

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

**SECAGEM DE SEMENTES DE *Arachis hipogae* L. COM CAPA PROTETORA**

Aluna: Bruna de Souza Nascimento

Orientador: Prof. Dermeval José Mazzini Sartori

São Carlos - SP

Fevereiro de 2009

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

**SECAGEM DE SEMENTES DE *Arachis hipogae* L. COM CAPA PROTETORA**

Aluna: Bruna de Souza Nascimento

Orientador: Prof. Dermeval José Mazzini Sartori

Dissertação de mestrado apresentada como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

São Carlos – SP

Fevereiro de 2009

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

N244ss

Nascimento, Bruna de Souza.

Secagem de sementes de *Arachis hypogae* L. com capa protetora / Bruna de Souza Nascimento. -- São Carlos : UFSCar, 2009.

123 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Secagem. 2. Amendoim. 3. Sementes. 4. *Arachis hypogea* L.. I. Título.

CDD: 660.28426 (20<sup>ª</sup>)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **BRUNA DE SOUZA NASCIMENTO** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 20 DE FEVEREIRO DE 2009.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori  
**Orientador, PPG-EQ/UFSCar**



Prof. Dr. Nivaldo Aparecido Corrêa  
**DHS/USP**



Prof. Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa  
**PPG-EQ/UFSCar**

À minha Mãe Cléria de Souza Vieira Nascimento (“*Sempre Presente*”) e  
ao meu Pai José Jorge do Nascimento Neto.

## AGRADECIMENTOS

À Deus por ter-me concedido toda a luz e perseverança necessárias para que eu superasse todas as dificuldades e seguisse em frente rumo à conquista desta etapa de minha vida.

Ao meu pai e aos meus irmãos por sempre me apoiarem e compreenderem a minha ausência. Aos meus sobrinhos por estarem sempre me esperando com aquele abraço gostoso.

Ao Professor Dermeval J.M. Sartori pelos ensinamentos, pela orientação e disposição em me ajudar.

Ao Professor José Teixeira Freire pela oportunidade, ensinamento e contribuições durante a realização deste trabalho.

Aos Professores Ronaldo Guimarães Corrêa, Ana Maria da Silveira e Maria do Carmo Ferreira pelas contribuições dadas durante os seminários do Centro de Secagem.

Aos técnicos do DEQ-UFSCar por sempre estarem dispostos em ajudar.

Ao Sr. Alécio Vieira e Sra. Heliane C.M.P. Vieira, proprietários da indústria alimentícia “Cealista Xangô Ltda”, por fornecerem as sementes de amendoim necessárias para a realização dos testes. À filha deles, Daniele Vieira que não mediu esforços para me acompanhar no local de coleta do material e pela amizade.

Aos amigos que fiz no Centro de Secagem em especial ao André, ao César, ao Lucas, ao Robson e ao Rodrigo por tornarem o ambiente de trabalho mais agradável e descontraído na hora do cafezinho.

Ao Leonardo por está sempre disposto em me ajudar com as análises estatísticas. E ao Fábio por me ajudar a esclarecer algumas dúvidas.

À Viviane e à Érika pela amizade e por me receberem com tanto carinho quando eu cheguei em São Carlos.

Aos amigos que fiz no DEQ/UFSCar, em especial ao Eduardo Tanabe, Giann, Ivana, Juliana Rosa, Laura, Letícia, Liliane e Sandra.

Aos amigos de Viçosa (MG) que vieram para São Carlos e tornaram esta cidade mais agradável, em especial a Anamaria, Clarice, Giovana, Isabel, Priscila e Sérgio. E aos que ficaram lá e mesmo assim estiveram sempre presentes por mensagens ou até longas conversas, em especial ao Luis Gustavo por me fazer “companhia” durante os longos experimentos.

Aos amigos de Caratinga (MG) que torceram por mim, em especial à Ariana, à Marina e à Elizângela.

À Natália por estar sempre disposta em me escutar, à Ediane pela preocupação, à Aruana pelo bom humor mesmo nas horas mais difíceis, a Renata pela companhia e a todas vocês pela amizade, compreensão e por formarem junto comigo o “Quarteto Fantástico (Aru, Bru, Di e Na) e o Surfista Prateado (Rê)”.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

“Dentre todos os conhecimentos, os sábios e bons buscam,  
acima de tudo, conhecerem-se a si mesmos.”

Shakespeare

## RESUMO

O amendoim (*Arachis hypogae* L.) é uma semente ortodoxa que precisa passar pelo processo de secagem para se tornar livre da aflatoxina. O fruto é formado por um sistema composto por um núcleo e um invólucro resistente que constitui uma mistura heterogênea. Visando contribuir com a melhoria da secagem destas sementes o objetivo deste estudo é analisar a secagem do sistema composto e seus subsistemas em relação ao transporte de umidade e encolhimento, assim como, a influência sobre as qualidades físicas e fisiológicas. Para tanto, o fruto, as sementes com e sem endocarpo, bem como, o pericarpo, foram submetidos em um secador de convecção forçada com reciclo de ar. Para a abordagem do problema adotou-se a visão de escoamento de fluido sobre corpos submersos. Os experimentos foram conduzidos com base em um planejamento experimental  $3^2$  com temperaturas de 30, 40 e 50°C e velocidades de 0,5; 1,0 e 1,5 m/s. Para medida da massa das amostras e a tomada de imagens foi utilizado o método intermitente. As qualidades físicas e fisiologias foram realizadas a partir de observações durante os experimentos. Os resultados obtidos mostraram que o mecanismo predominante no transporte de umidade é o difusivo, quando se tem o fruto, a semente com e sem endocarpo. Para o pericarpo foi verificada também a presença do mecanismo convectivo. Quanto ao efeito das barreiras físicas, foi constatado que o pericarpo e o endocarpo causam resistência ao transporte de massa. Através da análise das imagens, com auxílio do software IMAGE PRO PLUS<sup>®</sup> foi possível constatar o desenvolvimento da concavidade na superfície da semente com e sem endocarpo. Entretanto, esta deformação não foi observada para o fruto nem para o pericarpo. As reduções das dimensões demonstram a ocorrência do fenômeno de encolhimento para a semente com e sem endocarpo. Os resultados referentes às qualidades fisiológicas e físicas mostraram dependência com as condições operacionais utilizadas quando as sementes são processadas fora do pericarpo. A análise referente à interação do processo com as qualidades do produto demonstrou que a secagem convectiva é promissora tendo a melhor relação entre o processo e qualidade para o fruto. Diante dos resultados obtidos, foi realizada a discriminação das equações que representam a cinética de secagem com enfoque na melhoria da produção de sementes. Os avanços obtidos contribuem com os estudos da secagem de sementes que apresentam capa protetora sob o ponto de vista de engenharia de secagem de sementes.

## ABSTRACT

*Arachis hipogae* L. peanut is an orthodox seed that must go through a drying process to become free from aflatoxin. The fruit is formed by a system made up by a nucleus and a resistant involucre that constitutes a heterogeneous mixture. So as to contribute to the improvement of those seeds drying, the objective of this study is to analyze the drying of the compound system and its subsystems in relation to moisture transport and shrinkage, as well as the influence on physiological and physical characteristics. In order to do so, the fruit, the seeds with and without endocarp, as well as the pericarp were placed in a forced convection dryer. To approach the problem, the idea of fluid flow on submerged bodies was adopted. The experiments were conducted based on a  $3^2$  experimental planning with temperatures of 30, 40 e 50°C and velocities of 0,5; 1,0 e 1,5 m/s. The intermittent method was used to measure the samples mass and to obtain the images. Analysis of the physical and physiological characteristics was performed from observations during the experiments. The results showed that the diffusive transport of moisture was predominant when the fruit and seed with and without the endocarp are concerned. The convective mechanism was also observed for the pericarp. As far as the physical barriers effect is concerned, it was verified that the pericarp and the endocarp cause resistance to mass transport. It was possible to verify the development of the seed's (with and without the endocarp) superficial concavity through image analyses with the aid of IMAGE PRO PLUS<sup>®</sup> software. However this deformation was not observed for the fruit or for the pericarp. The dimension reductions demonstrate the presence of the shrinkage phenomenon for the seed with and without the endocarp. The results regarding the physiological and physical characteristics showed dependency on operational conditions used when the seeds are processed outside the pericarp. Analysis concerning the process interaction with the product characteristics demonstrated that convective drying is a promising technique having a better relation between the process and quality for the product. Due to the results obtained, the discrimination of the equations that represent drying kinetics with focus on the improvement of seeds production was performed. The advancements obtained contribute to the drying studies of seeds that present protective cover under the perspective of seeds drying engineering.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	ii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE QUADROS E TABELAS .....	xiv
NOMENCLATURA.....	xv
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Aspecto Geral .....	1
1.2 Motivação à Pesquisa .....	3
1.3 Justificativa.....	5
1.4 Colocação do Problema.....	6
1.5 Objetivos.....	7
1.6 Etapas .....	8
CAPÍTULO 2 .....	10
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 Generalidades do Amendoim .....	10
2.1.1 Descrição .....	11
2.1.2 A Diversidade da Utilização do Amendoim.....	12
2.2. Secagem do Amendoim.....	15
2.2.1 Aspectos Gerais da Secagem.....	15
2.2.1 Avanços da Secagem do Amendoim.....	17
2.3 Representação da Cinética de Secagem.....	21
2.4 Escoamento de Fluido sobre Corpos Submersos.....	26
2.5 Secagem por Convecção Forçada.....	31
2.6. Avaliação da Qualidade do Produto .....	35
2.6.1 Qualidades Fisiológicas.....	36
2.6.2. Qualidades Físicas .....	39
CAPÍTULO 3 .....	41
MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 Materiais .....	41
3.1.1 Amendoins ( <i>Arachis hypogae</i> L.).....	42
3.1.2 Coleta e Padronização das Amostras.....	42
3.1.3 Preparação do Sistema Composto e Subsistemas do Amendoim.....	44

3.2 Unidade de Secagem Convectiva .....	45
3.2.1 Secador de Convecção Forçada com Reciclo de Ar.....	46
3.2.2 Câmara de Secagem .....	48
3.2.3 Suporte das Diferentes Partes do Amendoim.....	50
3.3 Técnicas de Medidas das Variáveis do Processo.....	51
3.4 Determinações das Propriedades das Amostras .....	52
3.4.1 Tomada de Imagens para a Caracterização do Encolhimento e Forma.....	52
3.4.2 Determinação da Umidade de Equilíbrio Termodinâmico.....	54
3.4.3 Obtenção do Teor de Umidade Crítica.....	54
3.5 Testes das Amostras Através da Secagem Convectiva .....	55
3.5.1 Procedimento Experimental .....	55
3.5.2 Planejamento Experimental e Condições Operacionais .....	57
3.6 Avaliação da Qualidade das Sementes para Insumo na Agricultura.....	59
3.6.1 Qualidades Físicas .....	60
3.6.2 Qualidades Fisiológicas.....	60
3.7 Análise e Tratamento dos Dados .....	61
3.7.1 Critérios para a Verificação de Ajuste e Reprodutibilidade dos Dados .....	62
3.7.2 Análise dos Dados Experimentais .....	62
3.7.3 Representação da Equação de Secagem Convectiva do Amendoim... 63	
CAPÍTULO 4 .....	65
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
4.1 Coleta em Campo e Preparação da <i>Arachis hipogae</i> L. ....	65
4.2 Testes Preliminares das Amostras na Unidade de Secagem.....	67
4.2.1 Verificação do Procedimento e das Garantias Experimentais.....	67
4.2.2 Avaliação do Comportamento das Amostras Frente ao Escoamento do Fluido .....	70
4.3 Análise da Influência das Condições Operacionais e da Presença das Barreiras Físicas na Redução de Umidade das Partículas.....	74
4.3.1 Sementes com a Proteção do Endocarpo .....	75
4.3.2 Sementes sem a Proteção do Endocarpo .....	78
4.3.3 Pericarpo do Fruto .....	81
4.3.4 Fruto .....	86
4.3.5 Avaliação dos Efeitos dos Tegumentos na Dessorção de Água.....	89
4.4. Avaliações dos Efeitos da Secagem nas Mudanças de Forma e Encolhimento do Fruto e dos Subsistemas .....	93

4.5 Avaliação das Condições Operacionais do Secador na Fisiologia das Sementes: Germinação e Desenvolvimento da Plântula.....	103
4.5.1 Qualidades Físicas .....	104
4.5.2 Qualidades Fisiológicas.....	105
4.6 Interações entre as Qualidades do Produto com o Processo de Secagem .....	108
4.7 Discriminação das Equações de Secagem para o Fruto do Amendoim .....	110
CAPÍTULO 5 .....	114
CONCLUSÕES .....	114
CAPÍTULO 6 .....	116
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	118

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de um fluxo de ar ao redor de uma esfera submersa em um fluido que escoia (BIRD et al. 2004).....	6
Figura 2.1: Principais partes do fruto da <i>Arachis hipogae</i> L. (a). Corte longitudinal da semente do amendoim (b).....	11
Figura 2.2: Esquema da camada limite em uma esfera próximo ao ponto de separação (KREITH, 2003).....	27
Figura 2.3: Evolução do regime de escoamento em função do número de Reynolds de partícula (BRAGA FILHO, 2004).....	28
Figura 3.1: Visão geral da plantação na região de Fernando Prestes – SP (a), momento da coleta das amostras do amendoim diretamente da lavoura (b). ....	43
Figura 3.2: Esquema do fruto do amendoim aberto com as respectivas posições das sementes. ....	45
Figura 3.3: Esquema do equipamento de secagem utilizado para a condução dos testes de secagem (CASSANDRE et al., 2001). ....	46
Figura 3.4: Detalhes da câmara de secagem, com destaque para os orifícios que permitem as medidas de temperatura e velocidade do ar de secagem.....	49
Figura 3.5: Resultado típico de distribuição da velocidade do ar na região de secagem, com $v = (0,95 \pm 0,05\text{m/s})$ em função da Var 1 = largura em cm, Var 2 = altura em cm (CASSANDRE et al., 2001) .....	49
Figura 3.6: Resultado típico de distribuição da temperatura do ar na região de secagem, com $T = (34,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ em função da Var 1= largura em cm, Var 2 = altura em cm (CASSANDRE et al., 2001). ....	50
Figura 3.7: Esquema da plataforma utilizada no método intermitente de aquisição de dados (ARRIECHE, 2007). ....	51
Figura 3.8: Esquema da superfície luminosa utilizada para a tomada de imagem das amostras. ....	53
Figura 3.9: Fluxograma utilizado para a realização do procedimento experimental.....	56
Figura 4.1: Fotos da semente processadas fora do pericarpo e com endocarpo sob a visão de topo com escoamento do ar de baixo para cima, em diferentes tempos de secagem. Início do processo (a), final do processo (b) de secagem. ....	71
Figura 4.2: Esquema do fluxo de ar de secagem ao redor de uma esfera, que representa o plano de separação entre os cotilédones. ....	71
Figura 4.3: Fotos de sementes de amendoim com cortes longitudinais entre os cotilédones processadas dentro do pericarpo (a), fora do pericarpo e com endocarpo (b) e fora do pericarpo e sem endocarpo (c) com à direção do escoamento do ar de secagem da esquerda para direita.....	72

Figura 4.4: MR em função do tempo para o pericarpo parametrizado em períodos de tempo distintos.....	73
Figura 4.5: MR em função do tempo para a SCE na condição de 50°C e 1,0 m/s. ....	75
Figura 4.6: MR em função do tempo de secagem para o SCE em $T = 30^{\circ}\text{C}$ , parametrizado em $V$ .....	77
Figura 4.7: MR em função do tempo de secagem para o SCE em $V = 0,5 \text{ m/s}$ , parametrizado em $T$ . ....	77
Figura 4.8: MR em função do tempo para a SSE na condição de 50°C e 1,0 m/s.....	79
Figura 4.9: MR em função do tempo de secagem para o SSE em $T = 40^{\circ}\text{C}$ , parametrizado em $V$ .....	80
Figura 4.10: MR em função do tempo de secagem para o SSE em $V = 0,5 \text{ m/s}$ , parametrizado em $T$ . ....	80
Figura 4.11: MR em função do tempo para o pericarpo na condição de 50°C e 1,0 m/s. ..	82
Figura 4.12: MR em função do tempo de secagem para o pericarpo em $T = 30^{\circ}\text{C}$ , parametrizado em $V$ .....	84
Figura 4.13: MR em função do tempo de secagem para o pericarpo em $V = 1,0 \text{ m/s}$ , parametrizado em $T$ . ....	84
Figura 4.14: Umidade do pericarpo (b.s.) em função do tempo de secagem. ....	85
Figura 4.15: MR em função do tempo para o fruto na condição de 50°C e 1,0 m/s. ....	87
Figura 4.16: MR em função do tempo de secagem para o fruto em $T = 50^{\circ}\text{C}$ , parametrizado em $V$ .....	88
Figura 4.17: MR em função do tempo de secagem para o fruto em $V = 0,5 \text{ m/s}$ , parametrizado em $T$ . ....	88
Figura 4.18: MR em função do tempo de secagem para o fruto, SCE, SSE e para o pericarpo (a) durante todo o período de secagem $T = 40^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0 \text{ m/s}$ ; (b) período de secagem de 0 a 4 horas.....	90
Figura 4.19 Fotos do pericarpo, (a) aumento de 100 vezes e (b) aumento de 250 vezes. ..	92
Figura 4.20: Imagens do fruto em diferentes tempos de secagem. Condição inicial (a); após 24 h de secagem (b); após 36 h de secagem(c). Escoamento do ar no sentido de baixo para cima. ....	93
Figura 4.21: Imagens do pericarpo em diferentes tempos de secagem. Condição inicial (a); após 2 h de secagem (b); após 4 h de secagem(c). Escoamento do ar no sentido de baixo para cima. ....	93
Figura 4.22: $A_p/A_{p_0}$ em função do tempo de secagem para o fruto, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0 \text{ m/s}$ . ....	94
Figura 4.23: $A_p/A_{p_0}$ em função do tempo de secagem para o pericarpo, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0 \text{ m/s}$ . ....	94
Figura 4.24: $P_p/P_{p_0}$ em função do tempo de secagem para o fruto, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0 \text{ m/s}$ . ....	94
Figura 4.25: $P_p/P_{p_0}$ em função do tempo de secagem para o pericarpo, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0 \text{ m/s}$ . ....	94

Figura 4.26: $D_{MÁX}/D_{MÁX0}$ em função do tempo de secagem para o fruto, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	94
Figura 4.27: $D_{MÁX}/D_{MÁX0}$ em função do tempo de secagem para o pericarpo, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	94
Figura 4.28: $D_{MÍN}/D_{MÍN0}$ em função do tempo de secagem para o fruto, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	95
Figura 4.29: $D_{MÍN}/D_{MÍN0}$ em função do tempo de secagem para o pericarpo, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	95
Figura 4.30: $D_{MÉD}/D_{MÉD0}$ em função do tempo de secagem para o fruto, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	95
Figura 4.31: $D_{MÉD}/D_{MÉD0}$ em função do tempo de secagem para o pericarpo, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	95
Figura 4.32: Imagens SCE em diferentes tempos de secagem. Condição inicial (a); após 3,5 h de secagem (b); após 12 h de secagem (c). Escoamento do ar está no sentido de baixo para cima. ....	97
Figura 4.33: Imagens SSE em diferentes tempos de secagem. Condição inicial (a); após 2 h de secagem (b); após 6 h de secagem (c). Escoamento do ar está no sentido de baixo para cima. ....	98
Figura 4.34: $A_p/A_{p0}$ em função do tempo de secagem para SCE, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	98
Figura 4.35: $A_p/A_{p0}$ em função do tempo de secagem para a SSE, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	98
Figura 4.36: $P_p/P_{p0}$ em função do tempo de secagem para SCE, $T = 40^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	98
Figura 4.37: $P_p/P_{p0}$ em função do tempo de secagem para a SSE, $T = 40^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	98
Figura 4.38: $D_{MÁX}/D_{MÁX0}$ em função do tempo de secagem para SCE, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	99
Figura 4.39: $D_{MÁX}/D_{MÁX0}$ em função do tempo de secagem para a SSE, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	99
Figura 4.40: $D_{MÍN}/D_{MÍN0}$ em função do tempo de secagem para SCE, $T = 30^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	99
Figura 4.41: $D_{MÍN}/D_{MÍN0}$ em função do tempo de secagem para a SSE, $T = 30^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,0$ m/s. ....	99
Figura 4.42: $D_{MÉD}/D_{MÉD0}$ em função do tempo de secagem para SCE, $T = 40^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,5$ m/s. ....	99
Figura 4.43: $D_{MÉD}/D_{MÉD0}$ em função do tempo de secagem para a SSE, $T = 40^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,5$ m/s. ....	99
Figura 4.44: Imagens das sementes demonstrando a formação da fissura interna desenvolvida nos cotilédones durante a secagem (a) semente processadas dentro do pericarpo, (b) semente processadas fora do pericarpo e com endocarpo, (c) semente fora do pericarpo e sem endocarpo.....	102

Figura 4.45: Fotos das sementes no 1º dia do teste. Testemunha (a). Sementes secas dentro do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.....	105
Figura 4.46: Fotos das sementes no 5º dia do teste de germinação. Testemunha (a). Sementes secas dentro do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s. ....	106
Figura 4.47: Fotos das sementes no 10º dia do teste de germinação. Testemunha (a). Sementes secas dentro do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s. ....	106
Figura 4.48: Fotos das sementes no 1º dia do teste de germinação. Testemunha (a). Sementes secas fora do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s. ....	107
Figura 4.49: Fotos das sementes no 5º dia do teste de germinação. Testemunha (a). Sementes secas fora do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s. ....	107
Figura 4.50: Fotos das sementes no 10º dia do teste de germinação. Testemunha (a). Sementes secas fora do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s. ....	107
Figura 4.51: Ajuste da equação de Page (1949) na condição de 30°C e 1m/s.....	112
Figura 4.52: Ajuste da equação de Page (1949) na condição de 40°C e 1m/s.....	112
Figura 4.53: Ajuste da equação de Page (1949) na condição de 50°C e 1m/s.....	112

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1: Principais trabalhos encontrados na literatura sobre a secagem de amendoim ( <i>Arachis hipogae</i> L.).....	18
Tabela 2.1: Equações de secagem utilizadas para a representação de materiais orgânicos.....	23
Tabela 2.2: Relação entre a razão L/D e o número de Reynolds de partícula para escoamento sobre cilindros submersos (SISSON & PITTS, 1972). ....	35
Tabela 3.1: Condições operacionais e codificação dos níveis das variáveis do processo utilizadas no planejamento fatorial.....	57
Tabela 3.2: Propriedades do ar a 1 atm (PERRY et al., 1997).....	58
Tabela 4.1: Caracterização das partes do amendoim utilizadas .....	66
Tabela 4.2: Valores médios do número de Reynolds de partícula para cada parte do amendoim. ....	69
Tabela 4.3: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de MR, referentes aos experimentos mostrados na Figura 4.4.....	73
Tabela 4.4: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de MR, referentes aos experimentos mostrados na Figura 4.5.....	76
Tabela 4.5: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de MR, para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes aos experimentos mostrados na Figura 4.8.....	79
Tabela 4.6: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de MR, referentes aos experimentos mostrados na Figura 4.11.....	82
Tabela 4.7: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de MR, referentes aos experimentos mostrados na Figura 4.15.....	87
Tabela 4.8: Valores das taxas de secagem ((g de água/g de sólido seco)/h) em um determinado tempo de secagem para as condições de T = 40°C e V = 1,0 m/s. ....	91
Tabela 4.9: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas dos dimensionais de $A_p$ , $P_p$ , $D_{MÁX}$ , $D_{MÍN}$ e $D_{MÉD}$ do fruto e do pericarpo, referentes aos experimentos mostrados nas Figuras 4.22 a 4.31.....	95
Tabela 4.10: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas dos dimensionais de $A_p$ , $P_p$ , $D_{MÁX}$ , $D_{MÍN}$ e $D_{MÉD}$ da SCE e da SSE, referentes aos experimentos mostrados nas Figuras 4.34 a 4.43.....	100
Tabela 4.11: Valores dos parâmetros das equações analisadas e parâmetros estatísticos.....	111

## NOMENCLATURA

<b>a</b>	Parâmetro estatístico	[-]
$A_F$	Área frontal	[L <sup>2</sup> ]
$A_P$	Área projetada	[L <sup>2</sup> ]
$C_D$	Coefficiente de arrasto empírico	[-]
$D_{EQ}$	Diâmetro equivalente	
$D_{MÁX}$	Diâmetro máximo	[L]
$D_{MÍN}$	Diâmetro mínimo	[L]
$D_{MÉD}$	Diâmetro médio	[L]
$E_a$	Energia de ativação	[ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> ]
$F_D$	Arrasto total	[MLT <sup>-2</sup> ]
$F_F$	Arrasto devido à forma	[MLT <sup>-2</sup> ]
$F_S$	Atrito superficial	[MLT <sup>-2</sup> ]
<b>K</b>	Constante de secagem	[T <sup>-1</sup> ]
$K_0$	Constante da taxa de secagem à temperatura de 25°C	[T <sup>-1</sup> ]
<b>L</b>	Comprimento característico	[L]
<b>m</b>	Massa da amostra	[M]
<b>M</b>	Umidade em base seca	[M/M]
<b>MR</b>	Adimensional de umidade $\left( MR = \frac{m - m_{eq}}{m_o - m_{eq}} \right)$	[-]
$P_P$	Perímetro projetado	[L]
$Re_D$	Número de Reynolds de partícula $\left( Re_D = \frac{D_{EQ} u_0 \rho_{ar}}{\mu_\infty} \right)$	[-]
<b>t</b>	Tempo	[T]
<b>T</b>	Temperatura	[θ]
<b>V</b>	Velocidade	[LT <sup>-1</sup> ]
<b>UR</b>	Umidade relativa do ar	[-]

## SÍMBOLOS GREGOS

$\mu_{\infty}$	Viscosidade do ar na corrente livre	$[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}]$
$\theta$	Coordenada angular zenital	$[-]$
$\rho$	Massa específica	$[\text{ML}^{-3}]$
$\nu$	Viscosidade cinemática do ar ( $\nu = \frac{\mu_{\infty}}{\rho_f}$ )	$[\text{L}^2\text{T}^{-1}]$

## SUBSCRITOS

eq	Equilíbrio
EQ	Equivalente
f	Fluido
P	Projetado
0	Estado inicial

## ABREVIACÕES

b.s.	base seca	(massa de água no material/massa material seco)
b.u.	base úmida	(massa de água no material/massa total de material)

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Neste capítulo será abordada uma introdução a respeito do tema em estudo contendo os aspectos gerais, a motivação à pesquisa, a justificativa do trabalho, assim como, a colocação do problema a partir da visão dos fenômenos de transportes envolvidos na secagem de partícula única. Finalmente na seqüência, os objetivos e as etapas que foram cumpridas.

### 1.1 Aspecto Geral

O amendoim é a parte comestível da planta *Arachis hypogae* L., a qual pertence à família Leguminosea. É uma dicotiledônea que apresenta um processo de frutificação diferenciado e denominado de geocarpia. Sua semente é considerada ortodoxa, ou seja, tolera o dessecamento a baixos teores de umidade, em torno de 3 a 7% b.u., sem causar danos à viabilidade das mesmas. Sua cultura originou na América do Sul e hoje é difundida em todos os continentes (PASSOS *et al.* 1987).

O Brasil apresenta uma área cultivada de amendoim contendo 105.300 hectares com produção de 243.900 toneladas. Sendo que o Estado de São Paulo é responsável por 75% desta produção segundo o CONAB (2008). Neste estado o amendoim é utilizado no rodízio de culturas canavieiras e apresenta aproximadamente 30% da fixação de N<sub>2</sub>/ano no solo. A variedade em predominância é a tatu (EMBRAPA, 2008).

No momento da colheita, as vagens do amendoim apresentam um grau de umidade que varia de 30 a 50% em base úmida (b.u.) tornando o material vulnerável à ação de

metabólicos secundários. Estes são produzidos por fungos toxigênicos do gênero *Aspegillus*, responsáveis pela origem da aflatoxina. Diante disto, torna-se importante que esta leguminosa passe por um processo de secagem para que a umidade seja reduzida para aproximadamente 10% em base úmida. Após este processo as mesmas são classificadas, armazenadas e comercializadas (KRZYZANOWSKI *et al.*, 2006).

Dentre os diversos processos de secagem que o amendoim é submetido, a secagem natural, no qual o material é colocado em grandes terreiros, é o método mais usado pelos agricultores. Entretanto, este método vem se mostrando inadequado com o passar do tempo, dando lugar ao processo artificial, uma vez que apresenta inúmeros problemas como à necessidade de grande mão de obra e, principalmente, a redução da qualidade do produto em relação à aceitação para o consumo e replantio. Estes problemas estão diretamente relacionados ao difícil controle das condições de secagem, causado pela grande dependência das ações climáticas.

Como alternativa para o produto se tornar livre das ações climáticas, tem-se o método artificial. Neste caso a utilização de secadores convectivos para reduzir a umidade de sólidos granulares se torna a cada dia mais importante e difundida, principalmente, quando se trata de produtos agrícolas, como grãos e sementes. Diversos tipos de secadores são utilizados e a escolha de um equipamento de secagem com condições operacionais adequadas está diretamente relacionada com as características do material, bem como, com a necessidade de preservação da qualidade do mesmo.

As características das sementes de amendoim são bem distintas de outras sementes ortodoxas. São revestidas por um invólucro resistente, denominado de pericarpo, o qual tem a função de proteger o embrião. Este invólucro é considerado uma barreira física, que impõe resistência ao transporte de massa conduzindo a um processo de secagem que envolve diferentes mecanismos. Desta forma torna-se importante a busca de informações visando obter uma relação entre o processo de secagem e a qualidade do produto.

Entretanto, a busca destas informações é realizada diante de algumas dificuldades, principalmente no que se refere à obtenção das condições operacionais desejadas para os secadores convectivos frente à melhoria na qualidade do produto. Neste caso a secagem rápida causa torração, resultando em um produto de sabor desagradável, além de causar enrugamento e fissuras do pericarpo e do endocarpo. No entanto, a condição de secagem muito lenta, pode resultar na formação de bolor e descoloração das sementes. Ambas

as operações podem causar prejuízos ao embrião, parte vital das sementes, tornando o produto inviável à formação de uma nova plântula e ao consumo de maneira geral.

Diante deste contexto, vários estudos têm sido realizados no sentido de inovar o projeto e a operação dos equipamentos de secagem. Entretanto, encontram-se ainda lacunas no que diz respeito à secagem convectiva de amendoim. Neste caso, uma abordagem teórica nem sempre é possível uma vez que a solução analítica ou numérica do modelo matemático para as fases sólido e fluido, utilizadas na formulação de projetos, é de difícil obtenção, principalmente devido à complexidade estrutural deste tipo de partícula (MASSARANI & TELLES, 1992).

Além disto, deve-se levar em consideração que os parâmetros das equações utilizadas para descrever a cinética de secagem apresentam uma forte dependência das variáveis de operação fazendo com que a aplicação das mesmas fique restrita à faixa de condições operacionais estimadas. Assim, a busca de informações acerca dos dados cinéticos não disponíveis na literatura se torna importante, à medida que a secagem de alguns materiais se faz necessária fora dos limites de aplicação destas equações.

Para tanto, extensivos testes de bancada em escala-piloto são usualmente requeridos. Os mesmos permitem obter curvas características de secagem para um material específico, de forma a tornar possível a análise do processo de secagem.

Diante desta visão geral da secagem de amendoim, tem-se a seguir, a motivação que norteia a realização de novas pesquisas.

