAZARIAN, E. A.; HALL, C. M. Thermal properties of grain. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 18(6)1-23, 1975.
- KERMOND, P.; BAUMGART, B. The macadamia: from the seed to the supermarket. Australia, ISBN 0 646 28866 0, 79p., 1996.
- LABUZA, T. P.; KANANNE, A.; CHEN, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of food science*, v. 50, p. 385-390, 1985.
- LEWICKI, P. P., VUA LE, H., POMARA-LAZUKA, W. Effect of pre-treatment on convective drying of tomatoes. *Journal of food engineering*, 54, 141-146, 2000.
- LEWIS, M. J. Physical properties of foods and food processing systems, 1 ed., England, Ellis Horwood Ltda. 1987.
- LEE, P. Macadamia growers handbook. SAMAC - The southern African macadamia growers association, Tzaneen, Africa do Sul, 1998. 65p.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of food engineering*, v. 29, p. 75-97, 1996.



- MAGEE, T.R.A. Measurement of thermal diffusivity of potato, malt bread and wheat flour. *Journal of Food Engineering*, 25, p. 223-232, 1995.
- MOHSENIN, N. N. *Physical properties of plant and animal materials*. 2 ed., Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers inc., 891 p., 1986.
- MORITA, T., PAUL SINGH, R. Physical and thermal properties of short grain rough rice. *Transactions of ASAE*, 22, p. 630-636, 1979.
- NIDAL, H.; ABU-HAMDEH. Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems engineering*, 86 (1), p. 97-102, 2003.
- O'HARE, P.; VOCK, N. *Growing macadamias in Queensland*. Queensland department of primary industries, Nambour, Australia, 1990. 36p. RQN90007.
- OLAJIDE, J. O.; IGBEKA, J. C. Some physical properties of groundnut kernels. *Journal of food engineering*, 58, p. 201 - 204, 2003.
- OMOBUWAJO, T. O., OMOBUWAJO, O. R., SANNI, L. A. Physical properties of calabash nutmeg (*Monodora myristica*) seeds. *Journal of food engineering, Nigeria*, 57, p. 375-381, 2003.
- OSBORN, G. S.; WHITE, G. M.; SULAIMAN, A. H.; WELTON, L. R. Predicting equilibrium moisture proportions of soybeans. *Transactions of the ASAE*, vol. 32(6), p. 2109-2113, 1989.
- PALIPANE, K. B., DRISCOLL, R. H., SRZEDNICKI, G. Density, porosity and composition of macadamia in-shell nuts. *Food Australia*, 44(6), p. 276 - 280, 1992.
- PALIPANE, K. B.; DRISCOLL, R. H. The thin-layer drying characteristics of macadamia in-shell nuts and kernels. *Journal of food engineering*, v. 23, p. 129-144, 1994.



- PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. *Journal of food engineering*, v. 52, p. 349-357, 2002.
- PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra Bartlett (*Pyrus sp.*) com e sem desidratação osmótica. *Ciência e tecnologia de alimentos*, Campinas, 21(1):73-77, 2001.
- PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Isotermas de dessorção para a pêra Bartlett (*Pyrus sp.*). *Engenharia rural*, Piracicaba: ESALQ/ USP, 2000.
- QUEIROZ, R. Secagem de tomates utilizando secadores resistivos e com bomba de calor. São José do Rio Preto, UNESP, 120p., 2003. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, UNESP, 2003.
- RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. *Engineering properties of foods*, New York, p. 155-165, 1986.
- SASSERON, J. L. Avaliação de propriedades físicas e curvas de secagem em camadas finas de amêndoas de cacau. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1984, 61p.
- SINGH, K. K.; GOSWAMI, T. K. Physical properties of cumin seed. *Journal of agricultural engineering research*, 64, p. 93 - 98, 1996.
- SREENARAYANAN, V. V.; CHATTOPADHYAY, P. K. Specific heat of rice bran. *Agricultural Wastes*, 16, p. 217-224, 1986.
- STENPHENSON, R. A.; GALAGUER, E. C. Effects of foliar boron sprays on yield and quality of macadamia nuts. *Science horticulture*, Amsterdam, v. 32, p. 97 - 103, 1987.
- SUBRAMANIAN, S.; VISWANATHAN, R. Thermal properties of minor millet grains and flours. *Biosystems engineering*, India, 84 (3), p. 289-296, 2003.



- TALIB, M. Z. M.; DAUD, W. R. W.; IBRAHIM, M. H. Moisture isotherms of cocoa beans. Transactions of the ASAE, 38(4):1153-1155, 1995.
- TELIS-ROMERO, J. Hidrodinâmica e transferência de calor do escoamento laminar de fluidos não-newtonianos em tubos. Campinas, FEA - UNICAMP, 1992. Originalmente apresentada como tese de doutorado, UNICAMP, 1992.
- THOMPSON, T. L., PEART, R. M., FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying - a new model. Transaction of the ASAE, vol. 11, p. 582 - 586, 1968.
- TOLEDO PIZA, A. N. J. A colheita e o beneficiamento da noz macadâmia. In: macadâmia: tecnologia de produção e comercialização, 1991, Vitória da Conquista, Brasil. DFZ/ UESB, 1991. p. 131 - 147.
- TOLEDO PIZA, P. L. B., TOLEDO PIZA, I. M. The macadamia industry in Brazil. In: First international macadamia symposium in Africa, 1999, Nelspruit, Africa do Sul. The southern African macadamia grower's association yearbook, Tzaneen, Africa do Sul, 1999. p. 252 - 255.
- TOSELLO, A.; JORGE, J. T. Equipamento experimental para a determinação do ângulo de talude. Ciência e cultura Supl., v. 28, n. 7, p. 852, 1976.
- VASCONCELOS, L. H. Determinação das propriedades físicas da canola (*Brassica napus*), variedade Iciola 41, relacionadas à armazenagem. Campinas, FEAGRI, UNICAMP, 92 p., 1998. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, UNICAMP, 1998.
- VÉLEZ, J. F.; LOMAS, J. M.; LOPEZMALO, A. Evaluacion de propiedades termicas en productos alimentícios. In: Congreso latinoamericano de tranferencia de calor y materia, IV, 1991, La Serena, Anais, Chile, 1991, p. 347-351.



VIEIRA, J. A. G. Característica de secagem e propriedades físicas da batata doce. Lavras, ESAL, 77p., 1991. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, ESAL, 1991.

VIEIRA, J. A. G. Propriedades termofísicas e convecção no escoamento laminar em tubos de suco de laranja. Campinas, FEA, UNICAMP, 90p., 1996. Originalmente apresentada como tese de doutorado, UNICAMP, 1996.

WHIGHT, M. E.; POTERFIELD, J. G. Specific heat of Spanish peanut. Transactions of ASAE, St. Joseph, 13(4):508-10, 1970.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; IBRAHIM UZUM, H. Mathematical modeling of thin-layer solar drying of sultana grapes. Energy, 26, p. 457-465, 2001.