## **1.2 Motivação à Pesquisa**

Nos últimos anos muitos foram os estudos realizados sobre a secagem de amendoins. Nestes trabalhos busca-se avaliar o melhor método (natural ou artificial) para a secagem, a influência das condições operacionais nas qualidades fisiológicas, nutricionais e na formação de toxinas, além de novas técnicas de secagem para o mesmo. Entretanto, controvérsias ainda são observadas, principalmente, a respeito das condições operacionais sobre as qualidades fisiológicas das sementes. Além disto, há escassez de informações da

secagem deste tipo de partícula frente à visão de fenômenos de transporte envolvidos durante o processo. Estes estudos são geralmente realizados em leitos fixos ou móveis, os quais não permitem a obtenção de informações acerca do comportamento da partícula isolada frente ao escoamento do fluido, uma vez que os efeitos de impactos mecânicos ou da presença de outras partículas na vizinhança não são eliminados (TRAVAGLINI & TANGO, 1965; KUNZE *et al.* 1968; NAKAGAWA *et al.* 1986; NOOMHORM *et al.*, 1994; DALBELLO, 1995; ALVES, 1995; ERTAS *et al.*, 1999; KRZYZANOWSKI *et al.*, 2006).

Além da deterioração causada por microorganismos durante o processo de secagem de amendoim e da influência das condições operacionais na qualidade do material, existem também problemas oriundos do processo de encolhimento, devido à redução de umidade que pode acarretar danos na estrutura física do produto, assim como, prejudicar a qualidade fisiológica das sementes.

Este processo de encolhimento está relacionado com as propriedades do fluido, as propriedades da amostra, bem como, com a posição do material em relação à direção do escoamento do ar de secagem, visto o mesmo como uma partícula isolada. Neste sentido, alguns trabalhos podem ser citados sobre o estudo deste fenômeno, tais como, Han *et al.* (1995); Mrani *et al.* (1997), Arrieche (2003) e Duarte *et al.* (2007), os quais estudam o processo de encolhimento de sistemas simuladores géis, que são estruturas que sofrem acentuado encolhimento durante a secagem, de forma semelhante a muitos materiais com alto teor de umidade.

Nesta mesma linha de pesquisa, que busca avaliar o comportamento de partículas frente ao fenômeno de encolhimento, encontram-se estudos com materiais orgânicos, tais como, raízes de vegetais, infrutescências de umbaúba e até mesmo de sementes de canola, a qual apresenta de 34 a 40% de óleo (SUZZUKI *et al.*, 1976; SCARPILLINI *et al.*, 2007; TAKOR *et al.*, 1999). Entretanto, para o caso do amendoim não foram encontradas informações a este respeito na literatura consultada.

Diante disto e levando em conta a disposição diferenciada dos embriões no interior deste sistema composto (fruto) formado por uma mistura heterogênea, torna-se relevante o estudo do processo de secagem considerando os fenômenos de transferências de calor e massa envolvidos entre o fluido e a partícula, tendo como justificativa deste estudo, o ponto de vista tecnológico e o ponto de vista científico.

### 1.3 Justificativa

Do ponto de vista tecnológico, verifica-se a necessidade deste estudo devido às inúmeras aplicações industriais que buscam informações frente à relação entre o processo e a qualidade do amendoim. Estas são necessárias para a obtenção das soluções analíticas ou numéricas advindas das equações de balanços para as duas fases, que muitas vezes não são possíveis, devido à complexidade apresentada por este tipo de partícula.

Um outro aspecto importante encontra-se na possibilidade de investigação do efeito da redução da atividade da água no desenvolvimento fisiológico das sementes, sem o efeito de impactos mecânicos na operação de secagem.

Sob o ponto de vista científico este estudo apresenta também grande desafio em relação à modelagem dos fenômenos de transporte envolvidos na secagem da partícula em contato com um fluido aquecido, porém, o estágio atual destas buscas, requer inicialmente um estudo experimental.

Diante da complexidade que este tipo de partícula apresenta, decidiu-se estudar a secagem deste material dividindo este sistema composto em diferentes partes. Com isto será possível conhecer o comportamento dos subsistemas separadamente e, para tanto, cada parte deverá ser tratada de forma isolada, minimizando os efeitos mecânicos e os de outras partículas na vizinhança, os quais não são possíveis de serem eliminados quando se estudam partículas no interior de leitos.

Dentro deste contexto e com base na engenharia da secagem de sementes, esta pesquisa busca informações da melhor relação entre o processo e a qualidade, tendo como enfoque os fenômenos envolvidos no processo de secagem. Desta forma, visa-se contribuir com o aprimoramento da secagem de materiais com capa protetora e, para tanto, esta pesquisa terá como abordagem do problema a visão de escoamento de fluido sobre corpos submersos, conforme descrito a seguir.

## 1.4 Colocação do Problema

Quando o amendoim passa por um processo de secagem convectiva, um fluxo de ar de temperatura  $T_f$ , velocidade  $V_f$ , e umidade UR, entra em contato com a partícula, certa quantidade de calor é transferida por convecção. Em seguida, uma quantidade de massa é perdida por este material e transportada pelo próprio fluido de secagem. Neste processo pode-se observar os fenômenos simultâneos de transferências de calor e massa entre as fases sólido e fluido, com diferentes coeficientes de transferências de calor e massa causando assim uma secagem não uniforme e podendo prejudicar a qualidade do produto.

Durante o processo de secagem por convecção forçada, existe um ponto de estagnação, onde a velocidade do fluido é igual à zero, aumentando de valor conforme o fluido contorna o corpo, formando uma camada limite, de acordo com o esquema mostrado na Figura (1.1) que representa um esquema do fluxo de ar ao redor de uma esfera submersa.

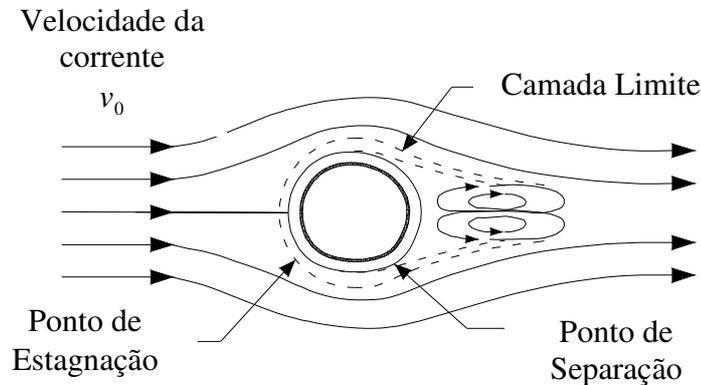


Figura 1.1: Esquema de um fluxo de ar ao redor de uma esfera submersa em um fluido que escoava (BIRD *et al.* 2004).

A formação deste perfil de velocidade será responsável pela ocorrência de uma tensão cisalhante sobre a superfície do corpo, gerando uma força de interação entre o fluido e a partícula. Em um determinado ponto da camada limite, onde o gradiente de velocidade é igual a zero ocorrerá sua separação da superfície do corpo, gerando ondas na parte posterior (vórtices), que também contribuirão para o aumento da força de interação entre o fluido e a partícula. Este ponto de separação da camada limite depende da velocidade do fluido, das

dimensões da partícula, assim como, da massa específica e viscosidade do ar de secagem. Estes parâmetros são inter-relacionados através do número de Reynolds de partícula, o qual caracteriza o escoamento. A situação é análoga quando se considera uma partícula de forma cilíndrica e a Figura 1.1 pode ser analisada sob o ponto de vista de um corte transversal lateral no cilindro de seção circular, com o seu eixo perpendicular à direção de escoamento do ar.

Tendo em vista o desafio dos estudos sobre a secagem de sementes que apresentam capa protetora, torna-se importante a condução de testes experimentais de secagem via a estrutura do material, uma vez que existe dificuldade de se obter soluções analíticas ou numéricas dos modelos de secagem que representam o comportamento para materiais deste tipo. A busca de informações para se determinar parâmetros das equações fenomenológicas são de grande importância uma vez que as mesmas são base para a elaboração de projetos e simulação de secadores (MASSARANI & TELLES, 1992).

Assim, tem-se o intuito de contribuir com os estudos sobre o comportamento deste tipo de partícula na secagem por convecção forçada. Além disto, espera-se ampliar os conhecimentos sobre os fatores que influenciam na preservação desta leguminosa. Para tanto, apresentam-se a seguir os objetivos e as etapas cumpridos neste trabalho.

## **1.5 Objetivos**

Tendo em vista que a secagem de vagens é uma boa estratégia para a manutenção da qualidade do amendoim e que o invólucro existente neste material apresenta resistências às transferências de calor e massa, tornando-o diferenciado na secagem convectiva, os objetivos deste trabalho consistem em analisar a secagem de amendoim em relação ao transporte de umidade e encolhimento, assim como a influência sobre as qualidades físicas e fisiológicas quando este material é submetido a um secador de convecção forçada. Além de avaliar a relação entre o sistema composto (fruto) e os subsistemas, sementes com e sem endocarpo, além do pericarpo.

## 1.6 Etapas

De forma a atingir estes objetivos foi necessária a realização de um planejamento de ações, ou seja:

- Coletar o amendoim diretamente do solo em campo, selecionar e padronizar as partes quanto ao tamanho e forma geométrica;
- Estabelecer as condições operacionais da unidade de secagem e a posição das amostras na câmara de secagem, com o eixo do cilindro perpendicular ao escoamento do fluido, para o pericarpo e para o fruto. No caso das sementes, que apresentam geometria próxima à esférica, avaliar o posicionamento dos cotilédones em direções paralelas e perpendiculares à direção do escoamento do ar de secagem;
- Com base em um planejamento experimental, realizar testes de secagem da semente com e sem o endocarpo, do pericarpo e do fruto e fazer a análise da reprodutibilidade dos dados;
- Obter a cinética de secagem em diferentes velocidades e temperaturas do ar de secagem para as sementes com e sem o endocarpo, do pericarpo e do fruto, além de avaliar o efeito da presença das barreiras físicas;
- Analisar os fenômenos de encolhimento e de evolução da forma de cada amostra durante a secagem, a partir da análise de imagens fotográficas obtidas durante o período de secagem;
- Realizar as avaliações das qualidades físicas e fisiológicas, antes e após o processo, com intuito de se obter informações em relação aos efeitos imediatos do processo de secagem;
- Através dos dados obtidos, fazer a análise das interações entre as qualidades do produto e o processo de secagem, visando à busca da melhor relação entre o binômio processo e qualidade, e

- Com base nos resultados realizar a discriminação das equações utilizadas para materiais orgânicos, tendo em vista obter a melhor equação que represente a curva característica de secagem para efeito de produção de sementes na agricultura.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

No decorrer deste capítulo serão apresentados os principais estudos sobre a secagem de amendoim, a fim de caracterizá-lo para a produção de sementes, considerando os aspectos gerais do mesmo frente às funções de suas partes, como por exemplo, a proteção dada à semente pelo pericarpo (casca). Serão abordados, também, os aspectos da secagem do mesmo considerando os métodos natural e artificiais. Além disto, algumas considerações serão feitas sob o ponto de vista da abordagem do escoamento de fluido sobre corpos submersos, levando em conta o fenômeno de encolhimento da partícula, bem como, os aspectos sobre a cinética da secagem e os fatores que influenciam a secagem por meio de convecção forçada. Ao final, encontram-se reunidos os aspectos relevantes que relacionam a qualidade do amendoim sob o enfoque da fisiologia e desenvolvimento de sementes e no tocante à caracterização física do produto.

#### **2.1 Generalidades do Amendoim**

A cultura do amendoim originou-se na América do Sul e hoje é difundida em todos os continentes. No Brasil encontra-se uma área cultivada de 105.300 hectares com uma produção de aproximadamente 243.900 toneladas. Sendo que o Estado de São Paulo é responsável por aproximadamente 75% desta produção, segundo informações do CONAB (2008). Este material apresenta uma capa protetora que envolve o núcleo, cuja descrição e utilização serão descritos mais adiante.

### 2.1.1 Descrição

O grão de amendoim é a parte comestível da planta *Arachis hipogae L.*, a qual pertence à família Leguminasea. Consiste de uma dicotiledônea que apresenta um processo de frutificação denominado de geocarpia em que uma flor aérea, após ser fecundada, produz um fruto subterrâneo. Suas flores são amarelas, agrupadas em número variável ao longo do ramo principal ou também dos ramos secundários, conforme a variedade ou o tipo vegetativo. Todas são potencialmente férteis e hermafroditas, autógamias, com baixa porcentagem de cruzamentos naturais. Além disto, são consideradas sementes ortodoxas (PASSOS *et al.*, 1987).

O fruto é formado pela capa protetora, denominada de pericarpo, e constituído de epicarpo, mesocarpo e endocarpo. É popularmente conhecido por casca, cuja função é proteger o núcleo, constituído pelo sistema embrionário ou de formação, o qual dará origem ao tecido meristemático que posteriormente formará um novo fruto.

O núcleo é revestido por uma película vermelha, também formado pelo epicarpo, mesocarpo e endocarpo, e conhecido por película vermelha e para efeito didático será denominada de endocarpo. Na Figura 2.1 encontram-se reunidas fotos de amendoim que permitem observar as principais partes constituintes do fruto da *Arachis hipogae L.*, bem como, a disposição destes componentes em relação a esta mistura heterogênea.

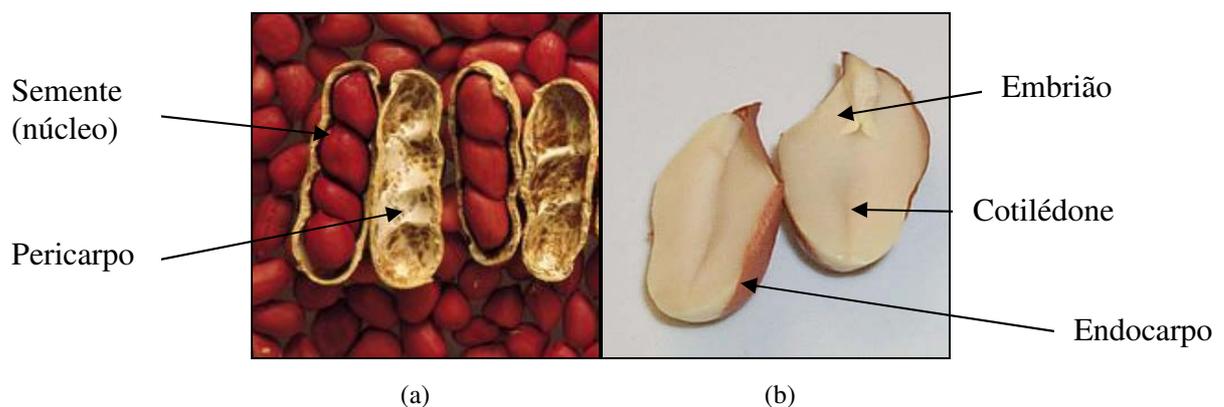


Figura 2.1: Principais partes do fruto da *Arachis hipogae L.* (a). Corte longitudinal da semente do amendoim (b).

O pericarpo e o endocarpo, Figuras 2.1 (a) e 2.1 (b), respectivamente, correspondem aos tegumentos, sendo o primeiro o tegumento do fruto e o segundo o que

delimita a semente propriamente dita. Estes tegumentos apresentam diversas funções segundo Carvalho e Nakagawa (1988) que são descritas a seguir:

- mantêm unidas as partes internas das sementes;
- protegem os tecidos meristemáticos e de reserva contra choques e abrasões;
- servem de barreiras à entrada de microorganismos e insetos;
- regulam a velocidade de hidratação da semente, diminuindo os possíveis danos causados pelas pressões desenvolvidas durante a embebição;
- regulam a velocidade de trocas gasosas entre as sementes e o meio circundante, e
- regulam a germinação, pelo mecanismo de dormência, em certas condições.

Já os cotilédones, Figura 2.1 (b) são formados pelo tecido de reserva da semente, fornecendo durante o processo de germinação, a energia necessária para o desenvolvimento do eixo embrionário e por conseqüência a emergência da nova plântula.

O eixo embrionário é considerado como sendo a parte vital da semente, por apresentar a capacidade de desenvolvimento, através de divisões celulares, e crescimento do eixo nos dois sentidos, o das raízes e o do caule. E, assim, promover o desenvolvimento de uma nova cultura de boa qualidade importante em diferentes tipos de aplicação, em setores como indústria química, alimentícia e na agricultura.

### **2.1.2 A Diversidade da Utilização do Amendoim**

O amendoim é uma leguminosa que apresenta grande importância no aspecto sócio-econômico e ambiental. Por exemplo, no estado de São Paulo, utiliza-se o mesmo no rodízio de culturas para a fixação de nitrogênio no solo. Para o caso de canaviais está fixação representa ao ano aproximadamente 30% do necessário para a lavoura (EMBRAPA, 2008). Contribuindo desta forma para a diminuição do consumo de fertilizantes e por conseqüência minimizando os problemas ambientais oriundos do seu uso excessivo. Além disto, a casca é

utilizada como combustível em fornalhas e caldeiras como fonte de energia renovável (GERIN *et al.*,1996).

Um outro fator a ser mencionado é a grande importância do amendoim para a indústria alimentícia, devido ao sabor agradável que os grãos apresentam, além de ser um produto altamente calórico com 45g de gorduras, 27g de proteínas, 17g de carboidratos, 11g de sais de minerais, totalizando assim um produto com 576 calorias por 100g de matéria seca (CARVALHO & NAKAGAWA,1988).

O amendoim apresenta alto teor de gordura e por isto é utilizado para a extração de óleo comestível, o qual foi classificado por Lewkowitzsh em comunicado à Sociedade de Química Industrial de Londres como sendo de fina qualidade (PASSOS *et al.*,1987). É considerado de fácil digestão, e por isto recomendado às pessoas portadoras de moléstias do aparelho digestivo, tendo valor nutritivo equivalente ao de outras gorduras empregadas na alimentação, sejam vegetais ou animais (PASSOS *et al.*,1987).

Conforme Passos *et al.* (1987), além do emprego na alimentação, o óleo do amendoim também é utilizado na indústria pesqueira como, por exemplo, para cozimento de sardinhas. Quando apresenta um alto teor de pureza, é usado para fins medicinais e farmacêuticos, principalmente como veículo para emulsão de produtos injetáveis. O óleo de segunda, ou seja, o não refinado, serve como combustível das lâmpadas de mineiros, por exemplo. Quando neutro, usa-se como lubrificante. Trata-se também de uma excelente matéria-prima para a indústria de saboaria.

Após a extração do óleo, obtém-se do amendoim, um subproduto de elevado valor comercial, a torta, o qual é utilizado na alimentação de bovinos, como ração, devido ao alto valor protéico (DALBELLO,1995). A riqueza nutritiva das tortas depende da qualidade das sementes e do método utilizado na extração do óleo. Sendo que, as tortas provenientes da extração de óleo pelo método a frio são mais nutritivas do que as conseguidas pelo aquecimento ou com o uso de solventes (PASSOS *et al.*, 1987).

Existem também diversas variedades de amendoim, entre as quais se destaca a tatu, a qual apresenta vagens com predominância de três ou quatro sementes, película vermelha no endocarpo, Figura 2.1 (a), e peso de aproximadamente 0,45g. Seu ciclo vegetativo, ou seja, do momento do plantio até a colheita, é de 90 a 120 dias dependendo da região e das condições climáticas. No estado de São Paulo, por exemplo, a semeadura é feita nos meses de setembro e outubro, com colheita em janeiro e fevereiro (PASSOS *et al.*, 1987).

O momento da colheita ocorre quando as vagens do amendoim apresentam maturidade fisiológica. Neste momento, o teor de umidade do fruto encontra-se entre 35 a 50% de umidade em base úmida (b.u.), a qual precisa ser reduzida em torno de 10% (b.u.). Quando o amendoim encontra-se nesta faixa de umidade (35 a 50%b.u.) o produto torna-se vulnerável à contaminação da aflatoxina, uma mitoxina causadora de câncer, sendo produzida pelos fungos *Aspergillus flavus* e *Aspergillus parasiticus*, como observado por Krzyzanowski *et al.* (2006) e Alves (1995).

Diante disto, o amendoim necessita passar por um processo de secagem para que esta umidade seja reduzida antes de ser classificado, armazenado e comercializado. Este processo é de fundamental importância, visto que é uma etapa decisiva para se obter um produto de boa qualidade.

Entretanto, o processo de secagem deve ser realizado de forma adequada, uma vez que, nem todas as vagens ficam maduras na época da colheita devido à floração se estender por um longo período. Durante este período há uma contínua formação de vagens que pode prejudicar a conservação do produto em caso de secagem incompleta ou inadequada (CANECCHIO,1987).

Os estudos de secagem desta partícula apresentam grande desafio frente à engenharia de secagem devido às distintas características do amendoim. O fruto é formado por uma mistura heterogênea em que as sementes e os tegumentos apresentam diferentes composições e higroscópica. Desta forma a busca de informações sobre a interação da partícula em contato com o fluido de secagem torna-se necessária. Tais buscas podem ser perfeitamente realizadas em unidades experimentais de secagem de forma a desprezar os efeitos de impactos mecânicos e os da presença de outras partículas na sua vizinhança, efeitos causados pela secagem em leitos fixos ou móveis. Enfoque que será aprofundado no próximo item com embasamento nos estudos pertinentes à secagem do amendoim.

## 2.2. Secagem do Amendoim

Visto a grande importância da secagem do amendoim para a produção e conservação da semente, este item apresentará os aspectos gerais da secagem, sob uma visão do processo que envolvem as transferências simultâneas de calor e massa entre as fases sólida e fluida e a busca por um produto de boa qualidade, ou seja, que apresente alto valor agregado. Além disto, serão apresentados os avanços da secagem do amendoim sob diferentes pontos de vista entre os grupos de pesquisadores.

### 2.2.1 Aspectos Gerais da Secagem

Muitos estudos têm sido realizados em relação ao processo de secagem. Entretanto, existem ainda lacunas a respeito deste processo industrial, principalmente devido à complexidade dos materiais a serem secos. Diante deste desafio a busca de informações através de dados experimentais torna-se importante para se obter o conhecimento do material, assim como do secador. Com estas informações é possível implantar melhorias no dimensionamento de equipamentos e aumentar a eficiência relacionada aos mecanismos de transferência de calor e massa. Desta forma, visa-se obter um produto de boa qualidade em padrões pré-estabelecidos, após o mesmo passar pelo processo de secagem (KEEY, 1980).

Segundo Amaral & Dalpasquale (2001), a secagem é um processo artificial, mecânico ou térmico, destinado a remover o excesso de água, levando o produto a um padrão exigido por cada espécie, com responsabilidade de minimizar as alterações das propriedades físicas, químicas e biológicas após a secagem. É considerada uma operação unitária essencial entre certas plantas industriais, como exemplo na produção de sementes, que atendem às questões da agricultura moderna (FUSCO *et al.*, 1991). Além disto, tem-se que de 10 a 25%, da energia consumida nos processos industriais é destinada às operações de secagem, indicando a sua importância na relação custo e benefício da produção (MUJUNDAR, 2006).

O processo de secagem das sementes pode ser realizado pelo método natural ou artificial. Entretanto, o método natural é ainda muito utilizado pelos agricultores, sendo que a umidade do produto é removida pela incidência da radiação solar na superfície da partícula, que se encontra em campos ou em grandes terreiros. A fim de acelerar o processo e homogeneizar o produto, o mesmo é revolvido, o que justifica a necessidade de grande mão-de-obra. Embora apresente baixo custo, tanto na instalação como no consumo de energia, este método não é recomendado pelo fato do material ficar exposto às ações climáticas, muitas vezes não favoráveis ao processo.

A secagem artificial, dita convectiva, por sua vez, é uma técnica na qual o produto úmido é submetido em um secador à ação de uma corrente de ar forçada e aquecida, sendo possível a regulação do sistema de aquecimento e propulsão do fluido de secagem.

Baseada na capacidade de fornecer calor e na necessidade de aumentar a temperatura do ar, a secagem convectiva artificial pode ser dividida em duas categorias em termos de aquecimento do ar: secagem em baixa temperatura na qual se utiliza o ar natural ou aquecido de 1 a 8°C acima da temperatura ambiente e secagem em alta temperatura, que consiste em aquecer o ar a temperaturas iguais ou superiores a 10°C acima da temperatura ambiente. Todas estas situações são baseadas nas condições climáticas brasileiras.

Embora a secagem em baixas temperaturas tenha grandes vantagens, como o mínimo manuseio dos grãos e sementes, manutenção da qualidade do produto e apresentar uma alta eficiência, por utilizar a energia do ar atmosférico, ela traz também desvantagens com relação ao limite do teor de umidade inicial do produto, além de ser um processo lento, conforme descrito por Queiroz & Perreira (1982).

Já a secagem artificial em altas temperaturas é um processo rápido em relação ao anterior e menos dependente das ações atmosféricas locais, permitindo baixar rapidamente o teor de umidade dos produtos agrícolas colhidos com umidade acima de 20% b.u.. Permite oferecer condições operacionais adequadas para a preservação das qualidades nutricionais, fisiológicas e organolépticas dos produtos por longos períodos de armazenamento (DALBELLO, 1995).

Independente do tipo de secador utilizado no processo, a secagem artificial apresenta grande importância para a conservação de produtos agrícolas, principalmente na safra de chuva, onde o produto é colhido em períodos chuvosos, não tendo desta forma, condições adequadas para que o produto passe pela secagem através do método natural. Além

disto, a secagem artificial proporciona o aumento da produção, permitindo que os agricultores tenham um maior retorno econômico e segurança no processamento pós-colheita. Como por exemplo, na comercialização, onde de fato podem ser viabilizados seus lucros.

Dentre os diversos tipos de secadores, a opção do convectivo vem se tornando a cada dia mais importante e difundido diante da sua utilização para reduzir a umidade de produtos agrícolas, principalmente, grãos e sementes. Entretanto, a maioria destes apresentam dificuldades com relação à qualidade do produto, frente à temperatura utilizada para o processo e quanto aos impactos mecânicos causados quando leitos móveis, são utilizados.

Diante do exposto e visando adquirir informações em relação à secagem de amendoim, têm-se na seqüência os principais trabalhos encontrados na literatura a respeito desta leguminosa de forma a apresentar os avanços no tocante ao processo de secagem convectiva.

### **2.2.1 Avanços da Secagem do Amendoim**

Conforme já mencionado, o amendoim apresenta uma grande diversidade de utilização e devido aos danos causados pelo alto teor de umidade do fruto (35 a 50% b.u) no momento da colheita, este material precisa passar pelo processo de secagem, podendo ser realizado de diversas formas. Independente do método a ser usado, seja pelo método natural ou artificial, busca-se sempre um produto de boa qualidade, tanto para o consumo como alimento ou para a produção de uma nova plântula.

Neste sentido inúmeros trabalhos foram localizados na literatura (TRAVAGLINI & TANGO, 1965; KUNZE *et al.*, 1968; CHIOU *et al.*, 1992; NOOMHORM *et al.*, 1994; DALBELLO, 1995; ALVES, 1995; FERNANDEZ & ROSOLEM, 1998; ERTAS *et al.*, 1999; PALACIOS *et al.*, 2004; ROSSETTO *et al.*, 2005; KRZYZANOWSKI *et al.*, 2006). No Quadro 2.1 encontram-se agrupados os principais trabalhos de forma a obter uma visão geral dos avanços nas pesquisas que tratam da secagem desta partícula.

Quadro 2.1: Principais trabalhos encontrados na literatura sobre a secagem de amendoim (*Arachis hipogae* L.)

Autor	Método de Secagem/Tipo de Secador	Partes do amendoim estudadas	Avaliação da Qualidade	Condições operacionais
Travaglini e Tango (1965)	Métodos natural e artificial/Tipo bandeja	Fruto	Fisiológica, estabilidade do óleo e aspectos externos*	T = 50, 55, 60, 65, 70, 75 e 80°C V não é mencionada
Kunze <i>et al.</i> (1968)	Método artificial/A vácuo	Fruto	Fisiológica e nível de aflatoxina	T = 54,4 e 65,5°C com diminuição gradativa da temperatura até 33°C V não é mencionada
Noomhorm <i>et al.</i> (1994)	Métodos natural e artificial/Secador rotativo	Fruto	Aspectos externos* e nível de aflatoxina	T = 70, 90°C Número de rotações = 3 e 8 rpm Taxa de alimentação = 5 e 7 kg/min
Dalbello (1995)	Métodos natural e artificial/Secador de leito fixo	Fruto	Aspectos externos* e eficiência do secador	T = 40, 45 e 60°C Fluxos de ar = 12,5; 18 e 25 m <sup>3</sup> de ar/min.m <sup>2</sup> Altura da camada = 0,5 e 1,0 m Umidade inicial = 18,5 e 12,0% (b.u.)

..... Continua

...Continuação

Alves (1995)	Método natural e artificial/Secador de camada fixa	Fruto	Efeito da armazenagem no nível de aflatoxina, em sacos plásticos e aniagem	T = 40°C Fluxos de ar = 12,5 e 25m <sup>3</sup> de ar/min.m <sup>2</sup> Alturas das colunas = 0,5 e 1m
Ertas <i>et al.</i> (1999)	Método artificial/Secadores tipo semi-trailers	Fruto	Características externas* e eficiência do secador	T = 35°C
Palacios <i>et al.</i> (2004)	Método artificial/Secador de leito fixo	Fruto e semente	Avaliação do processo	T = 20, 28, 34 e 42°C V não é mencionada
Krzyzanowski <i>et al.</i> (2006)	Método artificial/ HPT- “heat pipe technology”	Fruto	Fisiológica e eficiência do secador	T ambiente não especificada e baixa umidade relativa do ar de secagem também não especifica

\* Os aspectos externos se referem à película solta, escurecimento dos cotilédones e rachaduras no pericarpo.

A partir deste apanhado, apresentado no Quadro 2.1, observa-se que existe uma grande busca no sentido de se determinar o melhor método de secagem do amendoim, visto que muitos dos estudos comparam os métodos natural e artificiais, relacionado com a qualidade do produto.

O método natural da secagem de amendoim tem sido muito estudado, embora não recomendado pelo fato de expor o produto à ação de agentes biológicos e condições climáticas adversas por longos períodos. Desta forma pode acarretar grande variação no teor de umidade contida nos grãos, dificultando uma melhor sincronização da colheita, e por consequência elevadas perdas de produção, além de apresentar tempo de secagem maior quando comparado com o método artificial (DALBELLO, 1995).

No caso da secagem artificial do amendoim a influência das condições operacionais ainda precisam ser melhores conhecidas, principalmente no que diz respeito aos efeitos causados pela temperatura.

De maneira geral os autores não recomendam, conforme apresentado anteriormente, a secagem muito rápida, ou seja, em altas temperaturas, uma vez que as mesmas podem acarretar a torração do produto, enrugamento e rachadura na casca e película das sementes. Por outro lado, a secagem muito lenta, com pouca troca térmica entre o sólido e o fluido, também não é recomendada, uma vez que poderá causar a formação de bolores, descoloração e rancificação das sementes, além de provocar um sabor desagradável.

Em relação aos efeitos das condições operacionais sobre o nível de aflatoxina, os estudos mencionam que nas condições utilizadas nos respectivos estudos, a mitoxina causadora do câncer, não foi constatada após o processo de secagem, permitindo assim o consumo do grão para fins alimentícios (KUNZE *et al.*, 1968, NOOMHORM *et al.*, 1994; ALVES, 1995).

Quanto à qualidade fisiológica das sementes, existem ainda controvérsias na utilização das condições operacionais, principalmente quando se trata da temperatura utilizada. Dentre as divergências dos diferentes grupos de pesquisas, têm-se Travaglini & Tango (1965) que não recomendam o processo de secagem em temperaturas acima de 50°C, quando se deseja obter sementes de boa qualidade fisiológica. Os autores afirmam que o poder germinativo das sementes de amendoim secos dentro do pericarpo (fruto) torna-se prejudicado nesta condição. Entretanto, Kunze *et al.* (1968) mencionam que o poder germinativo das sementes não é prejudicado com temperaturas entre 37,8 e 54,4°C, desde que

o processo de secagem seja rápido, no sentido de tempo de residência do material no secador. Para a secagem de sementes destinadas ao replantio, geralmente não se recomendam temperaturas acima de 45°C.

Dentre os trabalhos apresentados no Quadro 2.1, pode-se constatar que todos são realizados em leitos fixos ou móveis. Desta forma, os efeitos dos impactos mecânicos ou a presença de outras partículas nas vizinhanças de cada partícula não são eliminados e assim nota-se que informações sobre a interação deste tipo de partícula em contato com o fluido de secagem é ainda escassa na literatura.

Este conhecimento é de suma importância quando se busca a implementação de melhoria nos projetos e na operação dos equipamentos de secagem, os quais muitas vezes, não são possíveis devido às dificuldades de se obter uma solução analítica ou numérica do modelo matemático do sistema utilizado para projetar e implantar tais melhorias nos equipamentos de secagem (MASSARANI & TELLES, 1992). Esta dificuldade é devida, principalmente, à complexidade estrutural dos materiais compostos por misturas heterogêneas, como no caso do amendoim.

Além disto, deve-se levar em consideração que os parâmetros das equações utilizadas para descrever a cinética de secagem, a qual permite prever melhorias no desenvolvimento e inovação de equipamentos, apresentam uma dependência em relação à condição de operação na unidade de secagem. Isto faz com que a aplicação das mesmas fiquem restritas à faixa de condições operacionais nas quais foram estimadas, ou seja, no domínio de cada investigação experimental. Assim, torna-se importante a busca de informações acerca de dados cinéticos não disponíveis na literatura. Sendo esta inevitável, à medida que a secagem de alguns materiais se faz necessária fora dos limites de aplicação destas equações.

### **2.3 Representação da Cinética de Secagem**

Visando à busca de melhorias da secagem convectiva de amendoim para fins de replantio, torna-se necessário conhecer os fenômenos simultâneos de transferência de calor

e massa, entre as fases sólida e fluida, envolvidos durante o processo de redução de umidade da partícula formada por núcleo e capa protetora. Os mesmos apresentam grande complexidade, assim como, a estrutura do material, dificultando o projeto e a seleção de secadores.

Para tanto, a compreensão destes fenômenos depende de investigações a partir de estudos específicos frente à cinética de secagem, que permite através de dados da umidade do material em função do tempo de secagem, conhecer os mecanismos predominantes na transferência de massa do material para o fluido. Além disto, possibilita estabelecer as equações da umidade em função do tempo de secagem para diferentes períodos de taxa de secagem a qual deve ser relacionada para um determinado produto e para uma determinada operação (processo e equipamento).

No período de taxa constante, apresentado durante o processo de secagem para alguns materiais, a água se comporta como se fosse água livre evaporando, à temperatura de bulbo úmido. Neste caso, as transferências de calor e massa sofrem resistências da corrente de ar e a taxa de evaporação da água não se altera em função tempo (MUJUNDAR, 1995).

A duração do período constante depende dos coeficientes de transferência de calor e massa, área exposta, geometria, diferenças de temperaturas, velocidades e umidades entre o fluido de secagem e a superfície do sólido, além da constituição do próprio material a ser seco. O término deste período é alcançado, quando a migração interna de água para a superfície não consegue mais suprir a taxa de evaporação da água livre da superfície, sendo o valor de umidade deste estado denominado de umidade crítica (FORTES & OKOS, 1980).

Grãos de oleaginosas raramente apresentam o período de secagem à taxa constante, a não ser que sejam colhidos imaturos ou passem por algum processo de umidificação excessiva (BROOKER *et al.*, 1992). Diante disto, é de se esperar que o conhecimento dos mecanismos internos de transferência de umidade apresente grande importância na análise do processo de secagem (BARROZO, 1995).

O período de taxa decrescente inicia quando a migração da umidade começa a controlar o processo de secagem, podendo ser constituído por duas ou mais fases, nas quais são propostos vários mecanismos para descreverem a transferência de umidade em produtos capilares porosos, entre as quais tem-se: escoamento capilar do líquido, difusão do vapor devido à diferença de concentração, difusão térmica de vapor, difusão de Knudsen e movimento do líquido e vapor devido à diferença de pressão total (PINTO, 1996;

SENADEERA, 2003). Entretanto, são várias as restrições para a aplicação destes mecanismos na secagem de grãos. Fortes & Okos (1980) descrevem minuciosamente estas teorias.

Na literatura são encontradas várias equações empíricas e semi-empíricas para descrever a curva característica da cinética de secagem de sementes. Geralmente, os estudos têm como objetivo a busca da representação da cinética de secagem que melhor se ajuste aos dados experimentais e, assim, obter as equações de taxa de secagem para utilização na modelagem do problema (MASSARANI & TELLES, 1992). A Tabela 2.1 reuni as equações de secagem convectiva semi-empíricas mais utilizadas na literatura para materiais orgânicos.

Tabela 2.1: Equações de secagem utilizadas para a representação de materiais orgânicos.

Equação	Referência
$MR = \exp(-Kt) \quad (2.1)$ <p>onde, <math>K = A \exp\left(\frac{-B}{T_f}\right)</math></p>	Lewis (1921)
$MR = C \exp(-Kt) \quad (2.2)$ <p>onde, <math>K = A \exp\left(\frac{-B}{T_f}\right)</math></p>	Brooker <i>et al.</i> (1974)
$MR = C \left[ \exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-9Kt) \right] \quad (2.3)$ <p>onde, <math>K = A \exp\left(\frac{-B}{T_f}\right)</math></p>	Henderson & Henderson (1968)
$MR = \exp(-Kt^n) \quad (2.4)$ <p>onde, <math>K = A \exp\left(\frac{-B}{T_f}\right)</math></p>	Page (1949)
$MR = \exp[-(Kt)^n] \quad (2.5)$ <p>onde, <math>K = \exp\left(A + \frac{B}{T_f}\right)</math></p>	Overhults <i>et al.</i> (1973)
$MR = a \cdot \exp\left[-K_1 \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{T_f}\right) \cdot t\right] + b \cdot \exp\left[-K_2 \cdot \exp\left(-\frac{E_2}{T_f}\right) \cdot t\right] \quad (2.6)$	Srzdenicki <i>et al.</i> (1996)
$MR = \frac{\omega}{[1 + (\omega - 1) \cdot \exp(-\omega \cdot \tau)]} \quad (2.7)$ <p>onde, <math>\tau = \alpha \cdot V_{sp} \frac{(M_0 - M_{eq})}{m_{ss}} \cdot t</math>; <math>\omega = \frac{\beta}{\alpha} \frac{-M_{eq}}{M_0 - M_{eq}}</math>; <math>\alpha = a_1 + a_2 \cdot T_f</math>; <math>\beta = b_1 + b_2 \cdot T_f</math></p>	Mancini (1996)

A Equação 2.1, apresentada na Tabela 2.1. foi proposta por Lewis (1921) em analogia à lei de resfriamento de Newton a qual estabelece uma proporcionalidade entre a taxa de secagem e o teor de água livre contida na partícula. As Equações 2.3 e 2.4 são simplificações da solução analítica do modelo difusivo, onde somente o primeiro e o segundo termos da série são considerados, respectivamente (BROOKER *et al.*, 1992; BARROZO, 1995). As Equações de Page (1949), Equação 2.4, e de Overhults *et al.* (1973), Equação 2.5, são oriundas de modificações empíricas da equação de Lewis (1921), Equação 2.1.

A Equação 2.6 usada por Srzdenicki *et al.* (1996) apresenta uma função composta por dois termos do tipo Arrhenius. Já a Equação 2.7 foi desenvolvida com base no modelo a duas fases e considera o coeficiente volumétrico global de transferência de massa como linearmente dependente da temperatura.

O parâmetro K apresentado nas equações mencionadas, denominado de constante de secagem, é uma propriedade fenomenológica representativa de vários fenômenos de transporte que ocorrem durante a secagem. Nas Equações 2.1 a 2.4, o parâmetro K varia com a temperatura segundo uma função do tipo Arrhenius que será discutida mais adiante, já para a Equação 2.5 (Overhults, 1973) a função que representa tal variação é diferente.

O confronto destas equações para diferentes materiais e condições operacionais tem sido estudado por vários autores, isto faz com que aumente os limites de uso de acordo com os resultados obtidos. No entanto, para as sementes que apresentam barreiras físicas os limites de uso das equações da taxa de secagem devem levar em consideração o comportamento de cada uma das barreiras frente à cinética de secagem, e no caso do amendoim estas informações ainda não são suficientes na literatura.

Segundo um grupo de pesquisadores constituído por Colson e Young (1990), Brooker *et al.* (1992) e Palacios *et al.* (2004), as equações utilizadas para representar as cinéticas de secagem de oleaginosos e de sementes que apresentam capa protetora exigem estudos específicos para cada material.

O conhecimento do comportamento das partículas, bem como, das limitações do processo para um determinado produto permite avaliar, projetar e/ou otimizar o processo de secagem, tornando possível a avaliação do tempo de secagem, sendo os dados experimentais insubstituíveis quando se quer estudar a secagem de materiais biológicos (KEEY 1980).

Entre as sementes oleaginosas, Barrozo (1995) realizou um estudo de discriminação de equações para descrever a secagem de sementes de soja em camada fina, tanto em leitos fixo como em deslizante. A partir de técnicas estatísticas de não linearidade, o autor verificou entre as equações avaliadas que a equação de Overhults *et al.* (1973) foi a que melhor descreveu a cinética de secagem de sementes de soja, para ambos os leitos, nas condições estudadas.

Para sementes que apresentam coberturas naturais de mucilagem, Prado (1999) constatou que para a secagem de sementes de mamão a equação que melhor descreve a cinética de secagem é a de Page (1949). O autor atribui as péssimas correlações entre os dados experimentais e as outras equações de secagem ao fato dos parâmetros destas mostrarem somente influência com a temperatura, negligenciando assim o pronunciado efeito da velocidade sobre o comportamento de secagem de sementes de mamão papaia nas condições estudadas.

Segundo Azzouz *et al.* (1998), a adição do expoente  $n$ , nestas equações, torna a equação exponencial teórica em uma puramente empírica. Neste caso, o parâmetro apresentado pela equação de Page (1949) possui um efeito de moderação do tempo e corrige os possíveis erros resultantes da negligência da resistência interna para a transferência de umidade fato que também pode explicar o porquê da equação de Page (1949) se ajustar melhor aos dados obtidos por Prado (1999).

Para sementes de urucum, as equações de Thompson *et al.* (1968), Page (1949) e Henderson & Hendersom. (1968) são as que melhor representam o comportamento do processo de variação do conteúdo de umidade das sementes em função do tempo, podendo então ser consideradas como representativas das variabilidades dos dados experimentais (GUEDES *et al.*, 2000).

Diante do exposto e visando minimizar e até mesmo eliminar os efeitos mecânicos causados pela secagem convectiva em leitos de sistemas particulados, tem-se que há, ainda, uma grande necessidade por buscas de informações. Estas referem-se ao comportamento de cada parte desta partícula sob a visão de fenômenos de transporte quando a mesma é submetido em um secador de convecção forçada. Com base nisto, pode-se recorrer à colocação do problema, baseado no escoamento de fluido sobre corpos submersos.

## 2.4 Escoamento de Fluido sobre Corpos Submersos

Como mencionado no Capítulo 1, o amendoim pode ser tratado como uma mistura heterogênea, composta principalmente por pericarpo, endocarpo e núcleo. Fazendo-se uma aproximação, pode-se considerá-lo com geometria próxima à cilíndrica quando se trata do fruto e com geometria próxima à esférica, quando se refere à semente isolada. Sendo assim, é possível observar o comportamento destas partículas frente ao escoamento de fluido sobre corpos submersos.

Desta forma, quando um corpo esférico é submerso em um fluido, com velocidade,  $V_f$ , ocorrem fenômenos de interações entre a partícula e o fluido durante o processo de secagem por meio de convecção forçada. Dentre estes, tem-se principalmente a formação da camada limite sobre o corpo, conforme pode ser verificado no esquema da Figura 1.1, que representa o escoamento do fluido através de uma esfera submersa, geometria relacionada às sementes isoladas. A Figura 1.1, também, pode representar o escoamento de fluido através de um corte transversal lateral de um cilindro de seção circular. Neste caso, quando se trata do fruto e do pericarpo com eixo perpendicular ao escoamento.

Durante este processo de secagem, o fluido que escoar na direção da esfera é trazido em repouso no ponto de estagnação (Figura 1.1) causando um aumento de pressão, onde ocorre uma rápida desidratação. Este campo de pressão também é perceptível por outras partículas do fluido, entretanto, não atingem a velocidade zero em relação ao corpo, uma vez que não se encontram diretamente com a superfície da esfera, mas são desviadas e sofrem a ação das forças viscosas, dando origem ao aumento da espessura da camada limite fluidodinâmica e térmica.

Devido à curvatura que o corpo apresenta, as partículas do fluido aceleram-se fazendo a pressão diminuir ao longo do escoamento. Porém, a pressão volta a aumentar e a velocidade a diminuir, quando atingem o ponto de mínima pressão e máxima velocidade (BRAGA FILHO, 2004).

O perfil de velocidade existente nesta camada limite será responsável pelo aparecimento de uma tensão cisalhante sobre a superfície da esfera gerando uma força de interação entre o fluido e a partícula. O fluido adjacente a esta camada precisa mudar de

direção para contornar o corpo, sendo este fato uma contribuição para o aumento desta força de interação entre o fluido e a partícula, além das ondas que se formam na parte posterior (vórtices) deste corpo, consequência da separação da camada limite da superfície da esfera em um determinado ponto desta camada, conforme pode ser observado na Figura 2.2.

O ponto de separação da camada limite ocorre quando o gradiente de velocidade na superfície se anula, ou seja, na condição:

$$\left. \frac{\partial V_f}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (2.8)$$

o qual está apresentado no esquema da Figura 2.2.

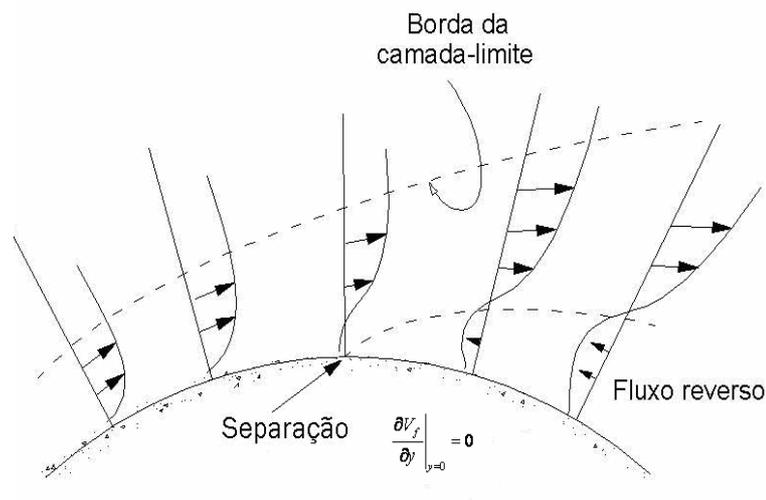


Figura 2.2: Esquema da camada limite em uma esfera próximo ao ponto de separação (KREITH, 2003)

Os fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa geram diferentes coeficientes de transferência de calor e massa por convecção na superfície da esfera, e assim conduzem a uma secagem não uniforme. Além disto, os gradientes de umidade, mais acentuados na parte posterior, causam o surgimento de tensões internas que promovem a ruptura do material, deteriorando sua integridade física (KREITH, 2003).

A não uniformidade da secagem tem como principal fator, o ponto de separação da camada limite. Sendo que quanto mais afastada esta separação ocorrer do ponto

de estagnação menor será a deterioração das características físicas do produto devido ao menor número de gradientes diferenciados que se formarão.

O ponto de separação da camada limite está relacionado com o número adimensional de Reynolds de partícula, que é uma combinação da velocidade do fluido, do diâmetro da partícula, da massa específica e viscosidade do ar de secagem. Esta combinação consiste em uma relação entre as forças inerciais e as forças viscosas conferidas pelo fluido em movimento (ARRIECHE, 2007).

A evolução do regime de escoamento do fluido em torno de um corpo de geometria esférica pode ser observada na Figura 2.3. Quanto maiores as forças inerciais em comparação às forças viscosas, mais rápida ocorrerá a separação da camada limite, entretanto em valores do número de Reynolds de partícula menores que 1, região correspondente à região de Stokes, praticamente não se observa esta separação, verificando desta forma a predominância das forças viscosas conferidas pelo fluido (BIRD *et al*, 2004; BRAGA FILHO, 2004).

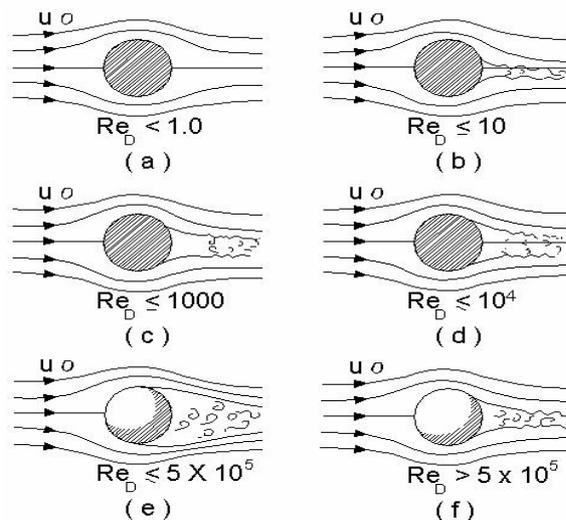


Figura 2.3: Evolução do regime de escoamento em função do número de Reynolds de partícula (BRAGA FILHO, 2004).

Entre os trabalhos mais recentes que avaliam o comportamento do escoamento de fluido sobre corpos esféricos, tem-se Arrieche *et al.* (2008). Neste trabalho os autores estudaram o comportamento de sistemas simuladores géis demonstrando que as tensões mecânicas sofridas pelo corpo causam a formação de fissuras internas. Este mesmo comportamento foi encontrado para corpos cilíndricos, também em sistemas simuladores géis (DUARTE *et al.*, 2007). Segundo estes autores a formação de fissuras internas em corpos

esféricos e cilíndricos já eram previstas. Isto é devido ao fato das camadas superficiais da amostra secarem antes do interior, causando a redução do processo de encolhimento. Nas regiões internas o processo de encolhimento continua com o transporte de umidade para a vizinhança fazendo com que o interior da amostra se rompa.

Nesta mesma linha de pesquisa, a qual avalia o comportamento de sistemas simuladores géis, têm-se Mrani *et al.* (1997) que observaram a inversão da curva das faces de corpos cilíndricos propondo três fases de deformação, isto é:

- Primeira fase: ocorre quando as concavidades do cilindro se tornam internas, devido à ação de tensões que agem na superfície da amostra;
- Segunda fase: denominada de relaxamento do estado de tensão, em que há uma distribuição mais uniforme da quantidade de água do cilindro e desta forma o corpo recupera seu formato inicial, e
- Terceira fase: as concavidades do cilindro se tornam externas e a superfície se torna rígida com compressão e tração do centro.

Para o caso de produtos biológicos existem vários estudos sobre o processo de encolhimento que serão apresentados a seguir.

### **- Fenômeno de Encolhimento da Partícula**

O processo de desidratação de produtos biológicos faz com que a tensão que o líquido exerce contra a parede celular diminua causando, assim, a ocorrência do fenômeno de encolhimento. Quando este fenômeno ocorre, a superfície do material torna-se vulnerável ao surgimento de fissuras como observado por Fumagalli (2003).

Este fenômeno é indesejável para o caso de secagem de amendoins, uma vez que as sementes ficam vulneráveis às ações de insetos ou até mesmo de microorganismos prejudicando a qualidade do mesmo.

Sob este ponto de vista, que considera o fenômeno de encolhimento de materiais biológicos, alguns estudos clássicos foram encontrados na literatura.

Suzuki *et al.* (1976) a partir da avaliação da secagem de raízes de vegetais postularam três modelos para a representação da relação entre a mudança da área superficial e o conteúdo de umidade, sendo expostos a seguir:

- Modelo de secagem uniforme - em que o encolhimento é igual ao volume de água perdida por evaporação durante todos os estágios de secagem;
- Modelo de secagem central (“core drying”) - que assume a formação da camada seca do lado externo do material e o centro permanece com umidade igual à umidade inicial do material; ou seja, a massa específica no centro é igual a do material inicial e a densidade da camada externa seca é a mesma de equilíbrio do material, e
- Modelo de secagem semi-central (“semi-core drying”) - neste caso a densidade na camada seca não é igual a do material seco, pois a umidade gasosa contribui menos para a densidade que a água líquida. Desta forma, a densidade da camada seca é considerada como sendo um valor intermediário entre as densidades inicial e do material seco.

Vagenas & Marino-Kouris (1991) avaliaram a secagem de damasco e propuseram tratar o material como isotrópico e considerar variações em três dimensões, com o mesmo coeficiente de encolhimento nas três direções (encolhimento linear).

Ratti (1994), por sua vez, afirma que o encolhimento depende da umidade do material, assim como, das condições de secagem. Caso a secagem ocorra de forma lenta, o encolhimento pode ocorrer de maneira uniforme. Porém, na secagem muito rápida este encolhimento pode ser menos acentuado, devido à introdução de uma tensão permanente que preserva parte das dimensões originais do produto. Contudo, rachaduras e fissuras podem desenvolver-se no interior do material.

Para o caso específico do amendoim nenhum trabalho sobre encolhimento foi encontrado na literatura consultada.

## 2.5 Secagem por Convecção Forçada

Na secagem por convecção forçada a umidade da partícula vaporiza e devido à diferença de temperatura entre a superfície e o interior do sólido, esta umidade é retirada e transportada pelo próprio fluido, causando desta maneira uma diferença de pressão entre o ar e a superfície do produto.

Desta forma, parte do calor que é transferido ao produto é utilizado para vaporizar a água (calor latente de vaporização), ou seja, a quantidade de calor que causa mudança de estado físico, mas não de temperatura. A outra parte da energia em movimento é utilizada para elevar a temperatura do material (calor sensível) isto é, a quantidade de calor que não causa mudança de estado físico, apenas aumenta de temperatura. Durante este processo, para determinadas umidades do fluido e do sólido, entre os fatores que influenciam a taxa de secagem tem-se a velocidade do ar de secagem e a velocidade do sólido, temperatura do ar de secagem e a geometria do sólido, assim como, as propriedades físicas do material (FORTES & OKOS 1980).

Diante disto foi feita a busca de informações na literatura com o enfoque na secagem de amendoins, para fins agrícolas, quanto à influência da velocidade e temperatura do ar de secagem, bem como, dos efeitos da forma geométrica das amostras na redução de umidade da partícula.

### - Influência da Velocidade

De forma geral tem-se que a velocidade é uma variável que influencia nos valores da taxa de secagem no período de taxa constante, aumentando de valor quando a velocidade do ar de secagem também aumenta (URETIR *et al.*, 1996). Para o período de secagem a taxa decrescente, no qual há predominância do mecanismo difusivo, o efeito da velocidade do ar de secagem praticamente não é perceptível sobre a constante da taxa de secagem.

Entretanto, no caso de grãos e sementes que apresentam maturidade fisiológica, a velocidade é um fator que raramente causa influência na taxa de secagem. Neste sentido, alguns trabalhos foram encontrados na literatura, tanto para sementes de amendoim como para sementes de outras oleaginosas, tais como, soja e castanhas. Para os amendoins, Dalbello (1995) relata que na secagem destas sementes em secador do tipo bandeja, a velocidade do ar de secagem não causou influência na taxa de secagem, assim como, observado por Alves (1995). No caso de oleaginosas, Barrozo (1995), estudando a influência da velocidade no processo de secagem de sementes de soja em leito deslizante, observou que para velocidades acima de 0,33 m/s, o processo não é mais influenciado por esta variável. Moreira *et al.* (2005) por sua vez, observaram o efeito da velocidade da secagem de castanhas (*Castanea sativa M.*) no período inicial do processo, em que a evaporação da água é realizada na superfície do material tornando menos significativa à medida que o mecanismo difusivo passa a governar o processo. E, assim, a influência da temperatura é de fundamental importância no período de taxa decrescente.

### - Influência da Temperatura

A temperatura é a variável que apresenta um efeito mais pronunciado no processo de secagem da maioria dos grãos. Ela está relacionada à quantidade de calor fornecido externamente e determina a pressão parcial de vapor do sólido e a pressão de vapor de saturação do ar ambiente nas condições usuais de operação de secadores convectivos.

Esta variável apresenta grande influência nos valores das constantes de secagem determinadas pelas equações da cinética (Tabela 2.1). Conforme mencionado no item 2.3, a dependência das constantes de secagem em relação a temperatura é geralmente expressa pela Equação de Arrhenius, Equação 2.9:

$$K = K_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (2.9)$$

onde:

K é a constante da taxa de secagem à temperatura do experimento;

$K_0$  é a constante da taxa de secagem à temperatura do experimento padrão de 25°C;

$E_a$  é a energia de ativação;

$R$  é a constante dos gases ideais, e

$T$  é a temperatura de secagem.

Esta relação permite avaliar a força motriz necessária para a transferência de massa, principalmente, em casos de partículas que apresentam barreiras físicas.

Neste contexto, tem-se Senadeera *et al.* (2003) que avaliaram o efeito da força motriz utilizando feijão, batata e ervilha. Segundo os autores, a força motriz necessária para a transferência de massa, ou seja, a energia de ativação apresenta valores maiores para grãos de ervilha e feijão do que para a batata. Os autores atribuem este resultado à presença de barreiras físicas existentes no feijão e na ervilha que dificultam o processo de secagem.

Para os amendoins, os estudos são direcionados para a influência da temperatura no processo em relação à qualidade dos mesmos. Assim, Travaglini & Tango (1965), Noomhorm, *et al.* (1994), Dalbello (1995), Alves (1995) e Krzyanowsk *et al.* (2006) observaram que esta variável causa efeito significativo no processo de secagem de vagens de amendoim, principalmente, na qualidade do produto, a qual será discutida mais adiante.

De forma geral, Carneiro (2003) menciona que sementes e grãos apresentam duas formas de retenção de água e que a sua remoção exige níveis de energia diferenciados. Para a primeira forma chamada de água livre, a qual é facilmente removida durante o processo de secagem, o nível de energia requerido é baixo e é chamado de calor latente de vaporização. Já para a água de constituição, chamada de segunda forma, a qual é fortemente ligada à estrutura celular do grão, o nível de energia exigido é alto. Entretanto, o emprego de altas temperaturas pode ocasionar, além da vaporização da água de constituição, a volatilização e decomposição de substâncias orgânicas como ressaltado por Lasseran (1978).

### **- Influência da Geometria da Amostra**

Na secagem através da convecção forçada a geometria da partícula é geralmente expressa pela relação  $L/D$  (comprimento/diâmetro), quando se consideram corpos cilíndricos. É um dos fatores que deve ser levado em consideração entre os domínios de

aplicação das equações de projeto nos problemas envolvendo escoamento sobre corpos submersos, da mesma maneira que os números adimensionais de Reynolds e de Prandtl.

Na situação onde o escoamento de fluido sobre corpos submersos apresenta geometria cilíndrica, observa-se a formação de um atrito superficial ( $F_S$ ) e o arrasto devido à forma ( $F_F$ ), sendo que a soma destas duas forças representa o arrasto total ( $F_D$ ) de acordo, com a Equação 2.10.

$$F_D = F_S + F_F \quad (2.10)$$

Nos problemas de engenharia busca-se analisar o arrasto total,  $F_D$ , em função de um coeficiente de arrasto empírico,  $C_D$ , conforme representado na Equação 2.11, uma vez que se encontra dificuldade em avaliar o arrasto devido à forma em comparação com o arrasto superficial. Em termos experimentais, esta força pode causar movimentos ou até mesmo transportar a partícula isolada sob o efeito do escoamento de fluido em um túnel de vento, por exemplo.

$$F_D = C_D \left[ \rho_f \frac{(V_0)^2}{2} \right] A_F \quad (2.11)$$

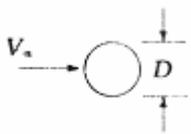
onde,  $A_F$  corresponde à área frontal projetada e  $\rho_f$  é massa específica do fluido de secagem.

Alguns valores destes coeficientes de arrasto para o caso de geometria cilíndrica, que pode ser aproximada para o fruto e para o pericarpo, com o eixo perpendicular ao escoamento do fluido no interior da câmara de secagem estão representados na Tabela 2.2. É importante mencionar que escoamento de fluido sobre corpos cilíndricos é considerado laminar para números de Reynolds de partícula inferiores a aproximadamente  $5 \times 10^5$ .

Em termos de taxas de secagem, Duarte *et al.* (2007) a partir da secagem de sistemas simuladores géis, em forma de cilindro e em diferentes dimensões, observaram que quanto maior a relação  $L/D$  mais rápido ocorre a secagem, ou seja, maior a taxa de secagem. Entretanto, as deformações mais acentuadas foram constatadas com ao aumento desta razão.

No tocante às leguminosas, Senadeera, *et al.* (2003) observaram durante os experimentos de secagem conduzidos com feijões, que quanto maior a relação L/D maior a constante de secagem, ou seja, a secagem é favorecida nesta condição.

Tabela 2.2: Relação entre a razão L/D e o número de Reynolds de partícula para escoamento sobre cilindros submersos (SISSON & PITTS, 1972).

Configuração	L/D	Re <sub>D</sub>	C <sub>D</sub>
Cilindro circular, eixo perpendicular ao escoamento 	1	10 <sup>5</sup>	0,63
	5		0,74
	20		0,90
	∞	> 5 x 10 <sup>5</sup>	1,20
	5		0,35
	∞		0,33

Os fatores descritos anteriormente são de grande importância para se obter êxito nos estudos de secagem. Entretanto os resultados dos mesmos não devem ser visto de forma isolada e sim relacioná-los com a obtenção de um produto de boa qualidade.

## 2.6. Avaliação da Qualidade do Produto

A qualidade das sementes é considerada como o somatório de todos os atributos genéticos, físicos, fisiológicos que interferem na qualidade de originar plantas de alta produtividade. Elas devem apresentar capacidade de desempenhar funções vitais, caracterizadas pela germinação e pelo potencial para uma emergência rápida e para a formação de plântulas normais, ou seja, vigor (POPINIGIS, 1985).

As condições ambientais durante o período de crescimento da cultura, período e sistema de colheita, tratamento pós-colheita, práticas e procedimentos no transporte da produção são fatores que influenciam na qualidade do produto. Segundo Brooker *et al.*

(1992), características, tais como, teor de umidade, grãos quebrados, impurezas e grãos danificados ou mal formados são considerados nos padrões de qualidade do comércio internacional.

Quando se deseja estudar o processo de secagem de sementes em qualquer equipamento, alguns cuidados devem ser tomados na definição dos limites operacionais, visando à preservação da qualidade das mesmas em padrões pré-estabelecidos e atender as necessidades de replantio e armazenagem.

No item 2.2 foram relatados os principais trabalhos sobre a secagem de amendoim, os quais mostraram que as variáveis operacionais do secador têm forte influência na qualidade do produto final. Entretanto, conforme mencionado, esta análise mostra controvérsias entre os diferentes grupos de pesquisas, principalmente no que diz respeito ao efeito da temperatura na qualidade fisiológica quando o amendoim é seco dentro do pericarpo. Como exemplos, podem ser citados os trabalhos de Travaglini e Tango (1965) e Kunze *et al.* (1968). Essa divergência impõe uma análise mais cuidadosa sobre o efeito das variáveis de processo nas qualidades fisiológicas do amendoim.

### **2.6.1 Qualidades Fisiológicas**

Um dos fatores que indica a qualidade fisiológica de sementes é a avaliação da germinação, a qual é definida como a emergência e desenvolvimento das estruturas essenciais do embrião, demonstrando sua aptidão para produzir uma planta normal sob condições ambientais favoráveis (MARCOS FILHO *et al.*, 1987).

Esta avaliação tem como objetivo obter informações sobre o valor das sementes para fins de semeadura e fornecer dados que possam ser usados para comparar o valor de diferentes lotes de sementes de uma mesma espécie e variedade. São utilizados métodos de análise em laboratório que fornecem às sementes as condições favoráveis para que a germinação ocorra (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA, 1992).

A avaliação da germinação em condições de campo não é geralmente satisfatória, pois, dada à variação das condições ambientais, os resultados nem sempre podem ser fielmente reproduzidos e utilizados para efeito de comparação entre os produtos fornecidos mediante os diferentes tipos de secadores.

Embora não possa ser mensurado diretamente, como no caso da germinação, o vigor é um componente de qualidade tão importante quanto à germinação. A ocorrência da deterioração das sementes pode ser considerada como a principal causa da redução do mesmo. Esta deterioração pode ocorrer durante a colheita, transporte, beneficiamento e armazenamento.

Danos físicos nas membranas celulares e tempo fisiológico, provavelmente, sejam as principais causas da deterioração das sementes. Respiração, mudanças hormonais, diminuição nos teores de proteínas e da síntese de RNA, danos genéticos e acumulação de metabólicos tóxicos estão também envolvidos na deterioração.

De forma geral, o vigor pode ser entendido como um potencial de não deterioração fisiológica e/ou integridade física de sementes de alta germinação, representando sua ampla habilidade de estabelecimento no ambiente afetado por fatores, tais como, água, temperatura e oxigênio que apresentam contribuições diferenciadas para o processo de germinação conforme, relatado por Carvalho & Nakagawa (1988).

### **- Água**

A água pode ser considerada como o fator mais importante. A absorção da água pelas sementes resulta na reidratação dos tecidos e, como consequência, a intensificação da respiração, assim como, das atividades metabólicas que fornece energia e nutrientes necessários para a retomada do crescimento, por parte do eixo embrionário (CARVALHO & NAKAGAWA, 1988). Além disto, a absorção da água faz com que o volume das sementes aumente facilitando o rompimento da “casca”. No caso do amendoim facilita o rompimento do endocarpo.

A rapidez da absorção de água pelas sementes apresenta dependência com a espécie da semente, com a disponibilidade de água, com a área de contato e com a

temperatura. Sendo a disponibilidade da água um fator que está diretamente relacionado com a velocidade de germinação, ou seja, com a rapidez com que ocorre a germinação.

### **- Temperatura**

A temperatura em que a semente é submetida durante a germinação influencia em regra geral, na sua velocidade, bem como na uniformidade da mesma.

Sendo considerado um processo complexo de reações bioquímicas, a germinação será tanto mais rápida, quanto maior for a temperatura. Entretanto, têm-se valores limites que determinam se a germinação irá ocorrer ou não, pois o embrião deve ser considerado como um ser vivo.

### **- Oxigênio**

As exigências das sementes sobre este fator são usualmente baixas. Devido à dificuldade de absorver oxigênio, principalmente na fase inicial da germinação, as sementes utilizam a energia obtida pela respiração anaeróbica. Entretanto, o acúmulo de álcool nas sementes provenientes da respiração anaeróbica poderia levar a interrupção do processo de germinação. Mas a partir de certo ponto, o nível de hidratação dos tecidos atinge um valor que permite a difusão do oxigênio no tecido meristemático. O oxigênio encontra-se dissolvido na água e através destes processos acontece a mudança para a respiração aeróbica.

Além destes fatores, que causam influências no processo de germinação e no vigor das sementes, o fato do processo de secagem causar encolhimento nas sementes deve ser levado em consideração, visto que o mesmo pode afetar as qualidades fisiológicas, bem como as qualidades físicas das sementes durante a produção de sementes em unidades convectivas de secagem.

### 2.6.2. Qualidades Físicas

Conforme já mencionado, uma semente de boa qualidade também deve apresentar algumas características externas além das consideradas anteriormente. Estas se referem à cor do endocarpo, escurecimento do cotilédono, bem como da presença de endocarpo solto, rachaduras no pericarpo e sementes trincadas, como mencionado por Dabello (1995). Além disto, o encolhimento da mesma não é desejável, uma vez que pode causar a formação de fissuras e até mesmo prejudicar as qualidades fisiológicas.

Segundo Dalbello (1995), essas qualidades externas do produto podem estar associadas às variações das condições de secagem, como temperatura, altura do leito usado para a secagem do amendoim, fluxo de ar e teor de umidade inicial em que o mesmo é submetido em um secador de leito fixo.

Entretanto, a avaliação destes aspectos deve ser realizada para todos os tipos de secadores em que a semente de amendoim é submetida. Sendo todos influenciados por parâmetros relacionados ao manuseio durante e após o período de colheita, ou sejam, fatores que se referem a colheita manual ou mecânica, teor de umidade, temperatura, taxa de secagem, processamento e condições de armazenamento.

Com base no exposto nesta revisão bibliográfica, verifica-se a importância de novos estudos sobre a secagem do amendoim. Constata-se, principalmente, a necessidade de uma abordagem que tenha por base o escoamento de fluido sobre corpos submersos, de forma a poder, em relação aos leitos fixos e móveis destas partículas, desprezar os efeitos dos impactos mecânicos e investigar o comportamento da partícula isolada e imersa no fluido de secagem.

A literatura fornece informações sobre a operação nos secadores, além de técnicas a serem utilizadas. Entretanto, existem ainda controvérsias, principalmente quando se

trata da influência das condições operacionais nos fatores de qualidades fisiológicas. Principalmente o efeito imediato da temperatura do ar de secagem.

No estágio atual em que se encontram os estudos sobre a secagem convectiva de amendoim, as investigações pouco se preocupam com os efeitos causados pela presença de barreiras físicas no processo de secagem. Estas barreiras físicas são típicas em sementes que apresentam capa protetora, as quais podem causar resistências à transferência de massa entre o sólido e a partícula. Além disto, informações frente à representação da cinética de secagem, também, ainda são escassas.

Diante disto cabe ainda estabelecer uma linha de pesquisa que se preocupe no tocante à caracterização de cada parte desta mistura heterogênea, visto que as mesmas apresentam composições e higroscopias diferentes entre si.

Estas novas investigações implicam em grandes desafios sob o ponto de vista científico e tecnológica do problema. Primeiro, devido ao comportamento que este tipo de partícula apresenta em contato com o fluido de secagem e, segundo, pela busca na obtenção de subsídios diante do binômio processo e qualidade, visando atender às necessidades da agricultura moderna.

Com base nesta atualização bibliográfica, entende-se que há necessidade de novos trabalhos com esta visão do processo de secagem e que sem dúvida irão ampliar os conhecimentos sobre os fatores que influenciam nas qualidades desta leguminosa e sobre os fenômenos presentes na secagem convectiva desta natureza de partícula, tendo como principal finalidade viabilizar a produção de sementes de boa qualidade.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo abordará os materiais, o equipamento e seus respectivos periféricos utilizados, visando contribuir com a busca de informações da melhor relação entre as variáveis operacionais da secagem e a qualidade de sementes que apresentam capas protetoras. Serão apresentados também, os métodos usados para preparar os subsistemas do amendoim, com base no conhecimento dos fenômenos envolvidos durante o processo de secagem. Além disto, serão apresentadas as técnicas usadas para caracterizar o encolhimento da partícula e os métodos utilizados para avaliar a influência da secagem sobre as qualidades físicas e fisiológicas do produto, através da abordagem do escoamento do fluido aquecido sobre uma partícula. Deste modo é possível desprezar os efeitos devido a impactos mecânicos e de interações com outras partículas na sua vizinhança.

#### 3.1 Materiais

Os experimentos de secagem foram realizados com ar atmosférico aquecido e amendoins, parte comestível da planta *Arachis hipogae* L., os quais foram coletados, padronizados e preparados, conforme descritos a seguir.

### 3.1.1 Amendoins (*Arachis hypogae L.*)

A condução dos testes experimentais foi realizada com amendoins (*Arachis hipogae L.*) os quais são de grande interesse técnico-científico, principalmente, devido ao fato de apresentarem características bem distintas de outras espécies de sementes que apresentam capa protetora. O mesmo é formado por uma mistura heterogênea em que a semente e os tegumentos apresentam diferentes composições e higroscopia.

A partir da análise da revisão bibliográfica, constata-se a necessidade de busca de informações sobre o processo de secagem deste tipo de partícula quando submetida em um secador de convecção forçada. Assim sendo, os testes foram realizados com amendoins da variedade tatu e o critério de escolha baseou-se na sua predominância de plantio no Brasil, sendo o Estado de São Paulo o maior produtor desta variedade. Além disto, esta variedade apresenta vagens com três ou quatro sementes, permitindo desta maneira, uma padronização do tamanho das amostras, bem como a extração de grãos localizados entre duas partículas visando facilitar e melhorar a sua padronização.

Para tanto, todas as amostras foram coletadas manualmente, bem como preparadas e selecionadas a fim de padronizá-las.

### 3.1.2 Coleta e Padronização das Amostras

Diante das dificuldades encontradas em se conduzir testes de secagem com materiais coletados diretamente do solo, visto a não uniformização dos mesmos quanto ao seu tamanho, tem-se neste item os procedimentos realizados para a coleta, preparação e padronização do material utilizado.

O amendoim (*Arachis hipogae L.*) foi fornecido pela indústria alimentícia “Cealista Xangô Ltda.”, localizada no município de Fernando Prestes, no estado de São Paulo.

As plantas foram coletadas no campo com o auxílio de uma pá, acondicionadas em recipiente plástico e transportadas para o Centro de Secagem de Sementes e Pastas do DEQ/UFSCar.

As amostras permaneceram no recipiente mencionado por mais cinco dias para que adquirissem o estado de maturidade fisiológica. Este procedimento foi adotado de forma a garantir a condição de maturidade fisiológica, conforme relatado por Passos *et al.* (1987). Durante este período, as plantas foram regadas com água com o intuito de manter as condições de campo.

Na Figura 3.1 (a) tem-se a visão geral da plantação na região e na Figura 3.1 (b) o local de onde foi aleatoriamente coletado o material.



Figura 3.1: Visão geral da plantação na região de Fernando Prestes – SP (a), momento da coleta das amostras do amendoim diretamente da lavoura (b).

Após o período de cinco dias os amendoins foram manualmente separados da planta e limpos. Esta limpeza envolve a retirada do excesso de terra e de frutos danificados (PASSOS, *et al.* 1987).

Para que os experimentos de secagem fossem conduzidos dentro de um padrão de tamanho, forma e peso de amostras, todas as partes do amendoim foram selecionadas de acordo com as pré-determinadas dimensões, as quais foram verificadas com auxílio de um paquímetro (OMET INOX), com precisão de  $5 \times 10^{-5}$  m. Em seguida as amostras foram pesadas em balança analítica digital, GEHAKA, modelo BG 440, de precisão de  $10^{-4}$  kg. As amostras que apresentaram pesos e tamanhos muito distintos foram eliminadas e, assim, seguiu-se a preparação do sistema composto (fruto) o qual foi aberto em subsistemas (pericarpo, semente com endocarpo e semente sem o endocarpo).

### 3.1.3 Preparação do Sistema Composto e Subsistemas do Amendoim

Devido ao fato de se considerar o amendoim como sendo um sistema composto formado por subsistemas que apresentam diferentes composições e higroscopia, decidiu-se conduzir os testes de secagem com cada parte deste sistema composto separando-o em subsistemas ou partes. Esta decisão foi tomada com o intuito de conhecer melhor os fenômenos envolvidos no processo de secagem convectiva que ocorrem em cada parte e em seguida avaliar a relação das mesmas com o sistema composto tendo como meta a preservação das qualidades físicas e fisiológicas das sementes para fins agrícolas.

Para avaliar a relação de dependência do sistema composto com os subsistemas ou partes, foram conduzidos experimentos com cada parte do amendoim separadamente. O sistema composto em estudo refere-se ao fruto (neste caso a vagem com as sementes no seu interior), enquanto que como subsistemas são considerados o pericarpo (somente a casca sem as sementes no interior), à semente com endocarpo (película vermelha) e à semente sem o endocarpo.

Para a condução dos testes foram utilizados frutos que apresentavam quatro sementes. O critério de escolha do tamanho dos frutos foi baseado na razão  $L/D$  (comprimento/diâmetro) e no número de Reynolds de partícula dentro do domínio de escoamento laminar, de forma a evitar o arraste da partícula que poderá ocorrer no escoamento turbulento. Além disto, com escoamento laminar as garantias experimentais do são atendidas. Deve-se lembrar que o escoamento sobre cilindros é considerado como laminar para os números de Reynolds inferiores a aproximadamente  $5 \times 10^5$ .

As sementes com ou sem endocarpo utilizadas, foram selecionadas de acordo com suas posições dentro do fruto. A Figura 3.2 mostra um esquema de um fruto aberto com as respectivas posições das sementes.

Foram escolhidas as sementes que localizavam-se nas posições dois ou três de cada fruto selecionado contendo quatro sementes. A retirada do endocarpo da semente foi realizada manualmente, sem auxílio de utensílio para que as mesmas não se danificassem durante a remoção desta barreira.

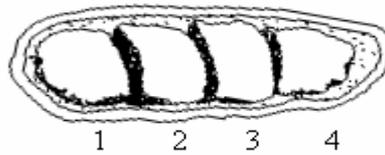


Figura 3.2: Esquema do fruto do amendoim aberto com as respectivas posições das sementes.

Para os testes realizados com o pericarpo isolado, os frutos foram abertos apenas em uma de suas partes com o auxílio de uma lâmina para a extração das sementes do seu interior. Este procedimento foi cuidadosamente realizado e, em seguida, o pericarpo foi novamente fechado.

Após os procedimentos de coleta e padronização das diferentes partes, as mesmas foram armazenadas separadamente em sacos plásticos vedados e mantidas sob refrigeração em geladeira, conforme o recomendado por Moreira *et al.* (2005), durante o período de desenvolvimento das etapas dos experimentos de secagem em secador de convecção forçada.

### 3.2 Unidade de Secagem Convectiva

Com a finalidade de avaliar os fenômenos ocorridos durante o processo de secagem do amendoim com suas respectivas barreiras físicas, sob a visão de escoamento de fluido sobre corpos submersos, utilizou-se um secador de convecção forçada com reciclo de ar.

Este equipamento permite operar com escoamento uniforme do ar de secagem na região central, que possibilita avaliar a interação existente entre o fluido e a partícula única e fixa, minimizando os efeitos mecânicos, associados as outras partículas presentes em sua vizinhança. Efeitos típicos que ocorrem quando a partícula é submetida em secadores convectivos de leitos móveis ou fixos.

Para tanto, as amostras foram posicionadas na região central do secador e sustentadas por um suporte, que auxilia na obtenção de dados para posterior interpretação dos fenômenos envolvidos durante o processo de secagem.

### 3.2.1 Secador de Convecção Forçada com Reciclo de Ar

Os testes de secagem foram conduzidos em um secador de convecção forçada com reciclo de ar. O mesmo foi projetado, construído e instalado por Cassandre *et al.* (2001) no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, de acordo com esquema mostrado na Figura 3.3, que apresenta o equipamento com os seus respectivos periféricos.

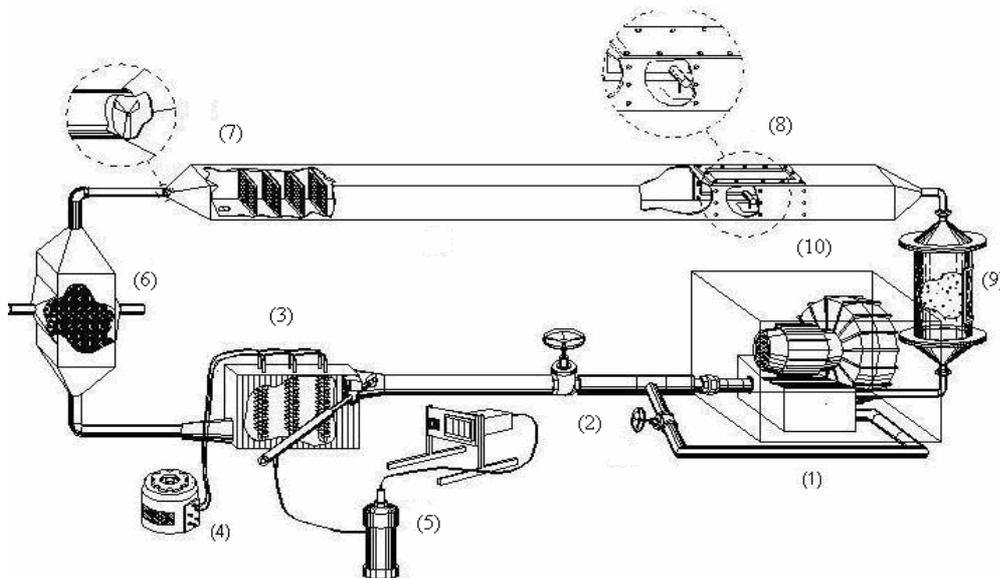


Figura 3.3: Esquema do equipamento de secagem utilizado para a condução dos testes de secagem (CASSANDRE *et al.*, 2001).

O equipamento (Figura 3.3) trata-se de uma unidade experimental típica de túnel de vento constituída basicamente de um sistema de escoamento de fluido, circuitos de aquecimento, resfriamento e desumidificador do fluido, bem como os aparelhos para as medidas e determinações de temperatura, umidade e velocidade do fluido de secagem, além

da câmara de secagem propriamente dita. Toda a estrutura do secador é sustentada por uma bancada de madeira para facilitar as observações durante a realização dos testes.

O sistema de escoamento do fluido de secagem é constituído por um soprador do tipo compressor radial (IBRAN) (1), na Figura 3.1, que impulsiona o ar para as duas válvulas tipo gaveta (2), sendo uma encarregada de regular a vazão do ar de secagem que escoar através do aquecedor, e a outra de regular o ar que retorna através de um reciclo para a tubulação de alimentação do soprador.

Para determinar a umidade do ar de secagem através das medidas de temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, foram instalados na entrada do aquecedor elétrico dois termopares de cobre-constantan (AWG-24). Estes estão ligados ao circuito de medidas de temperatura constituído por um milivoltímetro digital da ENGRO, ponto frio e chave seletora digital (5). O aquecedor elétrico é dotado de três resistências elétricas de 750 W cada (3), conectado a um regulador de voltagem (VARIVOLT) (4),

Para as situações operacionais em que seja necessário o resfriamento do ar de secagem, encontra-se instalado, antes da região de entrada da câmara de secagem, um resfriador de ar, ou seja, um trocador de calor de tubos aletados (6). Este trocador é constituído por 5 fileiras de 3 tubos aletados com arranjo de geometria triangular. A tubulação é de ferro galvanizado com diâmetro externo de  $26,6 \times 10^{-3}$  m, o tubo possui 25 aletas de seção circular de chapa galvanizada com diâmetro externo de  $55,5 \times 10^{-3}$  m, aproximadamente, e espessura de  $0,45 \times 10^{-3}$  m. As aletas estão igualmente distribuídas em espaços de  $5 \times 10^{-3}$  m. O casco do trocador de calor é de chapa de ferro galvanizada, com espessura em torno de  $1,3 \times 10^{-3}$  m e a área total de troca térmica entre os tubos aletados e o ar é de aproximadamente  $1,6 \text{ m}^2$ .

Para garantir a homogeneização do escoamento do ar de secagem com aproximadamente 98,7 % de distribuições uniformes de temperatura e velocidade do ar de secagem no compartimento de secagem da amostra, encontra-se instalado um conjunto de placas defletoras (7).

Após escoar pela câmara de secagem (8), o ar passa por um desumidificador de ar (9), que consiste de um leito fixo de sílica gel com diâmetro interno de aproximadamente  $15,24 \times 10^{-2}$  m, que tem como finalidade manter a umidade relativa do ar de secagem aproximadamente constante durante todo o processo de secagem.

Na unidade de secagem encontra-se também um abafador de ruídos (10), que recobre o soprador, visando minimizar o barulho no ambiente de trabalho. Entretanto é necessário um sistema de arrefecimento do soprador, via ventilador, o qual protege o soprador do aquecimento causado pelo abafador de ruídos.

Esta unidade de secagem permiti a realização de experimentos em diferentes condições operacionais com reciclo de ar, operando com mecanismos de transferência de calor, via convecção forçada, com escoamento do ar de secagem em regimes laminar ou turbulento. Após o fluido de secagem passar pelo desumidificador de ar o mesmo retorna ao soprador, passa pela câmara de secagem e o ciclo se completa.

### 3.2.2 Câmara de Secagem

O túnel de secagem (8), conforme mostrado na Figura 3.3, e melhor detalhado na Figura 3.4, é constituído de chapa de ferro galvanizado com  $0,3 \times 10^{-2}$  m de espessura, com secção retangular de 0,15 x 0,10m com 2,5m de comprimento. Na região central do compartimento de secagem há um visor de acrílico que proporciona a visualização durante os testes e permite retirar as amostras para as medidas de massa e tomada de fotos. Além disto, a mesma apresenta pequenos orifícios, em torno de  $1,0 \times 10^{-2}$  m, próximos à região de secagem que são utilizados para as medidas de temperatura e velocidade do ar de secagem. Estes orifícios eram vedados com fita adesiva quando não utilizados, para que não houvesse perda do ar de secagem para o ambiente externo.

Com base nos testes dinâmicos e térmicos realizados por Cassandre *et al.* (2001), a garantia experimental da homogeneização do escoamento do fluido neste equipamento é de aproximadamente 98,7 % de distribuições uniformes de velocidade e temperatura do ar de secagem na secção transversal de escoamento do ar. O domínio de operação nestas condições é de 30 a 70 °C e de 0,5 a 1,8 m/s, na região central do compartimento de secagem, o que mantém estas variáveis e a umidade relativa aproximadamente constantes. O método utilizado por Cassandre *et al.* (2001) para as

determinações de distribuições de temperatura e velocidade foi baseado no “Método de Quadrantes”, de acordo com Sogab (1987).

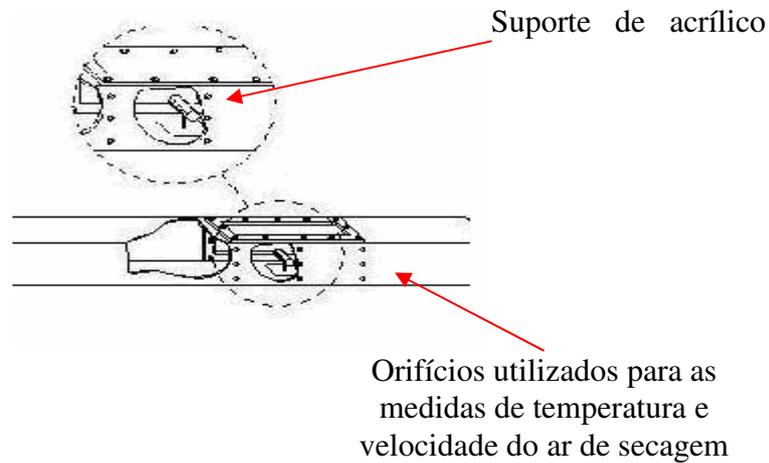


Figura 3.4: Detalhes da câmara de secagem, com destaque para os orifícios que permitem as medidas de temperatura e velocidade do ar de secagem.

A visualização das distribuições típicas de velocidade e temperatura do ar pode ser feita através das Figuras 3.5 e 3.6, respectivamente.

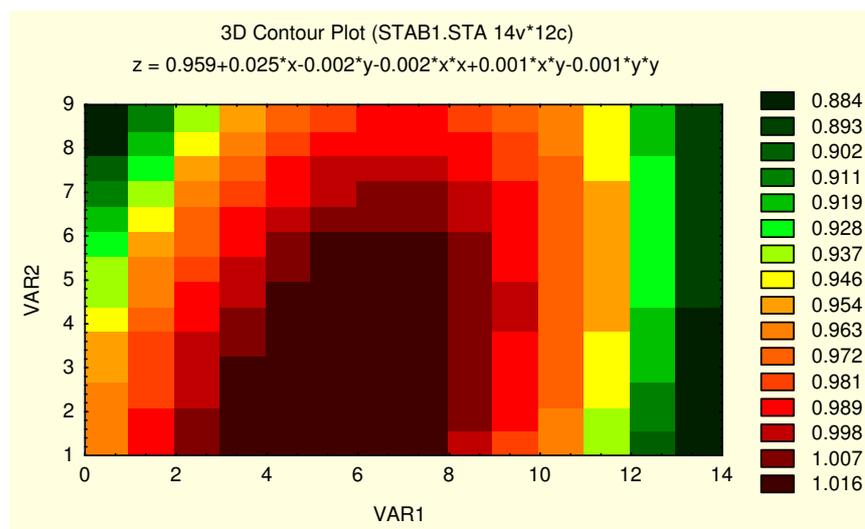


Figura 3.5: Resultado típico de distribuição da velocidade do ar na região de secagem, com  $v = (0,95 \pm 0,05\text{m/s})$  em função da Var 1 = largura em cm, Var 2 = altura em cm (CASSANDRE *et al.*, 2001)

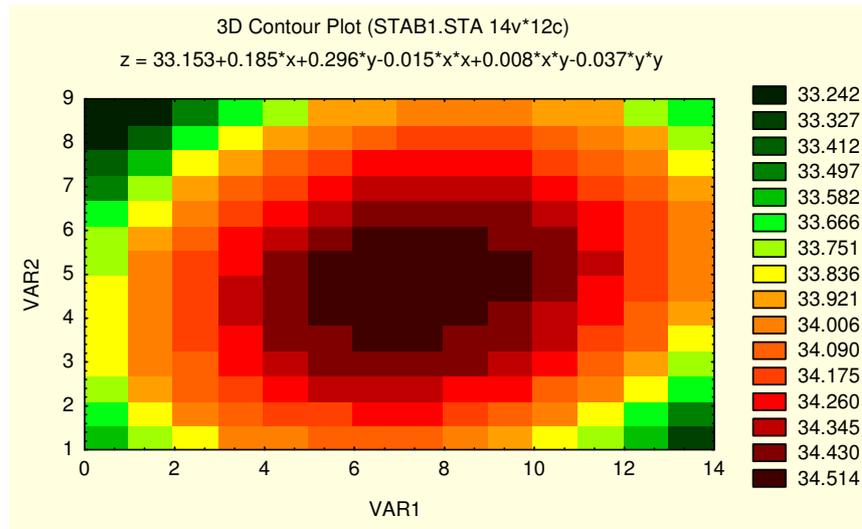


Figura 3.6: Resultado típico de distribuição da temperatura do ar na região de secagem, com  $T = (34,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  em função da Var 1= largura em cm, Var 2 = altura em cm (CASSANDRE *et al.*, 2001).

Com base nas distribuições transversais de temperatura e velocidade no escoamento de ar, constata-se que a posição adequada para a localização das amostras encontra-se na região central da câmara de secagem.

Logo, a condução dos testes de secagem de cada parte do amendoim, bem como, do fruto na unidade de secagem permitirá estabelecer um tratamento dos dados sob a visão de escoamento de fluido sobre corpos submersos.

### 3.2.3 Suporte das Diferentes Partes do Amendoim

Visando atingir os objetivos propostos para a realização desta pesquisa, plataformas acrílicas foram utilizadas como apresentada pela Figura 3.7 e conforme recomendado por Arrieche (2003). A mesma possui uma área de  $2,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , conectada a uma haste de metal de  $2 \times 10^{-3} \text{ m}$  de diâmetro e  $5 \times 10^{-2} \text{ m}$  de altura, permitindo o posicionamento das amostras na região central ao plano perpendicular à direção de escoamento do fluido.

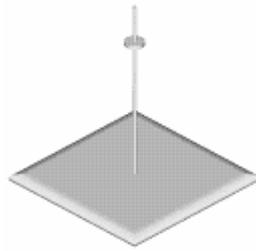


Figura 3.7: Esquema da plataforma utilizada no método intermitente de aquisição de dados (ARRIECHE, 2007).

Esta plataforma era retirada do equipamento em intervalos de tempo pré-estabelecidos, retornando ao mesmo logo após a tomada de fotos e obtenção de dados através das técnicas de medidas que serão mostradas no próximo item.

### 3.3 Técnicas de Medidas das Variáveis do Processo

Serão apresentadas neste item, com as respectivas técnicas de medidas utilizadas, as variáveis do processo dentre as quais tem-se: o conteúdo de umidade da amostra, bem como, a umidade relativa, a velocidade e a temperatura do fluido de secagem.

Para as medidas da massa de água evaporada de cada amostra ao longo do tempo, para posterior cálculo da umidade em base seca, foi utilizada uma balança analítica digital, GEHAKA, modelo BG 440 com precisão de  $10^{-4}$  kg.

A umidade inicial de cada parte do amendoim foi determinada pelo método da estufa a  $(105 \pm 3)^{\circ}\text{C}$  por 24 horas em uma estufa da marca FANEM, modelo 315 SE, assim como o conteúdo de umidade de equilíbrio, conforme recomendado pelo Ministério da Agricultura e Reforma Agrária (1992).

A umidade relativa do ar foi obtida via psicrometria, a partir das medidas de temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, com precisão em torno de  $0,25^{\circ}\text{C}$  para a temperatura, e 4% para a umidade relativa, e posterior conversão com o auxílio do software

CATT<sup>®1</sup>, que contém dados do equilíbrio líquido vapor em uma ampla faixa de temperatura e pressão.

As determinações das medidas de velocidade e temperatura do fluido foram realizadas através de um termoanemômetro de fio quente digital da marca ALNOR. Estas medidas foram feitas através dos orifícios existente na câmara de secagem, Figura 3.4, com precisão de medida em torno de 0,1 m/s e 1°C para a velocidade e temperatura, respectivamente.

As medidas das variáveis do processo são de suma importância para dar seqüência ao estudo com a determinação das demais propriedades das amostras.

### **3.4 Determinações das Propriedades das Amostras**

Para as caracterizações do sistema composto e dos diferentes subsistemas foi necessário obter informações em relação ao encolhimento, mudança de forma, umidade de equilíbrio termodinâmico e o teor de umidade crítica.

#### **3.4.1 Tomada de Imagens para a Caracterização do Encolhimento e Forma**

A Figura 3.8 mostra um esquema da superfície luminosa utilizada para tomada de imagem das partículas com auxílio da câmara fotográfica. O mesmo é composto por um suporte universal (1), uma garra (2) que segura a câmara fotográfica (3), neste trabalho foi usada uma câmera digital da marca OLYMPUS<sup>®</sup>, modelo D-425. No centro da superfície

---

<sup>®1</sup> John Wiley & Sons

luminosa, propriamente dita, tem-se o local onde as amostras eram posicionadas (4) para a tomada de imagem.

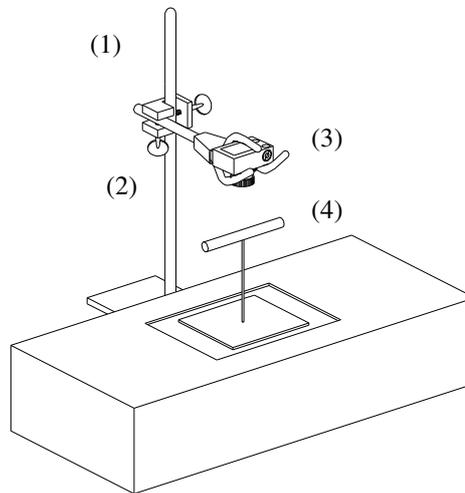


Figura 3.8: Esquema da superfície luminosa utilizada para a tomada de imagem das amostras.

Através da tomada de imagens com o auxílio de uma câmera fotográfica, posicionada em uma superfície luminosa, Figura 3.8, foi possível avaliar a evolução da forma de cada parte do amendoim, bem como o fenômeno de encolhimento mediante a análise das mesmas através do software IMAGE PRO PLUS<sup>®2</sup>.

As imagens, tomadas ao longo do processo de secagem, e posteriormente analisadas no software IMAGE PRO PLUS<sup>®</sup>, foram necessárias para a obtenção dos dados de área projetada, perímetro projetado (comprimento da linha que circunda o objeto), diâmetro máximo (comprimento da linha mais longa unindo dois pontos contidos no perímetro do objeto e passando pelo centróide), diâmetro mínimo (comprimento da linha mais curta unindo dois pontos contidos no perímetro do objeto e passando pelo centróide) e diâmetro médio (comprimento médio dos diâmetros medidos a cada intervalo de 2° e passando pelo centróide do objeto).

O programa IMAGE PRO PLUS<sup>®</sup> opera de forma interativa através de janelas, permitindo uma série de operações, tais como, melhorar o contraste das imagens, apresenta alguns filtros para redução dos resíduos das imagens e uma janela que permite o ajuste da imagem pelo operador. Este software também contém uma opção alternativa para

binarização, possibilitando a adição de imagens de rotinas na determinação das áreas das partículas e espaços vazios.

### **3.4.2 Determinação da Umidade de Equilíbrio Termodinâmico**

A determinação do teor de umidade no estado de equilíbrio termodinâmico entre a amostra e o ar circundante é de grande importância, uma vez que permite conhecer o estado final do processo de transferência de calor e massa, e indica a condição limite para a qual tende o valor do teor de umidade da partícula no processo de secagem.

Neste trabalho foi utilizado o método da estufa para a determinação da umidade de equilíbrio. Foi considerado que o sistema estava em equilíbrio termodinâmico na condição em que a massa da amostra não mais alterava seu valor após três medidas consecutivas em intervalos de tempo de aproximadamente 1 hora. Em seguida, a mesma era conduzida para a estufa com temperatura de  $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ , por 24 horas, conforme o recomendado pelo Ministério da Agricultura e Reforma Agrária (1992). Estes dados foram utilizados para o cálculo de umidade em base seca visando posteriormente a análise dos fenômenos envolvidos durante o processo de secagem.

### **3.4.3 Obtenção do Teor de Umidade Crítica**

Com o intuito de determinar a umidade crítica, foram feitas análises de regressão linear pelos gráficos de  $M_{bs}$  (umidade da partícula em base seca) em função do tempo de secagem, sendo que, no método utilizado, os últimos pontos, que correspondem ao período de taxa decrescente, são desprezados a cada regressão linear, até se obter um coeficiente de correlação igual a no mínimo 0,99.

O teor de umidade crítica ( $M_{cr}$ ) corresponde ao último valor de umidade no qual se obteve o coeficiente igual a, no mínimo, 0,99, como descrito por Keeey (1992).

### **3.5 Testes das Amostras Através da Secagem Convectiva**

Os testes de secagem convectiva foram realizados com o sistema composto e com os diferentes subsistemas do amendoim “in natura” que foram armazenados sob refrigeração durante todo o período de secagem. Os experimentos foram conduzidos visando avaliar os fenômenos envolvidos durante a secagem, conforme o procedimento e planejamento experimental adotados.

#### **3.5.1 Procedimento Experimental**

De forma a sistematizar o andamento desta pesquisa decidiu-se elaborar um fluxograma, conforme mostrado na Figura 3.9. O fluxograma foi utilizado para a realização do procedimento experimental de cada parte do amendoim, bem como, do fruto.

Após a coleta do material, padronização e preparação das partes do amendoim, de acordo com o descrito nos itens 3.1.2 e 3.1.3, cada subsistema e o fruto do amendoim foram submetidos na câmara de secagem do secador de convecção forçada. As partes do amendoim referem-se à semente com endocarpo (SCE), semente sem endocarpo (SSE) e pericarpo que de agora em diante serão referidos conforme a terminologia mencionada.

Os experimentos de secagem foram conduzidos com as amostras “in natura” que foram armazenadas, conforme mencionado anteriormente. Para que atingissem a temperatura ambiente, as amostras eram retiradas da refrigeração 12 horas antes de cada teste e, em seguida, conduzidas para o secador de convecção forçada com reciclo de ar (MOREIRA *et al.*, 2005).

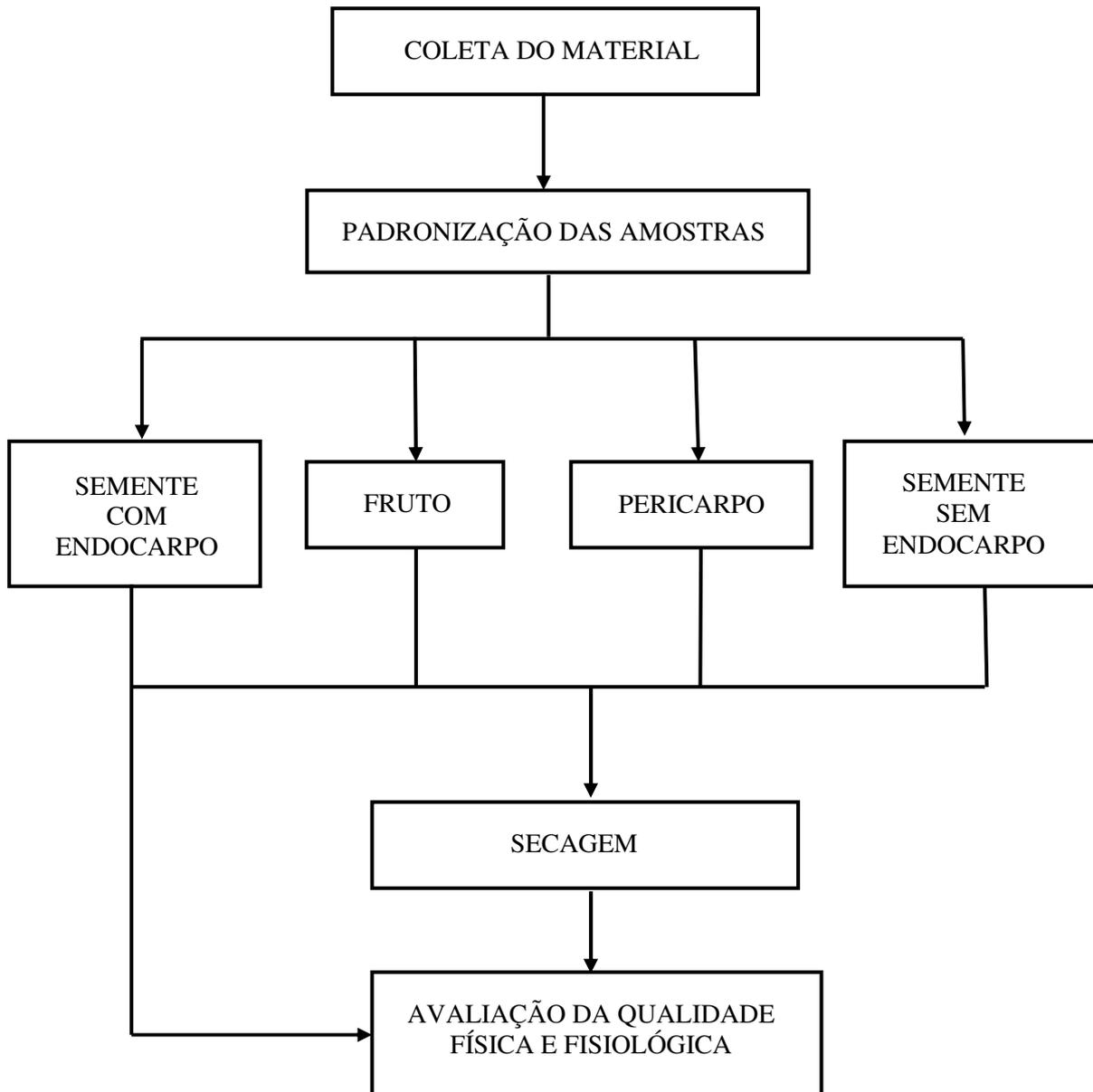


Figura 3.9: Fluxograma utilizado para a realização do procedimento experimental.

Todos os testes foram conduzidos em regime permanente de escoamento e o tempo necessário foi dependente das condições operacionais utilizadas. Este período variava entre 1 e 3 horas de operação do equipamento.

Tendo em vista a realização de um número necessário e suficiente de experimentos foi utilizado um planejamento experimental, que permitiu estabelecer as condições operacionais utilizadas para garantir a representabilidade dos experimentos.

### 3.5.2 Planejamento Experimental e Condições Operacionais

As condições experimentais foram estabelecidas tendo em vista o interesse de analisar a influência da velocidade do ar e da temperatura sobre a secagem das sementes para fins agrícolas. Para isto foi utilizado um arranjo do tipo planejamento fatorial ( $3^2$ ), onde para cada variável estudada apresentava três níveis diferentes.

A Tabela 3.1 apresenta as condições operacionais que foram utilizadas, bem como, as codificações dos níveis no planejamento fatorial. Os níveis destas variáveis foram selecionados conforme as limitações impostas pelo secador e pelos indicadores de qualidade do amendoim apresentados pela literatura. Para cada parte do amendoim estudada foram realizados nove testes de secagem com suas respectivas réplicas, totalizando setenta e dois experimentos.

Tabela 3.1: Condições operacionais e codificação dos níveis das variáveis do processo utilizadas no planejamento fatorial.

Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)	Codificação dos níveis das variáveis
0,5	30	-1
1,0	40	0
1,5	50	+1

A temperatura e a velocidade do ar de secagem foram determinadas com auxílio de termoanemômetro da marca ALNOR conectado nos orifícios da câmara de secagem, conforme descrito no item 3.2.2. Suas propriedades físicas ( $\rho_{ar}$ ,  $\mu_{\infty}$  e  $\nu$ ) encontram-se reunidas na Tabela 3.2, as quais foram utilizadas para os cálculos dos números de Reynolds de partícula.

Tabela 3.2: Propriedades do ar a 1 atm (PERRY *et al.*, 1997)

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Massa específica ( $\rho_{\text{ar}}$ ) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Viscosidade( $\mu_{\infty}$ ) ( $10^{-6} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ )	Viscosidade cinemática( $\nu$ ) ( $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )
30	1.127	18,682	16,58
40	1.092	19,123	17,60
50	1.057	19,515	18,58

Através dos dados experimentais de umidade em função do tempo, obtidos ao longo da secagem em cada experimento, traçaram-se as curvas de umidade adimensional (MR). A umidade de equilíbrio ( $M_{eq}$ ), utilizada no cálculo de MR, foi obtida a partir do método de estufa. O adimensional de umidade é definido pela Equação (3.1) que representa a razão entre a quantidade de água que ainda se encontra presente na amostra diante da quantidade máxima que pode ser retirada.

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3.1)$$

Visando conhecer os intervalos de tempo para a condução adequada do planejamento experimental, testes preliminares foram realizados e a partir destes foi possível estabelecer os intervalos de medidas de massa para cada parte do amendoim, bem como, para o fruto. Na primeira hora de secagem a massa foi determinada em intervalos de tempo de 10 em 10 minutos, a partir da segunda hora o intervalo de tempo era de 30 em 30 minutos e a partir de 4 horas de secagem, dependendo do tipo de amostra, a massa era determinada de 1 em 1 hora até o final da secagem, atingindo o equilíbrio termodinâmico.

Após a realização dos testes de secagem, que visam obter produtos com aproximadamente 10% b.u., as sementes do amendoim secas dentro do fruto e as secas fora do fruto, mas com endocarpo, foram submetidas à avaliação de qualidade para fins de insumos na agricultura.

### 3.6 Avaliação da Qualidade das Sementes para Insumo na Agricultura

Diante da revisão bibliográfica realizada foi possível constatar que ainda existem lacunas referentes às influências das condições operacionais na qualidade do amendoim, principalmente, no que se refere à análise conjunta entre o processo de secagem e a qualidade do produto. Os estudos conclusos são todos realizados em leitos fixos ou móveis. Logo, os efeitos causados pelos impactos mecânicos e as populações de partículas que constituem um sistema particulado não estão bem esclarecidas. Além disto, as informações referentes às condições operacionais, geralmente, são encontradas de forma isolada, ou seja, não se tem uma análise conjunta das mesmas.

Desta forma, a avaliação da qualidade do produto neste trabalho foi realizada com o intuito de buscar informações sobre uma análise conjunta das variáveis do processo, frente a velocidade e temperatura do ar de secagem. Além de avaliar a influência dos fenômenos secundários envolvidos durante o processo de secagem.

Para tanto, testes com as sementes que passaram pelo processo de secagem dentro e fora do fruto, mas com endocarpo, foram conduzidos de forma que as amostras atingissem o teor de umidade viável para armazenagem, sabendo que este é de aproximadamente 10% b.u..

Em seguida as amostras secas, nas diversas condições operacionais, e de acordo com o planejamento experimental, foram conduzidas a testes que visam avaliar a preservação das qualidades físicas, bem como das qualidades fisiológicas do amendoim quando submetido em um secador de convecção forçada. Para efeito de comparação, foram também conduzidas avaliações das qualidades com as sementes que não passaram pelo processo de secagem convectiva, a qual foi denominada de avaliação testemunha.

### 3.6.1 Qualidades Físicas

Os atributos referentes às qualidades físicas do produto estão diretamente relacionados com as condições operacionais de secagem que as sementes são submetidas. Assim, aspectos externos, tais como, danificação dos frutos e sementes frente ao processo de encolhimento e mudança de forma foram avaliados através da tomada de imagens e posterior análise no software IMAGE PRO PLUS<sup>®</sup>. Além disto, considerou-se, também, o efeito das condições operacionais do secador de convecção forçada em relação à cor do endocarpo e dos cotilédones.

Um outro aspecto importante que foi avaliado, também em relação ao fenômeno de encolhimento, além das reduções das dimensões, foi a formação de fissuras internas causadas pelas diferentes concentrações de umidade no produto durante o processo de secagem.

Todos estes aspectos externos e internos avaliados necessitam ser analisados, pois podem causar danos às qualidades fisiológicas do produto.

### 3.6.2 Qualidades Fisiológicas

Além dos problemas encontrados com o processo de secagem quanto às qualidades fisiológicas das sementes, devido à temperatura, existem também as questões que envolvem o encolhimento do produto, resultado da redução de umidade dos materiais.

Diante disto, as avaliações das qualidades fisiológicas neste trabalho visam verificar, principalmente, se o embrião apresenta aptidão para produzir uma nova plântula, mesmo quando a semente sofre o processo de encolhimento, devido à redução da umidade.

Além de verificar conjuntamente as condições operacionais e o efeito das barreiras físicas na transferência de massa entre as amostras e o fluido.

Para tanto, foram conduzidos experimentos com as sementes que passaram pelo processo de secagem dentro e fora do fruto, relacionando-os com o tempo necessário para que as sementes apresentassem radículas e brotos (caule e folhas), durante o desenvolvimento da nova plântula.

Assim, conjuntos contendo amostras com 5 sementes foram envolvidas em papel GERMITEST e colocadas em placas de Petri, conforme o recomendado pelo Ministério da Agricultura e Reforma Agrária (1992). O sistema foi vedado por um plástico, o qual era retirado periodicamente para inserir água, visando manter a umidade relativa do ar no sistema em aproximadamente 100%. Este sistema permaneceu acondicionado em um local onde a temperatura ambiente era em torno de 25°C durante todo o período de germinação. Estas condições são consideradas adequadas para que a semente adquira intensificação da respiração, assim como das atividades metabólicas que fornecem energia e nutrientes para a retomada do crescimento (CARVALHO E NAKAGAWA, 1988).

### **3.7 Análise e Tratamento dos Dados**

Com base nos dados experimentais obtidos durante o processo de secagem foram determinadas as umidades das diferentes partes do amendoim e os respectivos adimensionais de umidade. Em seguida, a reprodutibilidade dos dados foi analisada, sendo que os critérios utilizados para esta análise serão apresentados mais adiante.

A análise dos dados, sob a visão de fenômenos de transporte, foi realizada mediante a elaboração de gráficos com o auxílio dos softwares ORIGIN<sup>®3</sup> e STATISTICS<sup>®4</sup>, relacionando os vários aspectos dos dados obtidos sob a ótica da preservação da qualidade das sementes de amendoim.

---

<sup>®3</sup> Microcal Software, Inc.; <sup>®4</sup> StatSoft, Inn.

### 3.7.1 Critérios para a Verificação de Ajuste e Reprodutibilidade dos Dados

Para a verificação da reprodutibilidade dos dados experimentais, foi realizada uma análise dos parâmetros estatísticos dos dados experimentais e as respectivas réplicas linearizadas, a exemplo do adimensional de umidade, através da equação:

$$MR = a MR_{(réplica)}; \quad (3.2)$$

O ajuste é verificado pelo parâmetro **a** próximo de 1, assegurado estatisticamente pela variância explicada (% de pontos explicados pelo modelo), desvio padrão (entre pontos experimentais e modelo) e teste t (razão entre o parâmetro a e o desvio padrão).

O mesmo procedimento foi realizado para verificar a reprodutibilidade entre as réplicas de  $A_P$ ,  $P_P$ ,  $D_{MÁX}$ ,  $D_{MÍN}$  e  $D_{MÉD}$ .

Comprovado que o método de medida é adequado, os estudos foram direcionados para a análise dos dados experimentais.

### 3.7.2 Análise dos Dados Experimentais

Mediante a representação gráfica utilizando os softwares ORIGIN<sup>®</sup> e STATISTICS<sup>®</sup>, a dinâmica de secagem foi avaliada no tocante à influência das condições operacionais e a presença de barreiras físicas na redução de umidade das partículas, bem como dos efeitos da redução de umidade na mudança de forma e encolhimento do corpo, com a visão dos fenômenos de transporte envolvidos no processo.

Visando à preservação da qualidade das sementes de amendoim foi realizada a análise da influência das condições operacionais do secador, bem como o efeito do encolhimento e da presença de barreiras físicas na fisiologia das sementes e no desenvolvimento da nova plântula.

Para tanto, foram tomadas fotos das sementes durante o processo de desenvolvimento das novas plântulas nos seguintes intervalos de tempo: primeiro dia, início da germinação, quinto dia, em que era retido o endocarpo das sementes, e no décimo dia da germinação, final do teste (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA, 1992).

Depois de realizada a análise dos dados em busca da melhor condição que as sementes devem ser submetidas no processo de secagem, para fins agrícolas, tem-se a busca da representação da equação característica da secagem convectiva do amendoim.

### **3.7.3 Representação da Equação de Secagem Convectiva do Amendoim**

Com base na análise dos dados experimentais advindos das dependências de MR em função do tempo de secagem, segundo o planejamento experimental, com diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem, foi realizada a discriminação da equação da cinética de secagem convectiva do amendoim, entre as equações empíricas e semi-empíricas usuais para representação de materiais orgânicos.

Para tanto, as equações agrupadas na Tabela 2.1, mas que apresentam no máximo dois ou três parâmetros, foram escolhidas. Foi utilizado como conjunto de dados, todas as observações experimentais que apresentaram o melhor resultado frente ao binômio processo e qualidade.

O ajuste das equações de secagem aos dados experimentais foi feito mediante à regressão não linear através do software STATISTICS<sup>®</sup>, com os parâmetros das equações, estimados pelo método dos mínimos quadrados.

O critério de avaliação do melhor ajuste foi realizado com base nos valores do coeficiente de correlação próximo à unidade, o percentual de validade dos dados que foram obtidos pelas equações, ou seja, variância explicada, baixos valores de desvio padrão e altos valores de Teste-t, que representa a razão entre o parâmetro estimado e seu respectivo desvio padrão.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a ótica de engenharia de secagem e visando à produção de sementes de amendoim para fins agrícolas, neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos, seguindo os métodos estabelecidos para o desenvolvimento do trabalho. Os resultados e as correspondentes discussões referem-se desde a etapa de coleta na lavoura, em campo, até às análises dos testes das amostras únicas, mediante a secagem por convecção forçada. Serão apresentados, também, os resultados das interações entre as qualidades fisiológicas e as propriedades físicas das sementes, em busca da melhor relação entre o processo em relação a qualidade do produto. Além disto, encontram-se reunidos os respectivos confrontos que relacionam as informações obtidas nesta pesquisa e as oriundas da literatura.

#### **4.1 Coleta em Campo e Preparação da *Arachis hipogae* L.**

As amostras de amendoim (*Arachis hipogae* L.) da variedade tatu foram coletadas de maneira aleatória e diretamente do solo nas lavouras localizadas no município de Fernando Prestes - SP. As plantas foram transportadas até o Centro de Secagem de Pastas e Sementes do DEQ/UFSCar, onde permaneceram em um vaso de polietileno rígido, por um período de cinco dias. Durante este período as amostras foram regadas com água a fim de simular as condições do campo. Este procedimento foi realizado para que se tivesse a garantia da maturidade fisiológica das sementes antes da condução dos testes de secagem (PASSOS *et al.*, 1987).

Segundo Dias (2001), a maturidade fisiológica é de fundamental importância nesta natureza de investigação, principalmente no que se refere ao planejamento e a escolha apropriada da colheita, visando adquirir qualidade e produtividade. Após este período foi realizado o procedimento da colheita manual das vagens, separando cuidadosamente os frutos das plantas.

Com o intuito e a necessidade de padronizar o tamanho dos frutos e dos subsistemas do amendoim, as amostras foram selecionadas em um lote de 98 frutos de quatro sementes, as quais se aproximam da geometria cilíndrica. Na seqüência do procedimento adotado, foi realizada a caracterização quanto ao tamanho, neste caso considerou-se o diâmetro e o comprimento de cada parte, bem como o teor de umidade inicial.

Na Tabela 4.1 encontram-se reunidos os resultados obtidos desta primeira e importante etapa dos diversos procedimentos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 4.1: Caracterização das partes do amendoim utilizadas

Parte do Amendoim	$M_0$ (% b.u.)	$D_0$ (cm)	$L_0$ (cm)
SCE	$30 \pm 1$	$0,92 \pm 0,21$	-
SSE	$31 \pm 1$	$0,90 \pm 0,15$	-
Pericarpo	$61 \pm 4$	$1,17 \pm 0,15$	$3,9 \pm 0,1$
Fruto	$43 \pm 3$	$1,1 \pm 0,2$	$3,9 \pm 0,1$

De acordo com os resultados obtidos e apresentados na Tabela 4.1, verifica-se que o teor de umidade das amostras encontra-se na faixa de maturidade fisiológica das sementes, ou seja, entre 35 a 50% em base úmida para o fruto. Estas condições também são favoráveis para a proliferação da aflatoxina. Diante disto, constata-se a importância e a necessidade do processo de secagem para esta oleaginosa, visando à redução da umidade a um valor menor que 10% em base úmida (b.u.), conforme o recomendado por Passos *et al.* (1987). Observa-se, também, que os teores de umidade dos subsistemas e do fruto são diferenciados, conforme era esperado, devido à diferença de composição entre eles.

Quanto às dimensões, as amostras que apresentaram desvios maiores que 0,21 foram descartadas. Este cuidado foi tomado em busca de obter um nível de padronização rigoroso para posterior análise do processo.

O critério de escolha do tamanho dos frutos para a realização dos experimentos, conforme mencionado no item 3.3.2, foi com base na razão L/D e no número de Reynolds de partícula dentro de um domínio de escoamento laminar. Nestas condições, ou seja, com frutos de quatro sementes, é possível avaliar a influência das deformações dentro de condições limites de escoamento de fluido de secagem para o amendoim.

Diante destes resultados, que visaram a padronização das amostras, partiu-se para os testes preliminares, a fim de avaliar o procedimento experimental na operação da unidade de secagem.

## **4.2 Testes Preliminares das Amostras na Unidade de Secagem**

Este item apresentará os testes preliminares das amostras submetidas no equipamento de secagem tendo como princípio o escoamento de fluido sobre corpos submersos, a fim de verificar as garantias experimentais mencionadas por Cassandre *et al.* (2001).

### **4.2.1 Verificação do Procedimento e das Garantias Experimentais**

Obtida a padronização das amostras buscou-se, então, a verificação das condições experimentais que foi realizada mediante alguns testes preliminares. Esta etapa tem o intuito de averiguar as condições experimentais usadas no equipamento de secagem de

modo a viabilizar que as garantias experimentais sejam asseguradas durante os testes das amostras na secagem convectiva.

Foram verificadas se as distribuições de temperatura e velocidade do ar apresentavam-se uniformes na região central da secção transversal do escoamento do fluido, segundo os resultados obtidos por Cassandre *et al.* (2001).

Assim, amostras previamente selecionadas foram submetidas na unidade de secagem e através de testes preliminares foi constatado que a velocidade e a temperatura do fluido mantiveram seus valores aproximadamente constantes durante os experimentos, não ultrapassando as precisões de medidas dos instrumentos utilizados.

As amostras utilizadas nestes testes foram colocadas nas plataformas de sustentação, Figura 3.6, que auxiliavam na obtenção de dados através do método intermitente. Para todas as amostras foi possível utilizar uma única haste conectada à plataforma de sustentação, minimizando a interferência da plataforma no escoamento do ar de secagem.

Um efeito importante que foi considerado nesta etapa da pesquisa foram as possíveis rotações que as amostras poderiam sofrer durante o processo, devido à existência de diferentes valores de velocidade do fluido, na direção do escoamento do ar. Mas conforme era esperado, quando as mesmas foram inseridas no centro da câmara de secagem, as rotações em torno do suporte (haste) não foram observadas. Isto indica que além da distribuição uniforme de velocidade, a influência das paredes do túnel de secagem foi desprezível sobre o escoamento do ar na região de localização das amostras.

Com as medidas de temperatura e velocidade do ar de secagem, utilizando-se o termoanemômetro, e com os valores das propriedades do ar apresentados na Tabela 3.2, foi possível calcular o número de Reynolds de partícula, para cada parte do amendoim. Este consiste na razão entre as forças inerciais e viscosas, geradas pelo fluido em movimento no interior da câmara de secagem sobre o corpo submerso. Os valores médios do mesmo encontram-se reunidos na Tabela 4.2 para cada parte do amendoim.

Tabela 4.2: Valores médios do número de Reynolds de partícula para cada parte do amendoim.

SCE									
$T_f$	30°C			40°C			50°C		
$V_f$	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
$Re_D$	555 ± 4	1008 ± 27	1584 ± 25	486 ± 4	1083 ± 5	1302 ± 11	513 ± 4	1027 ± 9	1541 ± 14
SSE									
$T_f$	30°C			40°C			50°C		
$V_f$	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
$Re_D$	553 ± 5	1002 ± 17	1564 ± 16	475 ± 6	1073 ± 4	1299 ± 10	510 ± 3	1017 ± 8	1530 ± 11
Pericarpo									
$T_f$	30°C			40°C			50°C		
$V_f$	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
$Re_D$	660 ± 11	1371 ± 21	1891 ± 17	532 ± 11	1110 ± 18	1817 ± 19	511 ± 15	1072 ± 17	1640 ± 29
Fruto									
$T_f$	30°C			40°C			50°C		
$V_f$	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
$Re_D$	661 ± 11	1360 ± 20	1984 ± 12	529 ± 17	1107 ± 18	1823 ± 23	514 ± 17	1077 ± 24	1644 ± 34

Através da Tabela 4.2 constata-se que para todas as partes os valores de Reynolds de partícula são menores que  $5 \times 10^5$ . Assim, é possível afirmar que o fluido apresenta escoamento laminar em todas as condições operacionais utilizadas e para todas as partes do amendoim.

Entretanto, foi necessário averiguar o comportamento de cada amostra frente ao escoamento do fluido de secagem, bem como, o efeito da retirada das amostras para a quantificação da massa.

As observações foram feitas a partir de imagens tomadas durante o processo de secagem de cada amostra com o auxílio de uma superfície luminosa, conforme mostrada na Figura 3.8, construída no próprio Centro de Secagem de Pastas e Sementes. As dificuldades encontradas, bem como, as decisões tomadas a respeito da posição de cada parte do amendoim para a tomada de imagens, serão discutidas nos próximos itens.

#### **4.2.2 Avaliação do Comportamento das Amostras Frente ao Escoamento do Fluido**

As amostras submetidas ao escoamento do fluido passaram pelo procedimento de obtenção das imagens, na superfície luminosa, para posterior análise do comportamento das mesmas em relação aos efeitos do escoamento laminar. As Figuras 4.1(a) e (b) apresentam as fotos típicas da semente processadas fora do pericarpo e com o endocarpo, tomadas sob a visão de topo no início e no final do processo de secagem, respectivamente. Para as outras partes do amendoim o critério de obtenção das imagens foi conduzido de maneira análoga.

Através das Figuras 4.1 (a) e (b), pode-se observar os efeitos do escoamento laminar sobre o corpo submerso, em que é mostrada a formação da concavidade localizada na região posterior ao escoamento do ar, conforme era esperado, devido às forças mecânicas.

Entretanto, a posição dos cotilédones em relação ao ar de secagem teve que ser averiguada, devido ao comportamento que os mesmos apresentaram diante do escoamento do fluido durante os testes de secagem.

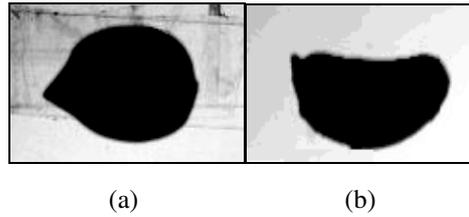


Figura 4.1: Fotos da semente processadas fora do pericarpo e com endocarpo sob a visão de topo com escoamento do ar de baixo para cima, em diferentes tempos de secagem. Início do processo (a), final do processo (b) de secagem.

Na Figura 4.2 tem-se um esquema do fluxo de ar ao redor de uma esfera, através do plano de separação entre os cotilédones e a direção do ar de secagem, que mostra um cotilédone acima e um abaixo do plano.

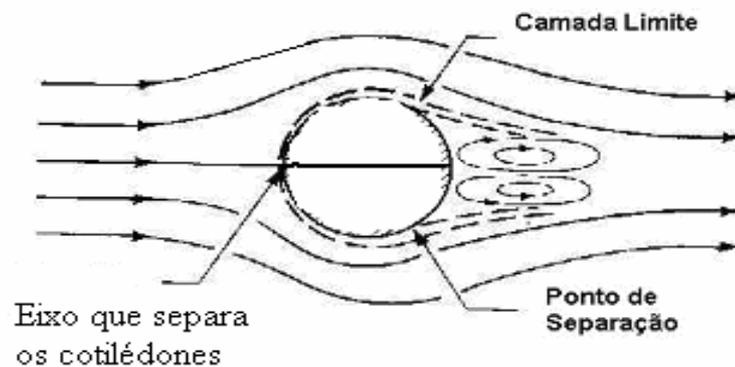


Figura 4.2: Esquema do fluxo de ar de secagem ao redor de uma esfera, que representa o plano de separação entre os cotilédones.

Neste esquema, Figura 4.2, os cotilédones encontram com o plano de separação paralelos ao escoamento do ar de secagem. Tomando o plano de separação como referência, pode-se dizer que há um cotilédone abaixo e um acima do plano. Esta figura auxiliará no entendimento das discussões feitas a seguir.

O primeiro teste das sementes foi realizado com os cotilédones paralelos à direção do escoamento do ar de secagem, Figura 4.2. Durante os testes foi constatado que o comportamento dos cotilédones eram diferentes em relação ao fenômeno de encolhimento.

As Figuras 4.3 (a), (b) e (c) mostram fotos típicas das sementes, com um corte longitudinal que foi realizado após o processo de secagem. Estas imagens representam as sementes que foram processadas fora do pericarpo com cotilédones paralelos ao escoamento do ar de secagem evidenciando a diferença de comportamento entre os cotilédones.

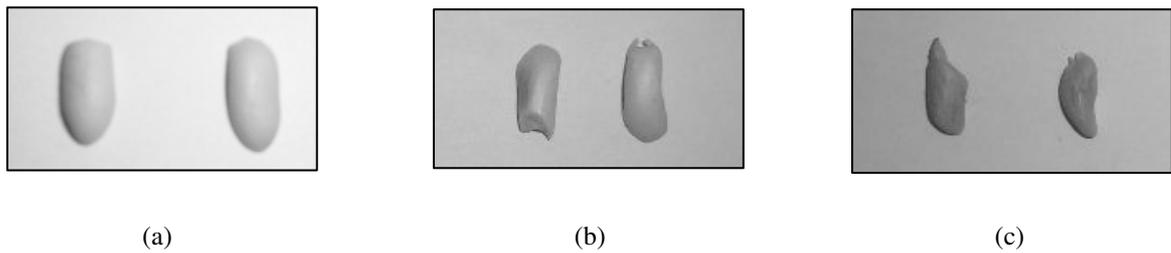


Figura 4.3: Fotos de sementes de amendoim com cortes longitudinais entre os cotilédones processadas dentro do pericarpo (a), fora do pericarpo e com endocarpo (b) e fora do pericarpo e sem endocarpo (c) com à direção do escoamento do ar de secagem da esquerda para direita.

Através destas imagens e com o auxílio do software IMAGE PRO PLUS<sup>®</sup> foi possível obter os valores do diâmetro mínimo, ou seja, comprimento da linha mais curta unindo dois pontos contidos no perímetro da partícula e passando pelo centróide. Os valores foram de 0,89 e 0,87cm para os cotilédones da parte de cima das sementes processadas com e sem endocarpo, respectivamente. As mesmas encontram-se, respectivamente localizadas ao lado direito das Figuras 4.3 (a) e (b). Para os cotilédones abaixo do plano, os valores foram de 0,85 e 0,79cm para das sementes processadas com e sem endocarpo e localizadas ao lado esquerdo das Figuras 4.3 (a) e (b), respectivamente.

Com base nestes valores foi constatado que o efeito do escoamento laminar era diferenciado nos cotilédones. Portanto, a posição dos mesmos em relação ao escoamento do ar deveria ser alterada de forma a evitar uma análise incorreta do efeito do escoamento do fluido sobre as sementes. Estas análises incorretas são devidas à formação de sombras provocadas pela superposição do cotilédone que apresentaram os maiores valores de diâmetro mínimo.

Visando minimizar a formação de sombras provocadas pelo encolhimento diferenciado dos cotilédones, as sementes úmidas fora do pericarpo, com e sem endocarpo, foram posicionadas na câmara de secagem com o plano de separação entre os cotilédones, perpendiculares em relação ao escoamento do ar de secagem. Desta forma, pôde-se avaliar o efeito do comportamento das sementes de amendoim em relação ao escoamento laminar, uma vez que nesta posição os cotilédones das sementes não apresentaram comportamentos diferenciados.

Solucionado o problema da posição dos cotilédones em relação à direção do escoamento ar de secagem passou-se, então, para a etapa de avaliação da influência da retirada periódica das amostras para quantificação da massa e tomada de imagens.

A Figura 4.4 mostra um resultado típico do adimensional de umidade em função do tempo de operação de secagem, parametrizado na primeira hora do processo em dois intervalos distintos de tempo de retirada da amostra para a quantificação da massa. Nesta figura são apresentados os resultados referentes ao pericarpo, nas condições operacionais de 40°C e 1,0 m/s.

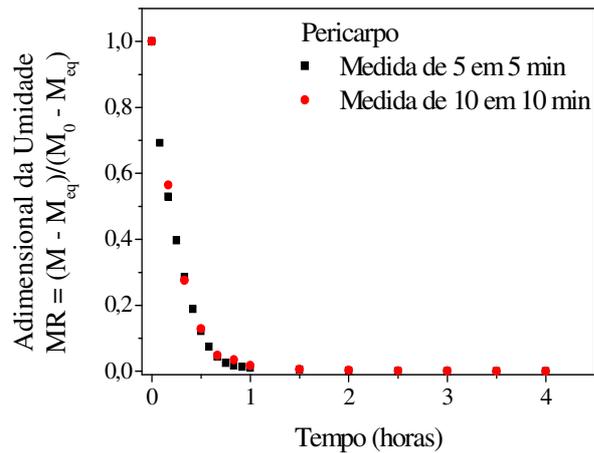


Figura 4.4: MR em função do tempo para o pericarpo parametrizado em períodos de tempo distintos.

Na Tabela 4.3 encontram-se reunidos os parâmetros estatísticos obtidos com a regressão linear dos dados replicados destas medidas e determinações, através da Equação (3.2).

Tabela 4.3: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de MR, referentes aos experimentos mostrados na Figura 4.4.

Parte do amendoim	Parâmetro a (* (**) (Eq. 3.2)	Coefficiente de correlação	Desvio padrão	Variância Explicada (%)	Teste-t
Pericarpo	0,9843	0,9982	0,0145	98,11	67,88

\* p-valor < 0,001

\*\* Nível de significância de 5%

A partir da Figura 4.4 é possível fazer a comparação visual da análise da influência das retiradas periódicas das amostras da unidade de secagem, mediante os experimentos com diferentes números de retiradas, em intervalos de 5 em 5 minutos e de 10 em 10 minutos para o procedimento de quantificação da massa.

Diante da mesma nota-se, visualmente pelas proximidades dos pontos, que o tempo necessário para a quantificação da massa e tomada de imagens não interferiram de maneira significativa nos resultados desta metodologia. Este fato é assegurado pelos valores dos parâmetros estatísticos de análise, equação 3.2, conforme mostra a Tabela 4.3.

Nesta tabela o valor estimado para o parâmetro **a** é aproximadamente igual a unidade, sendo a validade estatística deste parâmetro assegurada pelo baixo valor de desvio padrão e alto valor de Teste-t e variância explicada.

O nível de significância, ou seja, a chance de erro, desta análise estatística é de 5%. Portanto, o P valor menor que 0,05 possibilita assegurar a validade do parâmetro **a** com no mínimo 95% de confiança.

Assim, pôde-se constatar que o tempo, cerca de 50 segundos, necessário para a determinação da massa da amostra e posterior tomada de imagem não influenciou perceptivelmente nos resultados desta metodologia

Diante do exposto, observa-se que as necessidades requeridas para a realização dos testes de secagem para este tipo de partícula foram atendidas. Além disto, nota-se que, a metodologia utilizada permite analisar o efeito do escoamento do fluido na camada limite para este tipo de partícula, quanto ao transporte de umidade, encolhimento e evolução da forma da amostra, durante a secagem por convecção forçada.

### **4.3 Análise da Influência das Condições Operacionais e da Presença das Barreiras Físicas na Redução de Umidade das Partículas**

Através dos resultados experimentais de umidade da partícula e tempo obtidos ao longo de cada processo de secagem, traçaram-se as curvas do adimensional de umidade (MR), Equação 3.1, em função do tempo de secagem a fim de verificar os efeitos da velocidade e da temperatura do ar de secagem durante o processo para cada parte do amendoim. A umidade relativa do ar de secagem foi de aproximadamente  $(19 \pm 1)\%$ .

Com a finalidade de facilitar a apresentação, a análise dos resultados referentes às influências das condições operacionais na cinética de secagem, bem como, as análises de reprodutibilidades dos dados obtidos serão discutidos separadamente para cada parte do amendoim. A seguinte ordem será adotada: semente com endocarpo, semente sem endocarpo, pericarpo e fruto. No tocante à apresentação dos resultados pertinentes às diferentes camadas que compõe o sistema será feita a avaliação dos efeitos das barreiras, diante da dessorção de água da partícula.

#### 4.3.1 Sementes com a Proteção do Endocarpo

A Figura 4.5 apresenta um resultado típico das medidas iniciais dos adimensionais de umidade em função do tempo de secagem, assim como sua réplica para a semente com endocarpo (SCE), visando avaliar a reprodutibilidade dos dados advindos dos experimentos no secador.

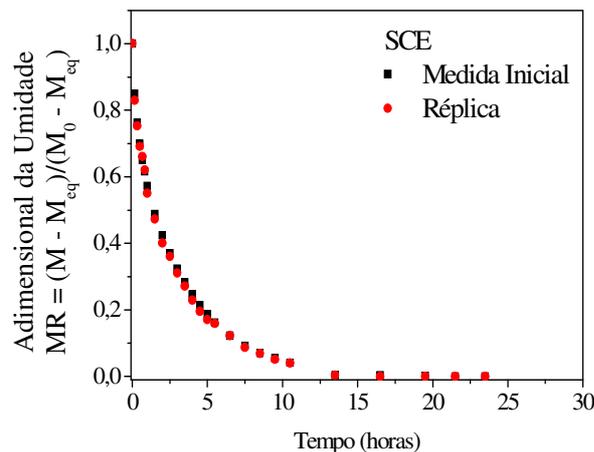


Figura 4.5: MR em função do tempo para a SCE na condição de 50°C e 1,0 m/s.

O gráfico apresentado na Figura 4.5 foi construído de maneira que fosse possível visualizar a reprodutibilidade dos dados das determinações replicadas. Esta pode ser constatada pela proximidade dos pontos dos adimensionais de umidade em função do tempo

de secagem. A reprodutibilidade é assegurada pelo modelo de ajuste do modelo estatístico, Equação 3.2, com os parâmetros apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de MR, referentes aos experimentos mostrados na Figura 4.5.

Parte do amendoim	Parâmetro <b>a</b> (*) (**) (Eq. 3.2)	Coefficiente de correlação	Desvio padrão	Variância Explicada (%)	Teste-t
SCE	0,9939	0,9996	0,0091	98,65	109,22

\* p-valor < 0,001

\*\* Nível de significância de 5%

Nesta tabela o valor estimado para o parâmetro **a** é aproximadamente igual à unidade, o que indica que os valores determinados para MR foram aproximadamente igual a 99,39% do valor das determinações replicadas.

A validade estatística do parâmetro **a** é assegurada pelo fato do desvio padrão ser 109,22 vezes menor que o parâmetro **a**, Teste-t, e pelo alto índice de variância explicada, que mostra a percentagem de validade dos dados obtidos pelo modelo de ajuste.

O nível de significância, ou seja, a chance de erro desta análise estatística é de 5%. Portanto o valor P menor que 0,05 possibilita assegurar a validade do parâmetro com no mínimo 95% de confiança. Estes resultados típicos confirmam a reprodutibilidade dos dados de secagem obtidos e a validade da aplicação do método experimental empregado para determinação de curvas características de secagem.

Visando obter as informações sobre a cinética de secagem das sementes com endocarpo (SCE), curvas do adimensional de umidade em função do tempo de secagem foram construídas nas diferentes condições operacionais utilizadas, seguindo o planejamento experimental.

Os resultados típicos do adimensional de umidade em função do tempo de secagem, para a temperatura do ar de 30°C, parametrizado nos diferentes valores de velocidades utilizadas, são mostrados na Figura 4.6. Enquanto que a Figura 4.7 reúne os resultados típicos do adimensional de umidade em função do tempo de secagem advindos dos

testes de secagem conduzidos a 0,5 m/s, nas condições operacionais de temperatura de 30, 40 e 50°C.

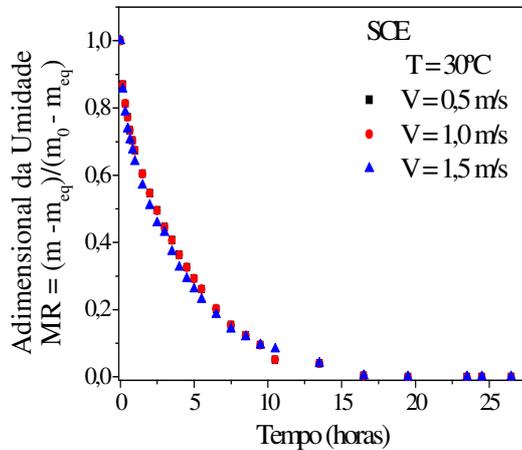


Figura 4.6: MR em função do tempo de secagem para o SCE em  $T = 30^{\circ}\text{C}$ , parametrizado em  $V$ .

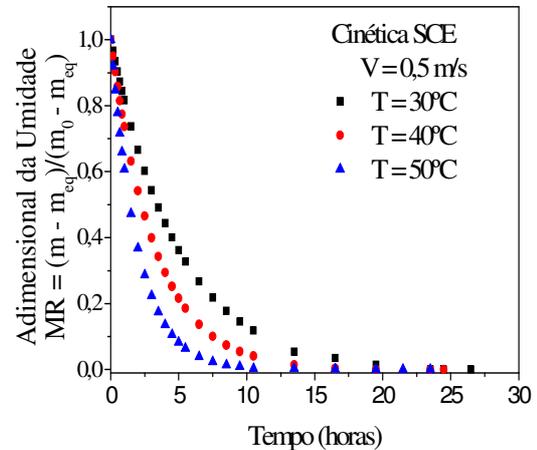


Figura 4.7: MR em função do tempo de secagem para o SCE em  $V = 0,5 \text{ m/s}$ , parametrizado em  $T$ .

As curvas de secagem mostradas nas Figuras 4.6 e 4.7 foram elaboradas de maneira a tornar possível a visualização dos efeitos, separadamente, da influência da temperatura e da velocidade do ar na cinética de secagem.

A partir da Figura 4.6 é possível observar que a velocidade do ar de secagem não apresenta influência significativa no processo, ou seja, a taxa de secagem não aumenta devido ao aumento da velocidade do ar de secagem, conforme era esperado.

Resultado semelhante foi encontrado por Barrozo (1995) na secagem de sementes de soja, também rica em óleo, e considerada uma oleaginosa, assim como, o amendoim.

Conforme era esperado, o período de secagem a taxa constante, não foi observado, o que é uma característica das oleaginosas. Segundo Brooker *et al.* (1992), as oleaginosas raramente apresentam este período, a não ser quando colhidos imaturos, ou seja, quando a maturidade fisiológica ainda não foi atingida, ou quando passam por um processo excessivo de reumidificação, o que não é caso do material em estudo.

Quanto à influência da temperatura no processo de secagem, Figura 4.7, conforme era esperado, também, pode-se constatar que o aumento da mesma causou o

aumento da taxa de secagem, assim como, encontrado por Barrozo (1995) na secagem de soja e por Palácios *et al.* (2004) na secagem de sementes de amendoim com endocarpo.

A influência da temperatura no processo se deve ao fato do aumento da mesma elevar a quantidade de energia a ser transferida entre o ar de secagem e a amostra, facilitando assim a transferência de massa no material para o ar de secagem. Esta análise vale para toda a faixa de velocidade usada nos experimentos.

Diante disto, pode-se afirmar que o mecanismo difusivo controla o processo de secagem das sementes de amendoim com endocarpo. No entanto, é necessário obter informações sobre o efeito da barreira física, endocarpo, no processo de secagem e neste sentido o endocarpo da semente de amendoim foi retirado cuidadosamente visando avaliar o comportamento apenas dos cotilédones frente à secagem por convecção forçada.

#### **4.3.2 Sementes sem a Proteção do Endocarpo**

Para avaliar o comportamento apenas dos cotilédones do amendoim na secagem por convecção forçada, experimentos com as sementes de amendoim sem a proteção do endocarpo foram conduzidos com base no planejamento experimental. Este procedimento também permitirá avaliar o efeito da presença das barreiras físicas.

Na Figuras 4.8 tem-se apresentado o adimensional de umidade, MR, em função do tempo de secagem, para um experimento típico, assim como sua réplica para a semente sem endocarpo (SSE).

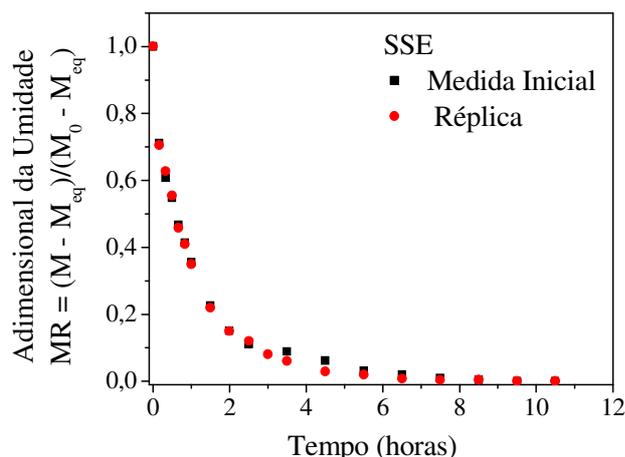


Figura 4.8: MR em função do tempo para a SSE na condição de 50°C e 1,0 m/s.

A Tabela 4.5 mostra os parâmetros estatísticos utilizados para verificar o ajuste do modelo estatístico, Equação 3.2.

Tabela 4.5: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de MR, para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes aos experimentos mostrados na Figura 4.8.

Parte do amendoim	Parâmetro <b>a</b> (*) (**) (Eq. 3.2)	Coefficiente de correlação	Desvio padrão	Variância Explicada (%)	Teste-t
SSE	1,0212	0,9992	0,0367	97,87	28

\* p-valor < 0,001

\*\* Nível de significância de 5%

De maneira análoga à SCE, a Figura 4.8 permite fazer uma observação visual da reprodutibilidade das determinações replicadas, a qual é verificada através da proximidade dos dados dos adimensionais de umidade em função do tempo, bem como, pelo ajuste do modelo estatístico, Equação 3.2, com parâmetros agrupados na Tabela 4.5.

A Tabela 4.5 mostra que o valor estimado para o parâmetro **a** é aproximadamente igual à unidade, o que indica que a determinação inicial de MR foi, em média, apenas 2,12% maior que a determinação de MR replicada. A validade estatística deste parâmetro é assegurada com desvio padrão 28 vezes menor que este parâmetro, Teste t, e pelo

alto índice de variância explicada, que mostra a percentagem de validade dos dados obtidos pelo modelo estatístico.

A chance de erro desta análise estatística, assim como o obtido para SCE, é de 5%. Portanto o valor P menor que 0,05 possibilita assegurar a validade do parâmetro com no mínimo 95% de confiança, considerando-se então as medidas de MR em função do tempo de secagem como reproduzíveis.

Tendo em vista o desafio apresentado a respeito do comportamento dos cotilédones de amendoim em relação à secagem por convecção forçada, curvas características foram construídas e os resultados típicos para a semente sem o endocarpo estão representados nas Figuras 4.9 e 4.10. Estas figuras foram elaboradas de forma a tornar possível a visualização dos efeitos isolados das variáveis de temperatura e velocidade do fluido de secagem.

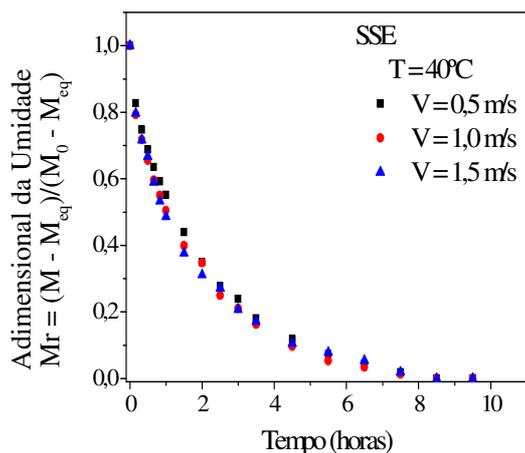


Figura 4.9: MR em função do tempo de secagem para o SSE em  $T = 40^{\circ}\text{C}$ , parametrizado em  $V$ .

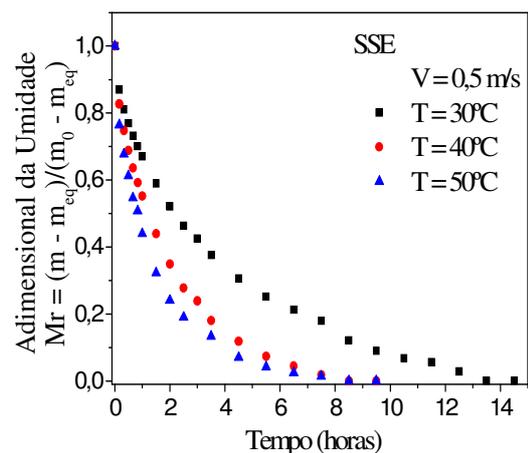


Figura 4.10: MR em função do tempo de secagem para o SSE em  $V = 0,5 \text{ m/s}$ , parametrizado em  $T$ .

Com base na Figura 4.9 é possível observar que a velocidade do ar de secagem não apresentou influência significativa no processo de secagem das sementes sem o endocarpo. No entanto, o aumento da temperatura, que pode ser observada na Figura 4.10, fez com que a taxa de secagem aumentasse, devido à maior transferência de energia entre o ar de secagem e a amostra, facilitando desta maneira a evaporação da água, tanto para a semente com endocarpo, como para a semente sem o endocarpo.

De forma análoga às sementes com a proteção do endocarpo, o período de secagem à taxa constante não foi perceptível.

Para avaliar a presença da barreira física, que neste caso se refere ao endocarpo, foi necessário construir gráficos parametrizados em SCE e SSE nas diversas condições de temperatura e velocidade. No entanto, esta análise será feita mais adiante no item 4.3.5 que se refere ao efeito da presença dos tegumentos na dessorção de água das amostras.

Com base nos resultados obtidos sobre o comportamento isolado da semente sem o endocarpo, constata-se que os mecânicos internos controlam a transferência de massa e a resistência externa pode ser considerada desprezível, assim como encontrado para a semente com endocarpo. Ou seja, a transferência de massa no processo é tipicamente difusiva.

### **4.3.3 Pericarpo do Fruto**

Seguindo a mesma linha de raciocínio apresentada pelo item anterior, este item tem como objetivo apresentar o comportamento da secagem da outra barreira física do amendoim, o pericarpo do fruto, ou seja, a barreira externa da vagem. Esta, entretanto, de acordo com sua característica, apresenta uma estrutura rígida e é responsável por proteger o tecido meristemático e o de reserva contra impactos mecânicos (CARVALHO & NAKAGAWA, 1988).

Além disto, o conhecimento do comportamento desta barreira em relação ao escoamento do ar de secagem poderá abrir a possibilidade de novos estudos, visto que o pericarpo é um subsistema que pode ser usado como combustível não fóssil e renovável (GERIN *et al.*, 1996).

Para tanto, as vagens do amendoim que apresentavam 4 sementes foram abertas com auxílio de uma lâmina e as sementes foram retiradas. Em seguida, as partes do pericarpo foram novamente unidas e conduzidas para a unidade de secagem, conforme já apresentado.

Através das massas medidas durante o processo de secagem, utilizando o método intermitente, foi possível determinar o adimensional de umidade, assim como realizado para as sementes com e sem endocarpo.

A Figura 4.11 mostra um resultado típico do adimensional de umidade, MR, em função de tempo de secagem, para um experimento típico conduzido com o pericarpo, bem como, de sua respectiva réplica. Esta figura, de forma análoga à realizada para as SCE e SSE, foi construída de maneira a tornar possível a visualização da reprodutibilidade dos dados experimentais.

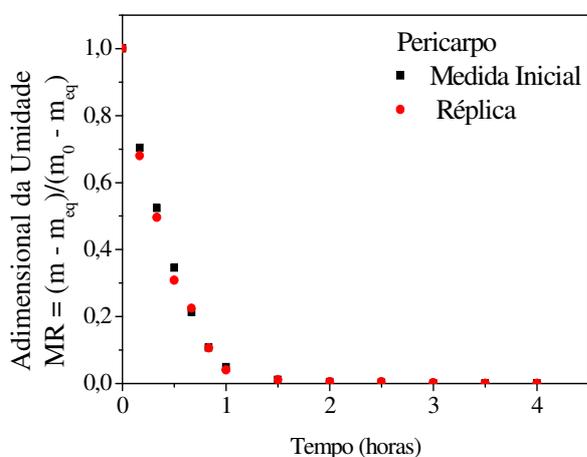


Figura 4.11: MR em função do tempo para o pericarpo na condição de 50°C e 1,0 m/s.

Através da Figura 4.11 pode-se verificar visualmente a reprodutibilidade das determinações replicadas através da proximidade dos dados de MR em função de tempo de secagem. Esta reprodutibilidade é assegurada pelo ajuste do modelo estatístico, Equação 3.2, através dos parâmetros mostrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de MR, referentes aos experimentos mostrados na Figura 4.11.

Parte do amendoim	Parâmetro <b>a</b> (*) (**) (Eq. 3.2)	Coefficiente de correlação	Desvio padrão	Variância Explicada (%)	Teste-t
Pericarpo	0,9908	0,9982	0,0082	99,19	120,83

\* p-valor < 0,001

\*\* Nível de significância de 5%

A partir da Tabela 4.6 pode-se verificar que o valor estimado para o parâmetro  $a$  é aproximadamente igual à unidade, assim como para a SCE e SSE, o que indica que a determinação inicial de MR foi, em média, apenas 0,2% menor que a determinação de MR replicada.

A validade estatística deste parâmetro é assegurada com desvio padrão aproximadamente 120,83 vezes menor que este parâmetro, Teste t, e pelo alto índice de variância explicada, que mostra a percentagem de validade dos dados obtidos pelo modelo estatístico.

O nível de significância, ou seja, a chance de erro desta análise estatística, é de 5%. Portanto, o valor P menor que 0,05 possibilita assegurar a validade do parâmetro com no mínimo 95% de confiança.

Diante disto, considera-se que as medidas de MR em função do tempo de secagem são reprodutíveis e desta maneira é possível dar seqüência ao estudo do comportamento desta barreira física frente ao escoamento do ar de secagem, assim como, realizado para a SCE e SSE.

De maneira análoga ao tratamento dos dados para a SCE e SSE, foram construídas curvas características de secagem para o pericarpo nas diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem, as quais permitem a visualização dos efeitos isolados das variáveis operacionais em questão, ou seja, temperatura e velocidade do fluido de secagem.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram resultados típicos dos adimensionais de umidade em função do tempo de secagem para o pericarpo com temperatura de 30°C, parametrizado na velocidade do ar de secagem, bem como, para a velocidade do ar de secagem igual a 1,0 m/s, parametrizado na temperatura, respectivamente.

Através da Figura 4.12 observa-se a influência da velocidade do ar de secagem na cinética de secagem do pericarpo. No tocante a esta barreira física que envolve as sementes de amendoim, constata-se que a influência da velocidade do ar de secagem é perceptível durante a primeira hora do processo, ocorrência que não foi observada para a SCE e para a SSE. Esta análise é válida para toda a faixa de temperatura utilizada.

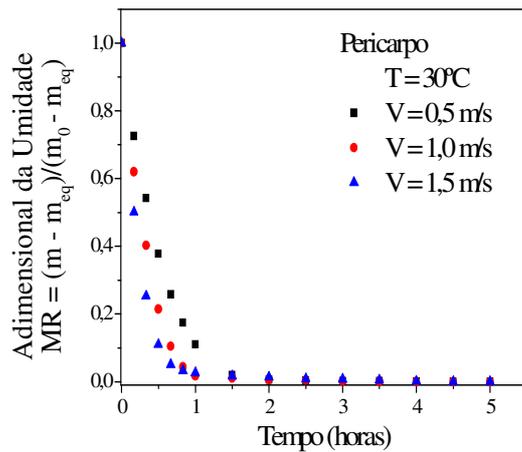


Figura 4.12: MR em função do tempo de secagem para o pericarpo em  $T = 30^{\circ}\text{C}$ , parametrizado em  $V$ .

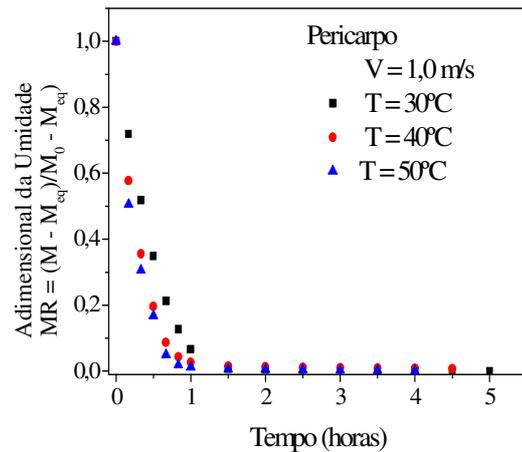


Figura 4.13: MR em função do tempo de secagem para o pericarpo em  $V = 1,0 \text{ m/s}$ , parametrizado em  $T$ .

Desta forma é possível afirmar que o mecanismo convectivo encontra-se presente no processo de transferência de massa do pericarpo quando a evaporação da água ocorre na superfície do material.

Além disto, pode-se notar, dentro do planejamento experimental conduzido, o aumento da taxa de secagem com o aumento da velocidade do ar para todos os valores de temperaturas utilizados. Este fato pode estar relacionado com a diminuição da camada limite na superfície do pericarpo, onde a taxa de secagem aumenta conforme o aumento da perturbação causado pelo aumento da velocidade do ar.

Esta análise pode ser melhor entendida observando a Figura 2.3, que mostra a evolução do regime de escoamento do fluido sobre corpos submersos em função do número de Reynolds da partícula.

A partir da Figura 4.12 é possível constatar que o aumento da temperatura faz com que a taxa de secagem aumente, assim como encontrado para a SCE e para a SSE. Este fato é devido à maior quantidade de energia transferida entre o ar de secagem e a amostra, facilitando assim a transferência de massa no material.

Através das curvas de umidade em função do tempo de secagem é possível constatar a existência do período de secagem a taxa constante. Para esta barreira física, o filme de água existente no sólido comporta-se como se o sólido não estivesse presente. Provavelmente a temperatura do sólido se aproxima da temperatura de bulbo úmido do ar de

secagem e a resistência ao transporte de massa encontra-se na corrente de ar com as condições externas controlando o processo. O ponto de transição entre o período de secagem a taxa constante e o de taxa decrescente é evidenciado pelo teor de umidade crítica do material e assinala a situação em que a água da superfície é insuficiente para manter o filme contínuo em sua área superficial.

Assim, com o intuito de calcular o teor de umidade crítica, tomaram-se como base as curvas de secagem e umidade do material, em base seca, em função do tempo, onde a declividade das curvas era constante, foram determinados o tempo de duração do período de taxa constante e o teor de umidade crítica para o pericarpo, de acordo com Keey (1972), Prado (1999) e Ferreira (2003).

A Figura 4.14 apresenta um resultado típico da umidade do pericarpo em base seca em função do tempo de secagem, para a condição de temperatura do ar de secagem de 30°C e velocidade de 1,0 m/s.

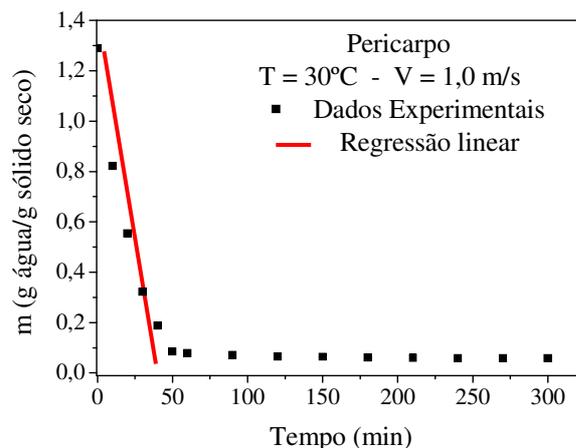


Figura 4.14: Umidade do pericarpo (b.s.) em função do tempo de secagem.

Através da Figura 4.14 pode-se verificar a existência do período de secagem a taxa constante e após atingir a umidade crítica, inicia-se o período de taxa decrescente.

Para a determinação dos valores de umidade crítica, foram encontradas algumas dificuldades. Estas dificuldades estão relacionadas à incerteza na localização do momento onde termina o período de taxa constante e se inicia o período de taxa decrescente de secagem. Diante disto, os teores de umidade crítica para a secagem de pericarpo, foram relacionadas como pontos pseudocríticos, assim como considerado por Keey (1972), Prado

(1999) e Ferreira (2003) nos estudos sobre a secagem de sementes com coberturas géis e mucilagens.

O valor de umidade crítica encontrado para o pericarpo foi de  $(0,31 \pm 0,02)$  b.s.. Em todos os casos, o teor de umidade crítica mostrou-se independente das condições operacionais, assim como encontrado por Keey (1972) e Prado (1999). Este comportamento era esperado, pois conforme relatado por Keey (1992), a umidade crítica depende das condições iniciais do material.

O tempo de duração do período de taxa constante variou de 20 a 50 minutos dependendo das condições operacionais utilizadas relacionadas com o potencial de secagem. O tempo tornava-se menor à medida que o potencial de secagem se elevava devido ao aumento da temperatura e/ou da velocidade do ar de secagem.

Para as outras partes do amendoim, já apresentadas, este teor não foi determinado uma vez que as mesmas não apresentam o período de secagem à taxa constante. Nesse caso, o mecanismo de transferência de massa entre os subsistemas e o ar de secagem era tipicamente difusivo. Isto é uma característica das oleaginosas, conforme mencionado anteriormente.

Tendo conhecido separadamente cada parte do amendoim, tem-se como próxima etapa de desenvolvimento dos testes de secagem o desafio com enfoque no sistema composto, o fruto, no qual estão contidos os cotilédones e as diferentes barreiras físicas denominadas de pericarpo e endocarpo.

#### **4.3.4 Fruto**

O fruto é formado por um sistema composto, onde estão contidos principalmente os cotilédones, o endocarpo e o pericarpo tanto do fruto como os da semente. Estes subsistemas que compõem o fruto, conforme mostrado anteriormente, apresentam mecanismos de transferência de massa diferenciados, quando avaliados de forma separada. Entretanto, é necessário avaliar também o comportamento do sistema composto para

posteriormente analisar o efeito da presença de barreiras físicas e buscar informações à respeito da melhor relação entre o processo e a qualidade do produto.

A Figura 4.15 mostra o adimensional de umidade, MR, em função de tempo de secagem, para um experimento típico, assim como a sua réplica para o fruto do amendoim.

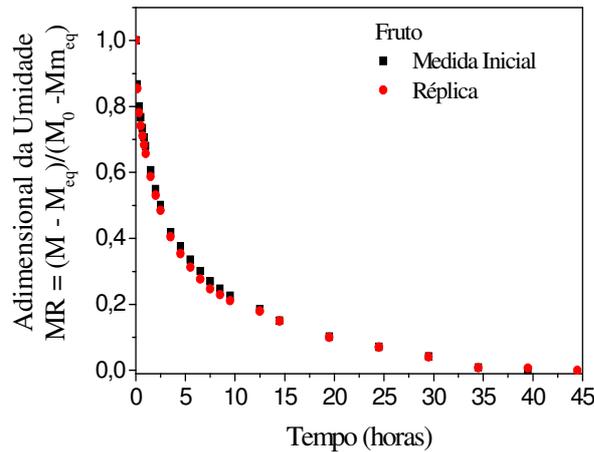


Figura 4.15: MR em função do tempo para o fruto na condição de 50°C e 1,0 m/s.

Com base na Figura 4.15 pode-se verificar visualmente a reprodutibilidade das determinações iniciais e as réplicas, através da proximidade dos dados de MR em função de tempo de secagem. A reprodutibilidade é também assegurada pela análise do ajuste do modelo estatístico, mediante a Equação 3.2, com os parâmetros mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de MR, referentes aos experimentos mostrados na Figura 4.15.

Parte do amendoim	Parâmetro <b>a</b> (*) (**) (Eq. 3.2)	Coefficiente de correlação	Desvio padrão	Variância Explicada (%)	Teste-t
Fruto	0,9812	0,9992	0,0195	98,11	50,31

\* p-valor < 0,001

\*\* Nível de significância de 5%

A Tabela 4.7 mostra que o valor estimado para o parâmetro **a** é aproximadamente igual à unidade, análogo aos subsistemas, o que indica que a determinação inicial de MR foi, em média, apenas 1,88% menor que a determinação de MR replicada, sendo que, a validade estatística deste parâmetro é assegurada com desvio padrão 50,31 vezes

menor que este parâmetro, Teste t, e pelo alto índice de variância explicada, que mostra a percentagem de validade dos dados obtidos pelo modelo estatístico.

Assim como encontrado para a SCE, SSE e para o pericarpo, o nível de significância, ou seja, a chance de erro desta análise estatística, é de 5%. Portanto, o valor P menor que 0,05 possibilita assegurar a validade do parâmetro com no mínimo 95% de confiança.

Desta forma, considera-se que as medidas de MR em função do tempo de secagem são reprodutíveis, assim como considerado para a SCE, para a SSE e para o pericarpo e desta maneira pode-se dar continuidade da busca do comportamento do sistema composto.

A Figura 4.16 mostra os resultados típicos das curvas dos adimensionais de umidade em função do tempo de secagem para o fruto, na condição de 50°C e parametrizada em V. A Figura 4.17, por sua vez, apresenta, também, resultados típicos dos adimensionais de umidade em função do tempo de secagem para o fruto, com V = 0,5 m/s e parametrizado em T.

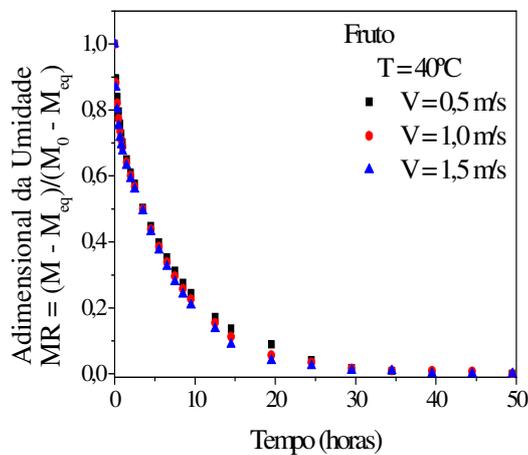


Figura 4.16: MR em função do tempo de secagem para o fruto em T = 50°C, parametrizado em V.

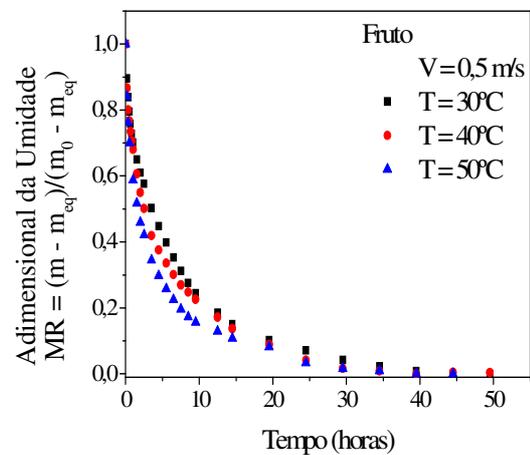


Figura 4.17: MR em função do tempo de secagem para o fruto em V = 0,5 m/s, parametrizado em T.

Assim como as outras curvas características da secagem, as representadas pelas Figuras 4.16 e 4.17 foram construídas de maneira que tornasse possível visualizar as influências isoladas da velocidade e da temperatura do ar de secagem.

De forma análoga à SCE e à SSE, a Figura 4.16 mostra que a influência da velocidade do ar de secagem também é desprezível.

A partir da Figura 4.17 é possível verificar, assim como constatado pelas outras partes do amendoim, que o aumento da temperatura fez com que a taxa de secagem aumentasse em todas as condições avaliadas. Este aumento é devido à maior transferência de energia entre o ar de secagem e a amostra facilitando assim a evaporação da água para todas as partes do amendoim. Resultado semelhante foi encontrado por Travaglini & Tango (1965), Dalbello (1995), Alves (1995), Palácios (2004) na secagem de fruto de amendoim e por Moreira *et al.* (2005) na secagem do fruto de castanha (*Castanea sativa M.*).

Conforme constatado para a semente com e sem endocarpo, o período de secagem a taxa constante também não foi significativo para o fruto. Desta forma, constata-se que os mecanismos internos controlam a transferência de massa e a resistência externa pode ser considerada desprezível em relação à semente com endocarpo, para a semente sem endocarpo, bem como, para o fruto.

Já para o pericarpo do fruto a resistência ao transporte de massa encontra-se na corrente de ar com as condições externas controlando a transferência de massa entre a amostra e o ar de secagem.

Observa-se, também, que o comportamento do pericarpo frente às condições operacionais é diferente em comparação à SCE e à SSE, assim como, do fruto. Com estes resultados é possível avaliar o efeito da presença das barreiras físicas presentes no amendoim em relação ao processo de secagem convectiva.

#### **4.3.5 Avaliação dos Efeitos dos Tegumentos na Dessorção de Água**

Para avaliar o efeito dos tegumentos na dessorção de água, curvas características de secagem foram construídas. Estas foram necessárias para tornar possível a observação dos efeitos da presença física das barreiras em relação ao fenômeno de transporte de massa, que ocorre durante o processo de secagem de sementes de *Arachis hipogae L.*

Na Figura 4.18 (a) encontram-se reunidas as curvas de secagem típicas para o fruto, SCE, SSE e para o pericarpo. A Figura 4.18 (b) representa as quatro primeiras horas de secagem de cada parte do amendoim nas mesmas condições de secagem que a Figura 4.18 (a), sendo representada pelo adimensional de umidade em função do tempo.

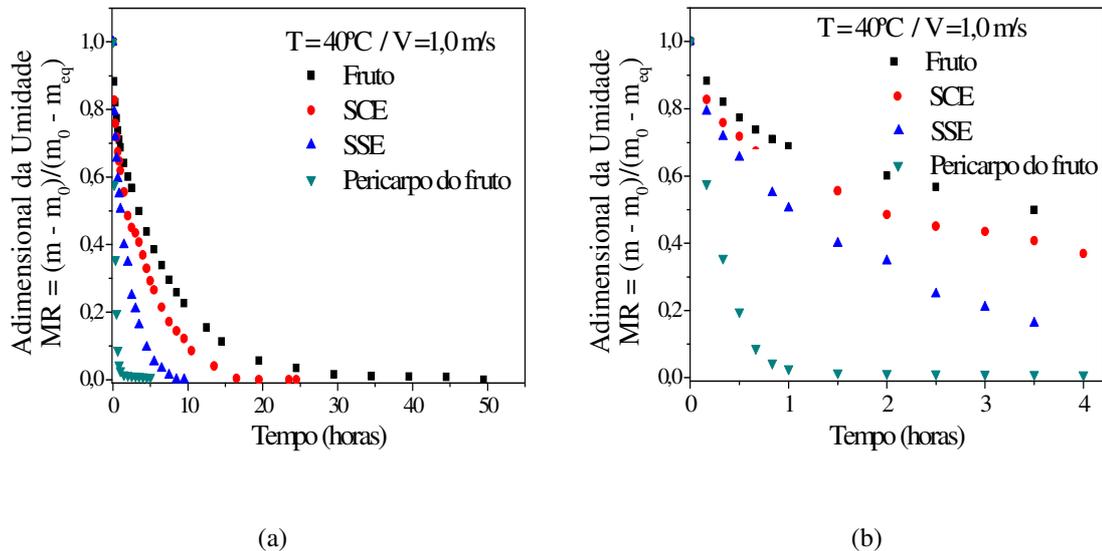


Figura 4.18: MR em função do tempo de secagem para o fruto, SCE, SSE e para o pericarpo (a) durante todo o período de secagem  $T = 40^\circ\text{C}$  e  $V = 1,0 \text{ m/s}$ ; (b) período de secagem de 0 a 4 horas.

Com base na Figura 4.18 pode-se comparar visualmente o comportamento da secagem entre as diferentes partes do amendoim e obter informações a respeito da presença das barreiras físicas do mesmo.

Deste modo, tomando como referência o fruto, ou seja, o sistema composto, e a SCE, para efeito de comparação, verifica-se que a taxa de secagem para o fruto é menor que a da SCE. Isto é devido à presença do pericarpo no fruto que torna o tempo da secagem das sementes processadas dentro do sistema composto mais prolongado.

Na Figura 4.18 (a), por exemplo, verifica-se que, para as mesmas condições de secagem, o tempo necessário de secagem para que o fruto atingisse o teor de umidade viável para o armazenamento, em torno de 10% b.u. ( $MR = 0,14$ ), foi aproximadamente duas vezes maior que para a semente ( $MR = 0,18$ ), representada pela SCE. Nota-se que para a secagem das sementes, o teor de umidade recomendado para o armazenamento era atingido após 7,5 horas do processo, enquanto que para o fruto era necessário aproximadamente um tempo de 14,5 horas, nas condições de  $40^\circ\text{C}$  e  $1,0 \text{ m/s}$ .

O efeito da presença física do endocarpo pode ser analisado tendo como referência o comportamento do processo de secagem da SCE e da SSE. Através da Figura 4.18 (a) observa-se que a SCE apresenta menor taxa de secagem em relação à SSE, conforme era esperado, devido à sua presença física atuar como barreira ao transporte de massa (VÁZQUES *et al.*, 2005). Segundo Carvalho e Nakagawa (1988), o endocarpo tem como função manter os cotilédones juntos e controlar a velocidade de troca gasosa entre as sementes e o meio, assim como o pericarpo.

Resultados similares foram encontrados por Moreira *et al.* (2005) em estudos sobre a secagem das partes de castanha (*Castanea sativa M.*). Os autores relatam que as presenças dos tegumentos causam decréscimo na taxa de secagem devido à resistência ao transporte de massa imposta pelos mesmos. Além da presença física dos tegumentos causar uma resistência ao transporte de massa, a composição química associada à textura do material podem, também, estar relacionadas a este fenômeno (VÁQUEZ *et al.*, 2005).

No tocante à secagem de amendoim, foi encontrado apenas um trabalho que avalia o amendoim em duas partes. Entretanto, o comportamento refere-se apenas ao fruto e às sementes dentro do fruto. Além disto, os testes foram conduzidos em leito fixo, o qual não permite avaliar o comportamento das partes de forma a minimizar os efeitos de outras partículas na sua vizinhança (PALACIOS *et al.*, 2004).

Dando seqüência à análise do comportamento das partes do amendoim, é possível constatar com base na Figura 4.18 (b), que o pericarpo é a parte do amendoim que apresenta a maior taxa de secagem, provavelmente, devido à formação de seu tecido.

Diante disto foram determinados os valores das taxas de secagem para a condição de 40°C e 1,0 m/s e para todas as partes do amendoim, via derivação numérica, utilizando o software ORIGIN<sup>®</sup>. Os mesmos encontram-se reunidos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Valores das taxas de secagem ((g de água/g de sólido seco)/h) em um determinado tempo de secagem para as condições de T = 40°C e V = 1,0 m/s.

Fruto	SCE	SSE	Pericarpo
$8,1 \times 10^{-2}$	$9,2 \times 10^{-2}$	$13,2 \times 10^{-2}$	$38,9 \times 10^{-2}$

Através da Tabela 4.8 constata-se que o maior valor de taxa de secagem é observado para o pericarpo, além disto, o mesmo apresenta uma grande diferença entre os valores das taxas de secagens das outras partes do amendoim.

Com base neste resultado observou-se a necessidade de realizar a tomada de imagem do pericarpo na busca de informações sobre a estrutura física deste material.

Sendo assim, o pericarpo do fruto, após passar pelo processo de secagem, foi submetido à análise de imagem que permite observações da sua estrutura.

As Figuras 4.19 (a) e (b) mostram as imagens do pericarpo, tomadas com um aumento de 100 (a) e 250 (b) vezes.

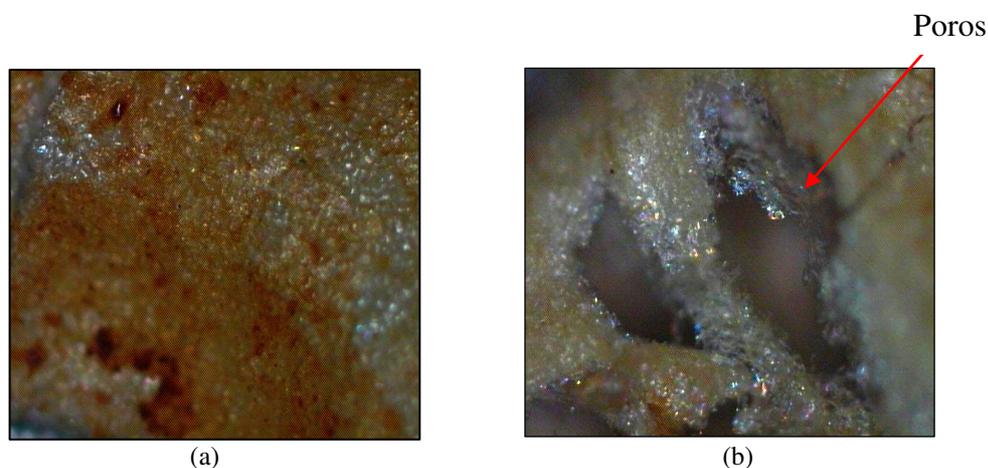


Figura 4.19 Fotos do pericarpo, (a) aumento de 100 vezes e (b) aumento de 250 vezes.

A partir da Figura 4.19 (b) observa-se que com o aumento de 250 vezes é possível constatar que a estrutura deste material apresenta poros onde água permanece confinada. Estes poros fazem com que o pericarpo apresente uma grande área específica de secagem, contribuindo assim para o transporte de massa e por consequência apresentar altas taxas de secagem.

Além das informações obtidas a respeito da análise do comportamento das amostras em relação à perda de umidade durante o processo de secagem e o efeito da presença das barreiras físicas, um outro aspecto importante a ser averiguado é a caracterização física de cada parte, quanto às mudanças de forma, encolhimento e surgimento de fissuras internas. Estes fenômenos são indesejáveis para o caso do amendoim, visto que podem causar danos nas qualidades físicas e fisiológicas deste material.

#### 4.4. Avaliações dos Efeitos da Secagem nas Mudanças de Forma e Encolhimento do Fruto e dos Subsistemas

Para avaliar o efeito da secagem na mudança de forma e encolhimento do fruto, bem como dos seus subsistemas, foi realizada a tomada de imagens durante todo o processo de secagem para cada parte estudada. Em seguida, estas imagens foram analisadas com auxílio do software IMAGE PRO PLUS<sup>®</sup>, para constatar o efeito do escoamento do fluido na mudança de forma e encolhimento para cada parte do amendoim.

As Figuras 4.20 e 4.21 mostram os resultados típicos das imagens do fruto e do pericarpo, respectivamente, que foram tomadas, vistos do topo, para posterior análise por meio do software IMAGE PRO PLUS<sup>®</sup>, com fluxo de ar direcionado de baixo para cima.

Também são mostrados nas Figuras 4.22 a 4.31 os resultados típicos dos adimensionais das medidas de área projetada ( $A_P$ ), perímetro projetado ( $P_P$ ), diâmetro máximo ( $D_{MÁX}$ ), diâmetro mínimo ( $D_{MÍN}$ ) e diâmetro médio ( $D_{MÉD}$ ) para o fruto e para o pericarpo, com as respectivas réplicas em diferentes condições de secagem.

Na Tabela 4.9 encontram-se reunidos os parâmetros estatísticos utilizados para analisar a reprodutibilidade dos dados referentes aos experimentos mostrados nas Figuras 4.22 a 4.31 e, em seguida, são apresentadas as discussões a respeito destes resultados.

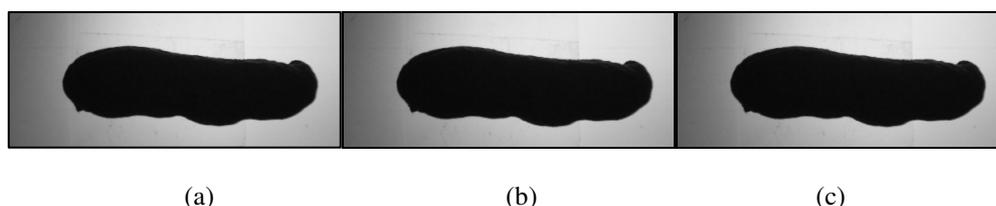


Figura 4.20: Imagens do fruto em diferentes tempos de secagem. Condição inicial (a); após 24 h de secagem (b); após 36 h de secagem(c). Escoamento do ar no sentido de baixo para cima.

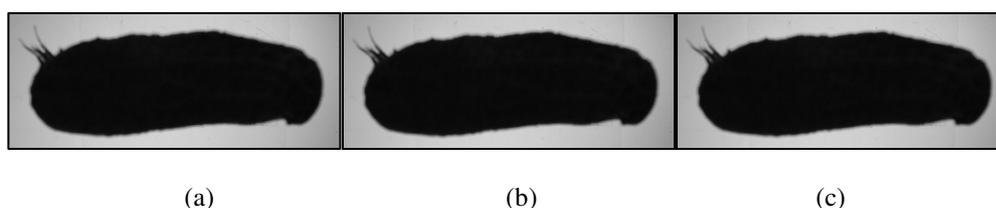


Figura 4.21: Imagens do pericarpo em diferentes tempos de secagem. Condição inicial (a); após 2 h de secagem (b); após 4 h de secagem(c). Escoamento do ar no sentido de baixo para cima.

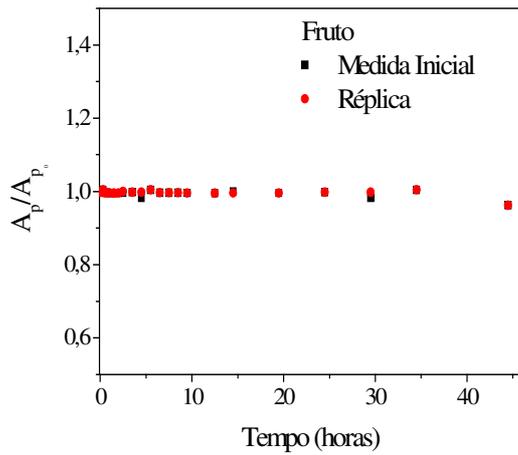


Figura 4.22:  $A_p/A_{p_0}$  em função do tempo de secagem para o fruto,  $T = 50^\circ\text{C}$  e  $V = 1,0$  m/s.

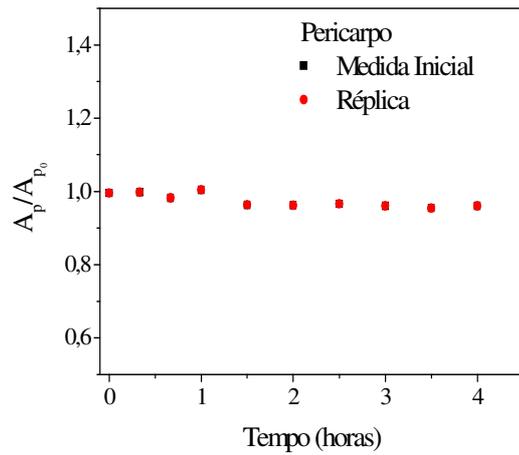


Figura 4.23:  $A_p/A_{p_0}$  em função do tempo de secagem para o pericarpio,  $T = 50^\circ\text{C}$  e  $V = 1,0$  m/s.

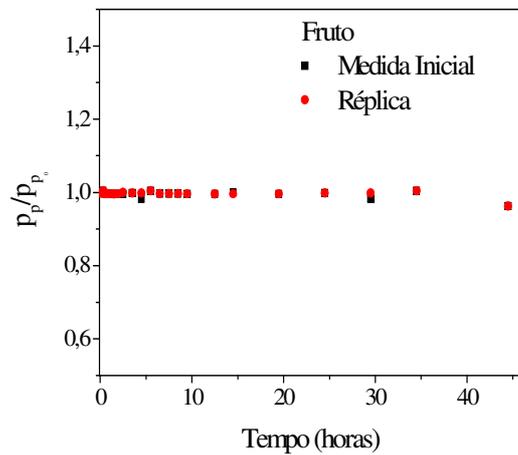


Figura 4.24:  $P_p/P_{p_0}$  em função do tempo de secagem para o fruto,  $T = 50^\circ\text{C}$  e  $V = 1,0$  m/s.

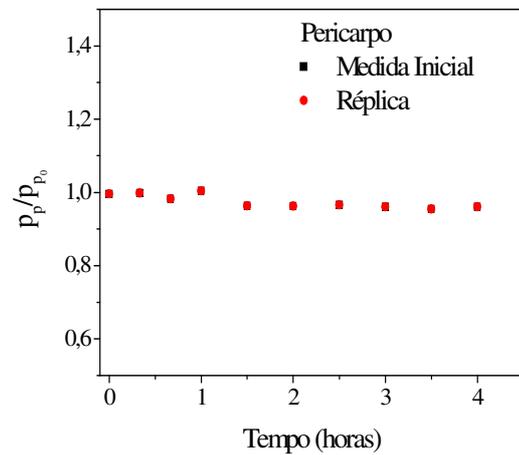


Figura 4.25:  $P_p/P_{p_0}$  em função do tempo de secagem para o pericarpio,  $T = 50^\circ\text{C}$  e  $V = 1,0$  m/s.

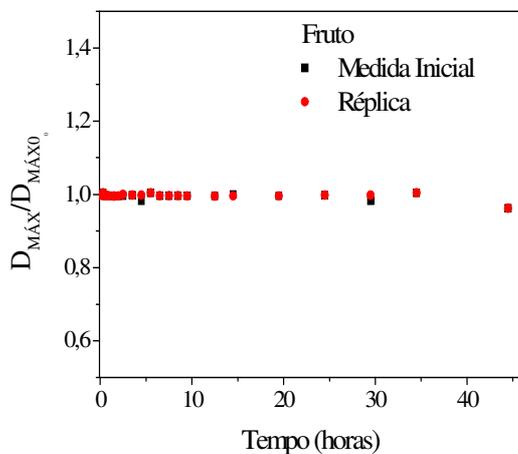


Figura 4.26:  $D_{M\acute{A}X}/D_{M\acute{A}X0}$  em função do tempo de secagem para o fruto,  $T = 50^\circ\text{C}$  e  $V = 1,0$  m/s.

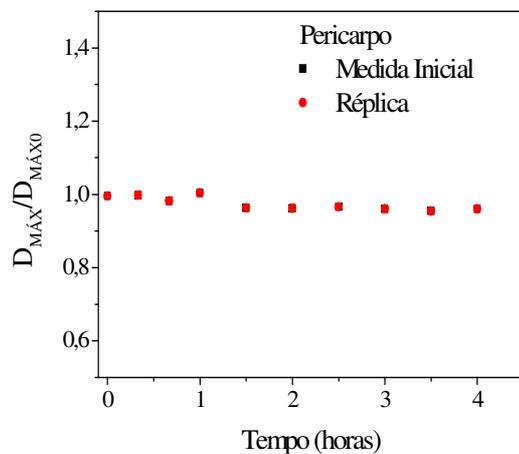


Figura 4.27:  $D_{M\acute{A}X}/D_{M\acute{A}X0}$  em função do tempo de secagem para o pericarpio,  $T = 50^\circ\text{C}$  e  $V = 1,0$  m/s.

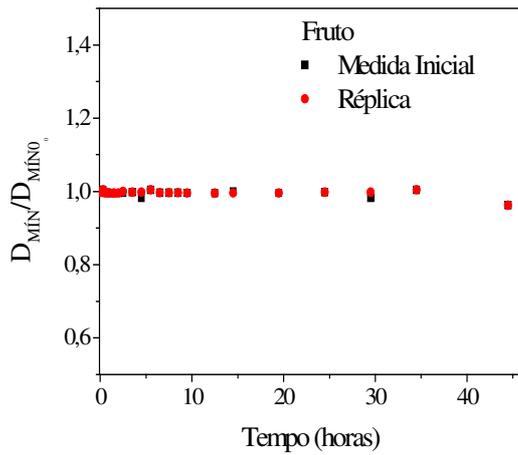


Figura 4.28:  $D_{MÍN}/D_{MÍN0}$  em função do tempo de secagem para o fruto,  $T = 50^{\circ}C$  e  $V = 1,0$  m/s.

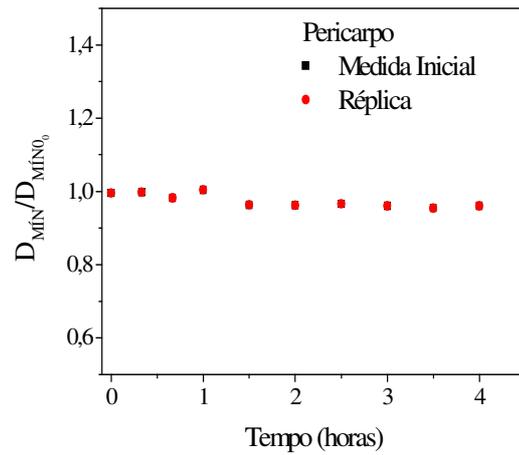


Figura 4.29:  $D_{MÍN}/D_{MÍN0}$  em função do tempo de secagem para o pericarpo,  $T = 50^{\circ}C$  e  $V = 1,0$  m/s.

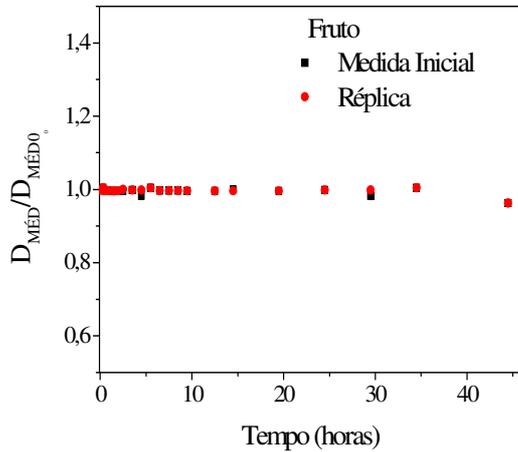


Figura 4.30:  $D_{MÉD}/D_{MÉD0}$  em função do tempo de secagem para o fruto,  $T = 50^{\circ}C$  e  $V = 1,0$  m/s.

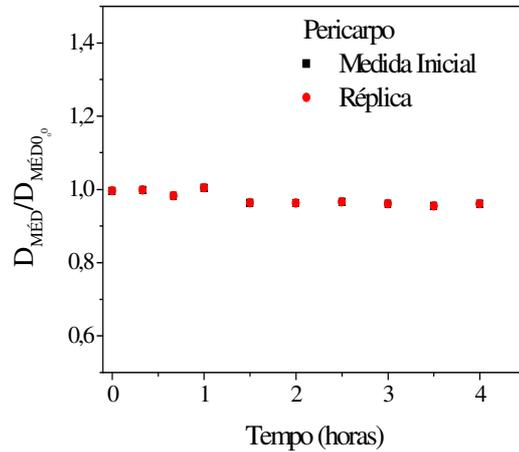


Figura 4.31:  $D_{MÉD}/D_{MÉD0}$  em função do tempo de secagem para o pericarpo,  $T = 50^{\circ}C$  e  $V = 1,0$  m/s.

Tabela 4.9: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas dos dimensionais de  $A_p$ ,  $P_p$ ,  $D_{MÁX}$ ,  $D_{MÍN}$  e  $D_{MÉD}$  do fruto e do pericarpo, referentes aos experimentos mostrados nas Figuras 4.22 a 4.31.

Dimensões	Parâmetro $a$ (*) (**) (Eq. 3.2)	Coefficiente de correlação	Desvio padrão	Variância Explicada (%)	Teste-t
Fruto					
$A_p/A_{p0}$	0,999	0,9998	0,0012	99,99	833,0
$P_p/P_{p0}$	1,001	0,9995	0,0057	99,89	176,6
$D_{MÁX}/D_{MÁX0}$	0,998	0,9961	0,0042	99,98	237,6

$D_{MÍN}/D_{MÍN0}$	0,999	0,9989	0,0061	99,99	163,8
$D_{MÉD}/D_{MÉD0}$	0,999	0,9995	0,0035	99,99	285,4
Pericarpo					
$A_p/A_{p0}$	0,999	0,9997	0,0010	99,99	999,0
$P_p/P_{p0}$	0,998	0,9998	0,0015	99,88	665,3
$D_{MÁX}/D_{MÁX0}$	0,999	0,9995	0,0016	99,99	624,4
$D_{MÍN}/D_{MÍN0}$	0,998	0,9998	0,0014	99,99	712,9
$D_{MÉD}/D_{MÉD0}$	0,997	0,9991	0,0021	99,91	474,8

\* p-valor < 0,001

\*\* Nível de significância de 5%

Os gráficos apresentados nas Figuras 4.22 a 4.31 foram construídos de forma a permitir a análise do efeito da secagem na mudança de forma e encolhimento do fruto e do pericarpo. As Figuras 4.22 a 4.31 também permitem avaliar a reprodutibilidade dos dados.

Neste sentido a reprodutibilidade dos dados pode ser avaliada visualmente, através da proximidade dos pontos apresentados pelas Figuras 4.22 a 4.31. Esta reprodutibilidade é assegurada pelo ajuste do modelo estatístico utilizado, Equação (3.2), conforme mostrado na Tabela 4.9.

Nesta Tabela 4.9 o valor estimado para o parâmetro **a** é aproximadamente igual a unidade para todas as medidas, sendo a validade estatística deste parâmetro assegurada pelos baixos desvios padrões e altos valores de Teste t.

O alto índice de variância explicada mostra que a percentagem de validade dos pontos obtidos pelo modelo estatístico foi excelente, sendo que o mesmo não apresentou valores inferiores a 99,88%.

A chance de erro desta análise estatística, a qual é apresentada pelo índice de significância, é de 5%. Portanto, o valor P menor que 0,05 possibilita assegurar a validade do parâmetro **a** com no mínimo 95% de confiança para todas as dimensões avaliadas e em ambos os casos, fruto e pericarpo. Diante disto, considera-se, então, as medidas reprodutíveis.

Dando seqüência à análise dos resultados apresentados neste item, pode-se constatar também, a partir das Figuras 4.22 a 4.31, que durante o processo de secagem não

ocorreram mudanças perceptíveis nas dimensões do fruto e do pericarpo. Diante disto, pode-se afirmar que o pericarpo foi capaz de suportar, sem alterar sua forma, a ação das forças mecânicas oriundas dos diferentes gradientes de umidade que são mais acentuados na parte posterior do escoamento do fluido de secagem.

Este fato está associado com a rígida estrutura que o pericarpo apresenta, o qual segundo Carvalho e Nakagawa (1988) tem como função proteger o tecido meristemático e o de reserva, contra efeitos mecânicos de diferentes causas. O mesmo é considerado uma barreira contra ataques de microorganismos e insetos, além de regular a velocidade de trocas gasosas entre a semente e o meio circundante, conforme já mencionado.

Para as sementes processadas com e sem o endocarpo, os resultados típicos podem ser observadas nas Figuras 4.32 e 4.33, respectivamente. Estes se referem às imagens tomadas, sob a visão de topo, para posterior análise no software IMAGE PRO PLUS<sup>®</sup>, com fluxo de ar direcionado de baixo para cima.

As Figuras 4.34 a 4.43 reúnem os diferentes resultados típicos dos adimensionais de área projetada ( $A_P$ ), perímetro projetado ( $P_P$ ), diâmetro máximo ( $D_{MÁX}$ ), diâmetro mínimo ( $D_{MÍN}$ ) e diâmetro médio ( $D_{MÉD}$ ) para as sementes com e sem endocarpo, em função do tempo de secagem para o experimento inicial e sua réplica.

A partir da Tabela 4.10 observa-se os parâmetros estatísticos reunidos, os quais foram utilizados para avaliar a reprodutibilidade dos dados referentes aos experimentos mostrados nas Figuras 4.34 a 4.43. Em seguida, encontram-se as discussões pertinentes a estes resultados.

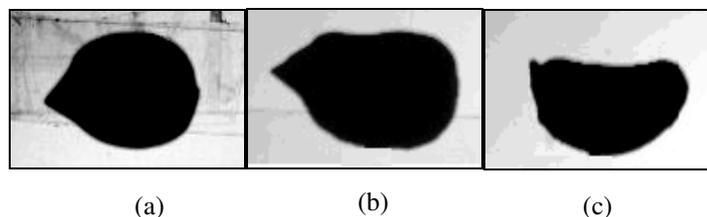


Figura 4.32: Imagens SCE em diferentes tempos de secagem. Condição inicial (a); após 3,5 h de secagem (b); após 12 h de secagem (c). Escoamento do ar está no sentido de baixo para cima.

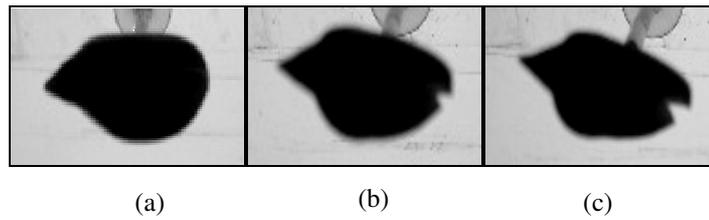


Figura 4.33: Imagens SSE em diferentes tempos de secagem. Condição inicial (a); após 2 h de secagem (b); após 6 h de secagem (c). Escoamento do ar está no sentido de baixo para cima.

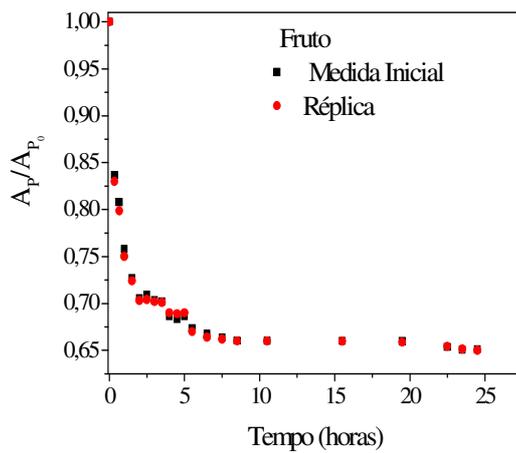


Figura 4.34:  $A_p/A_{p0}$  em função do tempo de secagem para SCE,  $T = 50^\circ\text{C}$  e  $V = 1,0$  m/s.

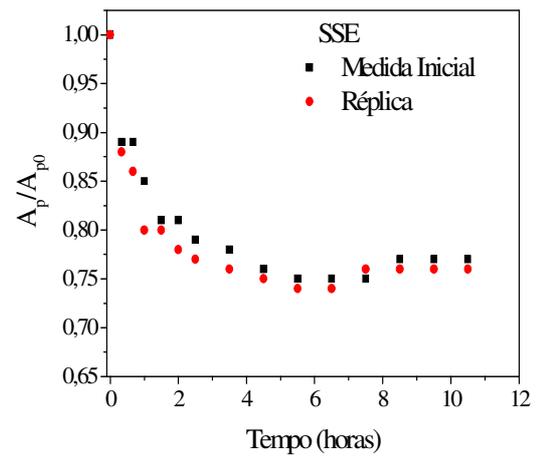


Figura 4.35:  $A_p/A_{p0}$  em função do tempo de secagem para a SSE,  $T = 50^\circ\text{C}$  e  $V = 1,0$  m/s.

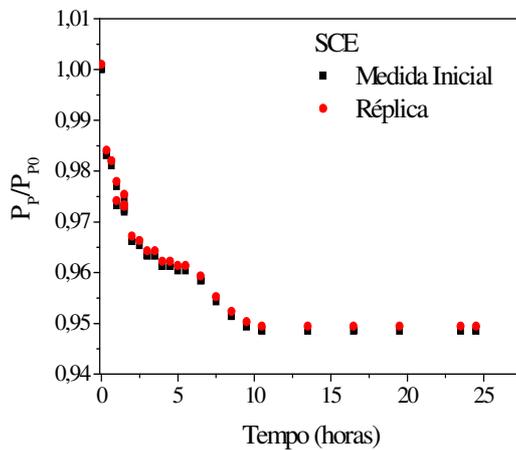


Figura 4.36:  $P_p/P_{p0}$  em função do tempo de secagem para SCE,  $T = 40^\circ\text{C}$  e  $V = 1,0$  m/s.

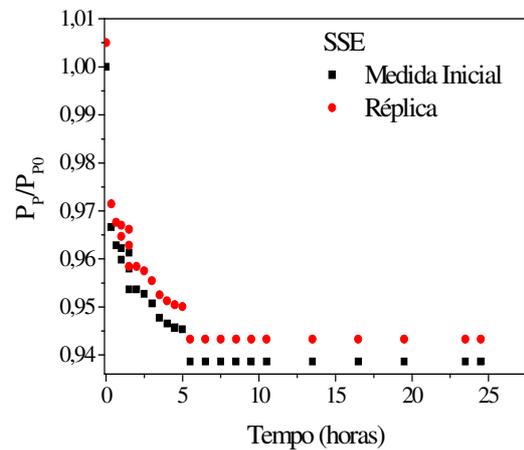


Figura 4.37:  $P_p/P_{p0}$  em função do tempo de secagem para a SSE,  $T = 40^\circ\text{C}$  e  $V = 1,0$  m/s.

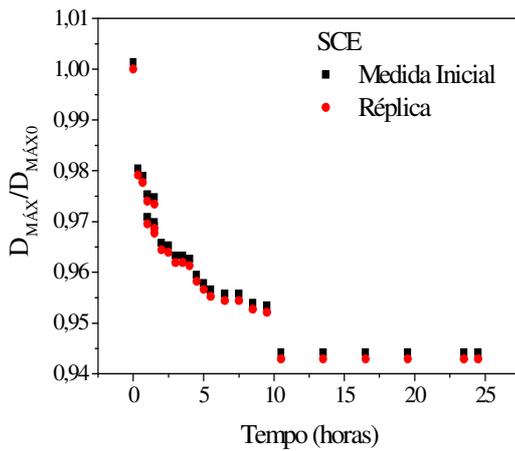


Figura 4.38:  $D_{MÁX}/D_{MÁX0}$  em função do tempo de secagem para SCE,  $T = 50^{\circ}C$  e  $V = 1,0$  m/s.

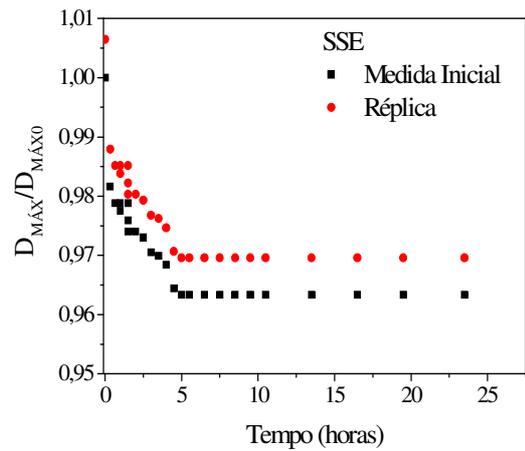


Figura 4.39:  $D_{MÁX}/D_{MÁX0}$  em função do tempo de secagem para a SSE,  $T = 50^{\circ}C$  e  $V = 1,0$  m/s.

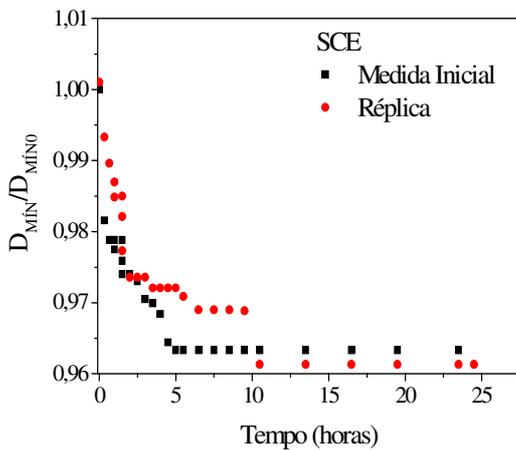


Figura 4.40:  $D_{MÍN}/D_{MÍN0}$  em função do tempo de secagem para SCE,  $T = 30^{\circ}C$  e  $V = 1,0$  m/s.

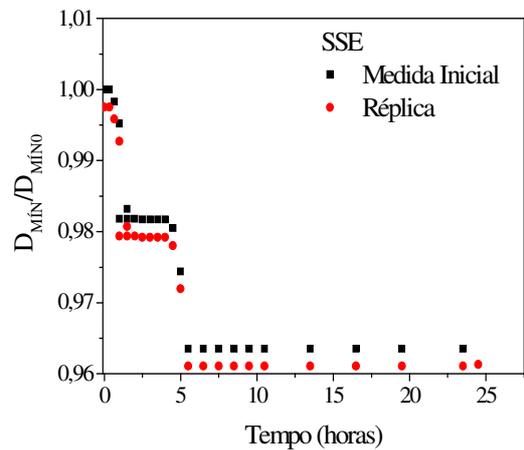


Figura 4.41:  $D_{MÍN}/D_{MÍN0}$  em função do tempo de secagem para a SSE,  $T = 30^{\circ}C$  e  $V = 1,0$  m/s.

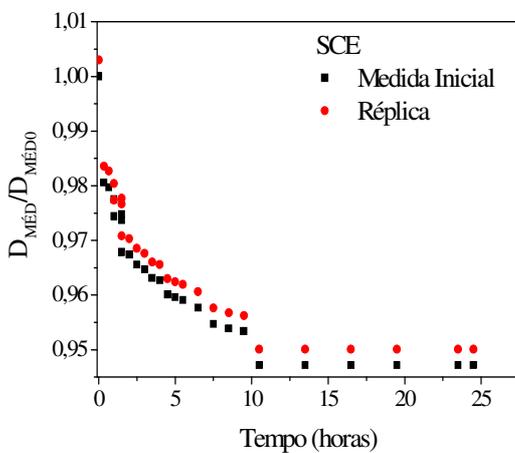


Figura 4.42:  $D_{MÉD}/D_{MÉD0}$  em função do tempo de secagem para SCE,  $T = 40^{\circ}C$  e  $V = 1,5$  m/s.

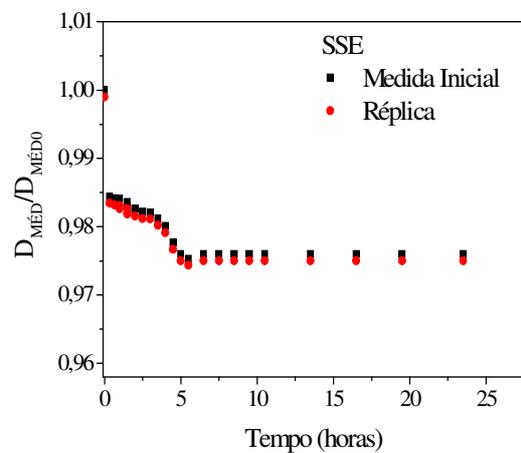


Figura 4.43:  $D_{MÉD}/D_{MÉD0}$  em função do tempo de secagem para a SSE,  $T = 40^{\circ}C$  e  $V = 1,5$  m/s.

Tabela 4.10: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas dos adimensionais de  $A_p$ ,  $P_p$ ,  $D_{MÁX}$ ,  $D_{MÍN}$  e  $D_{MÉD}$  da SCE e da SSE, referentes aos experimentos mostrados nas Figuras 4.34 a 4.43.

Dimensões	Parâmetro $a$ (*) (**) (Eq. 3.2)	Coefficiente de correlação	Desvio padrão	Variância Explicada (%)	Teste-t
Semente com Endocarpo (SCE)					
$A_p/A_{p0}$	0,994	0,9996	0,0091	98,65	109,2
$P_p/P_{p0}$	0,999	0,9994	0,0149	99,89	67,1
$D_{MÁX}/D_{MÁX0}$	0,986	0,9985	0,0157	99,78	62,8
$D_{MÍN}/D_{MÍN0}$	1,025	0,9845	0,0153	98,99	66,9
$D_{MÉD}/D_{MÉD0}$	0,997	0,9995	0,0135	99,99	73,9
Semente sem Endocarpo (SSE)					
$A_p/A_{p0}$	1,025	0,9992	0,0367	97,87	27,94
$P_p/P_{p0}$	0,995	0,9990	0,0111	98,87	89,6
$D_{MÁX}/D_{MÁX0}$	0,993	0,9978	0,0216	97,90	45,9
$D_{MÍN}/D_{MÍN0}$	0,988	0,9958	0,0114	97,91	86,7
$D_{MÉD}/D_{MÉD0}$	1,015	0,9981	0,0131	97,89	77,5

\* p-valor &lt; 0,001

\*\* Nível de significância de 5%

Assim como para as outras partes do amendoim já analisadas, a reprodutibilidade dos dados experimentais das sementes com e sem o endocarpo podem ser avaliadas visualmente, através das proximidades da maioria dos pontos experimentais nas Figuras 4.34 a 4.43.

Embora verificado que alguns pontos possam ser discrepantes nas Figuras 4.34 a 4.43, a reprodutibilidade dos dados é assegurada pelo ajuste do modelo estatístico utilizado, Equação (3.2), conforme mostrado na Tabela 4.10.

Através desta tabela pode-se verificar que os valores estimados para o parâmetro  $a$  são aproximadamente iguais a unidade para todas as medidas. A validade estatística deste parâmetro é assegurada pelos baixos desvios padrões e altos valores de Teste

t. Além disto, o alto índice de variância explicada mostra que a percentagem de validade dos pontos obtidos pelo modelo estatístico não foram abaixo de 97,89%.

O nível de significância, ou seja, a chance de erro desta análise estatística é de 5%. Portanto, o valor  $p$  menor que 0,05 possibilita assegurar a validade do parâmetro  $\mathbf{a}$  com no mínimo 95% de confiança.

Diante destes resultados pode-se considerar, então, mesmos com alguns pontos que indicam discrepância apresentados nas Figuras 4.34 a 4.43, que as medidas são reprodutíveis com base no bom ajuste do modelo estatístico. A discrepância dos dados era esperada, visto que esta natureza de partícula apresenta estruturas complexas e foram coletadas diretamente das condições naturais de campo sem qualquer pré-tratamento físico ou químico.

A partir das Figuras 4.32 e 4.33, que mostram as fotos típicas das sementes com e sem endocarpo, submetidas ao processo de secagem, é possível verificar a evolução da forma das sementes. Nestas Figuras 4.32 e 4.33 são observadas a formação da concavidade localizada na região posterior ao escoamento do ar de secagem, assim como encontrado por Arrieché (2003) em sistemas simuladores géis com geometrias esféricas, por Duarte *et al.* (2007) em sistemas simuladores géis, entretanto, com geometrias cilíndricas e por Scarpellini *et al.* (2007) para sementes de infrutescência de umbaúba em geometria cilíndrica.

A formação desta concavidade é devida a formação do perfil de velocidade responsável pela ocorrência de uma tensão cisalhante sobre a superfície do corpo, gerando a força de interação entre o fluido e o corpo o qual pode ser observado na Figura 1.1 (ARRIECHE, 2008).

A ocorrência do fenômeno de encolhimento para as sementes com e sem endocarpo é evidenciado tanto pelo o desenvolvimento da concavidade localizada na região posterior ao escoamento do fluido de secagem, como pelas reduções das dimensões, conforme demonstram as Figuras 4.34 a 4.43.

Além disto, pode-se observar através da Figura 4.33 que as sementes processadas fora do pericarpo e sem o endocarpo (SSE) apresentam a formação de uma rachadura entre os cotilédones. Este fato provavelmente explica o aumento da área projetada a partir de 8 horas de secagem, conforme pode ser verificado na Figura 4.35 e a formação de patamares e de quedas bruscas nas dimensões apresentadas nas Figuras 4.37, 4.39, 4.41 e 4.43. A formação desta rachadura está relacionada, provavelmente, com a retirada do

endocarpo das sementes, o qual é responsável por manter unidas as suas partes internas (CARVALHO & NAKAGAWA, 1988).

As Figuras 4.44 (a), (b) e (c) apresentam diferentes resultados típicos de cortes transversais laterais das sementes de amendoim, próximas ao centro das mesmas. Nestas figuras são consideradas diferentes situações de secagem.

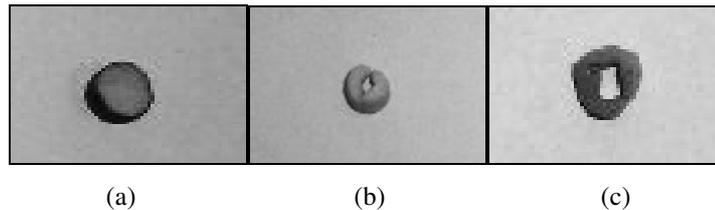


Figura 4.44: Imagens das sementes demonstrando a formação da fissura interna desenvolvida nos cotilédones durante a secagem (a) semente processadas dentro do pericarpo, (b) semente processadas fora do pericarpo e com endocarpo, (c) semente fora do pericarpo e sem endocarpo.

A partir da Figura 4.44 (b) e (c), conforme era esperado, pode-se observar a ocorrência da fissura interna formada nas sementes processadas fora do pericarpo. Isto está relacionado ao fato das camadas superficiais da amostra secarem antes do interior do sólido, fazendo com que as regiões internas continuem a encolher com o transporte de umidade do sistema para a vizinhança. Desta forma, o interior da amostra se rompe, provavelmente devido às tensões mecânicas provenientes da formação da camada limite na superfície do sólido. Resultados semelhantes foram encontrados por Arrieche (2007) e por Duarte *et al.* (2007) na condução de experimentos sobre a secagem de sistemas simuladores géis com geometrias esférica e cilíndrica, respectivamente.

Para as sementes submetidas ao processo de secagem dentro do pericarpo este fenômeno não foi observado, provavelmente, devido à distribuição uniforme da umidade no interior da amostra. A camada de ar existente entre a superfície de contato do pericarpo e do endocarpo, possivelmente, reduz a velocidade de dessecção de água da semente para esta interface entre o grão e a superfície interna do pericarpo. Neste caso, provavelmente, o gradiente de umidade formado dentro da semente é mais uniforme quando comparado com as sementes processadas fora do pericarpo.

#### **4.5 Avaliação das Condições Operacionais do Secador na Fisiologia das Sementes: Germinação e Desenvolvimento da Plântula**

Sob o ponto de vista da engenharia de secagem de sementes, o desenvolvimento do processo de secagem convectiva é um objetivo que para ser cumprido, exige necessariamente o conhecimento dos efeitos de dessorção de vapor de água na fisiologia das sementes. Além disto, é necessário caracterizar o produto devido aos sub-processos envolvidos, tais como, mudanças estruturais e fenômenos internos e externos de transferência de massa no material, para posteriormente determinar a viabilidade ou não do processo e a qualidade do produto final.

Dentre estes aspectos de qualidade do produto, os fatores relevantes para se obter sementes de boa qualidade, visando à aplicação como insumo na agricultura moderna, relacionam-se às qualidades físicas e fisiológicas do produto. Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados, independente do tipo de equipamento usado para realizar o processo de secagem. Estes cuidados se referem principalmente aos limites operacionais, visando à preservação das qualidades das sementes, em padrões pré-estabelecidos (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA, 1992).

Para o caso do amendoim, ainda existem lacunas a respeito das condições operacionais usadas frente às qualidades fisiológicas e físicas. Conforme apresentado na Revisão Bibliográfica, os estudos referentes à secagem de amendoim que avaliam os aspectos de qualidade anteriormente citados, não excluem os efeitos mecânicos e de vizinhança sofridos pela partícula durante o processo.

Diante disto o objetivo desta seção é obter informações sobre os efeitos térmicos, minimizando os mecânicos e de vizinhança, sofridos pelas sementes durante o processo de secagem nas qualidades físicas e fisiológicas do amendoim. Entretanto, não se pretende mencionar aqui em índices de qualidade de lotes e sim avaliar as qualidades físicas das sementes frente aos fenômenos ocorridos no processo e também avaliar a capacidade das sementes em formar uma nova plântula após a secagem por convecção forçada.

### 4.5.1 Qualidades Físicas

As avaliações das qualidades físicas das sementes de amendoim, além das apresentadas anteriormente, foram realizadas através de observações visuais durante e após o processo de secagem. Para tanto, foram analisados os aspectos externos referentes ao desprendimento da película (endocarpo), bem como, a formação de rachaduras e escurecimento nos cotilédones. Para estas análises foram consideradas as sementes processadas dentro do fruto (sistema composto) e as sementes processadas fora do fruto e com endocarpo (subsistema).

Após os experimentos realizados com o fruto, os mesmos foram abertos e diante de observações visuais foi constatado que em todas as condições operacionais utilizadas não houve desprendimento da película vermelha, nem mesmo da formação de rachaduras e escurecimento dos cotilédones. Resultados que estão de acordo com os encontrados na literatura consultada, em que é mencionada a ocorrência de desprendimento da película que envolve a semente, bem como, o escurecimento dos cotilédones para temperaturas acima de 80°C, quando as sementes são secas dentro do pericarpo, em leito fixo (TRAVAGLINI & TANGO, 1965).

Para as sementes processadas fora do pericarpo e com endocarpo, foram encontrados resultados semelhantes às das processadas dentro do pericarpo, exceto para a condição de 50°C, onde foi verificado o escurecimento da película vermelha e dos cotilédones. Fato este provavelmente devido ao contato direto da semente com o ar a alta temperatura utilizado, ou seja, com elevadas taxas de transferência de massa.

Um outro fator de qualidade física considerado foi o fenômeno de encolhimento causado durante o processo de secagem para as sementes processadas fora do pericarpo.

Conforme mostrado na seção 4.4, em todas as condições operacionais utilizadas para as sementes processadas fora do pericarpo e com endocarpo, o fenômeno de encolhimento foi constatado devido à redução de umidade quando a proteção das sementes eram retiradas. Além disto, foi observada também a formação da fissura interna das sementes secas fora do pericarpo, devido às tensões provenientes das forças mecânicas sofridas pelo material. Para as sementes secas dentro do pericarpo, estes fenômenos não foram constatados

confirmando a importância da barreira física, o pericarpo, frente à secagem das sementes de amendoim.

#### 4.5.2 Qualidades Fisiológicas

Entre as diferentes propriedades atribuídas à qualidade das sementes, como teor de umidade próprio para armazenamento e comercialização, aspectos quanto ao poder germinativo e desenvolvimento de uma nova plântula são relacionados com a redução de umidade, bem como as conseqüentes contrações, escurecimento e desprendimento do endocarpo.

Diante disto foram conduzidos, mediante o método direto de observação, experimentos para a busca de informações sobre o tempo necessário para que as sementes apresentassem o desenvolvimento de radículas e brotos (caule e folhas). Estes experimentos permitiram avaliar os aspectos referentes às qualidades fisiológicas das sementes, quanto à germinação e relacionados, também, ao vigor.

As Figuras 4.45 (a), 4.46 (a) e 4.47 (a) mostram as fotos dos testes realizados para as sementes testemunhas. Neste caso, se referem às sementes antes de passarem pelo processo de secagem. Estas foram utilizadas como critério de comparação das sementes que foram submetidas às diferentes condições operacionais do equipamento de secagem e dentro do pericarpo, Figuras 4.44 (b), (c) e (d); 4.45 (b), (c) e (d); 4.46 (b), (c) e (d) e 4.47 (b), (c) e (d).

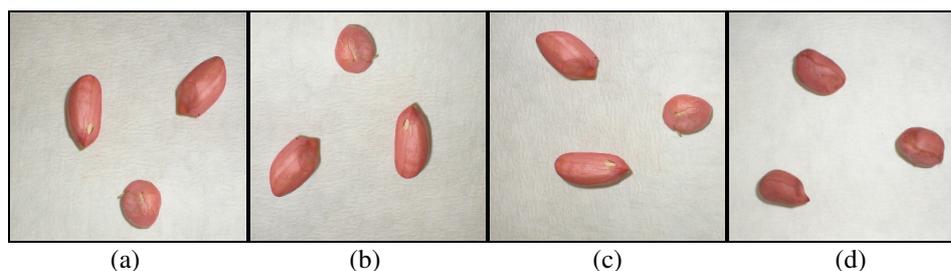


Figura 4.45: Fotos das sementes no 1º dia do teste. Testemunha (a). Sementes secas dentro do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.



Figura 4.46: Fotos das sementes no 5º dia do teste de germinação. Testemunha (a). Sementes secas dentro do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.

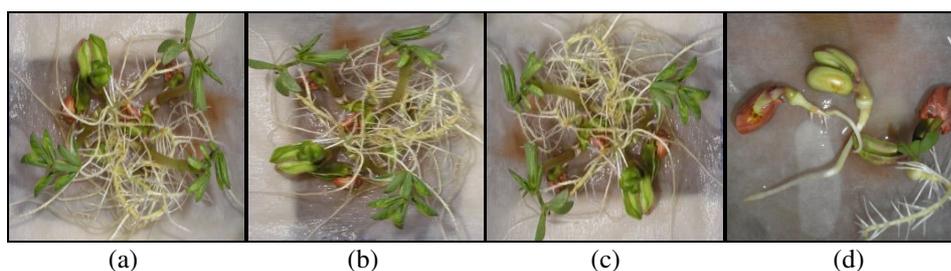


Figura 4.47: Fotos das sementes no 10º dia do teste de germinação. Testemunha (a). Sementes secas dentro do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.

Com base nas Figuras 4.45 (b), (c) e (d); 4.46 (b), (c) e (d) e 4.47 (b), (c) e (d) foi possível constatar que as sementes submetidas às diferentes condições operacionais e dentro do pericarpo foram capazes de originar novas plântulas, o que está de acordo com o encontrado por Kunze *et al.* (1968). Entretanto, o desenvolvimento das mesmas foi prejudicado quando o processo de secagem foi realizado em temperaturas de 50°C, fato confirmado pela formação de radículas quase três vezes maiores nas condições de 30 e 40°C, Figuras 4.45 (b), (c) e (d); 4.46 (b), (c) e (d) e 4.47 (b), (c) e (d), que na condição de 50°C, Figuras 4.45 (b), (c) e (d); 4.46 (b), (c) e (d) e 4.47 (b), (c) e (d). Além disto, pode-se observar a formação da parte aérea melhor desenvolvida nas condições de 30 e 40°C. Estes resultados indicam que o vigor das sementes secas dentro do pericarpo e com a temperatura de 50°C foi prejudicado.

Nas Figuras 4.48 a 4.50 são apresentadas as fotos das avaliações conduzidas para as sementes testemunhas, que assim como nos testes anteriormente citados, foram usadas como critério de comparação das sementes processadas fora do pericarpo e que foram submetidas às diferentes condições operacionais do equipamento de secagem.

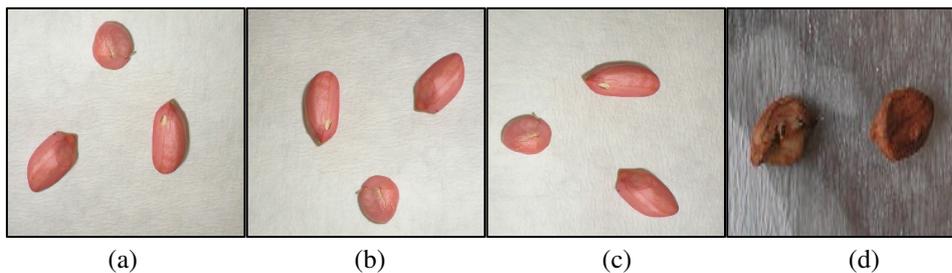


Figura 4.48: Fotos das sementes no 1º dia do teste de germinação. Testemunha (a). Sementes secas fora do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.

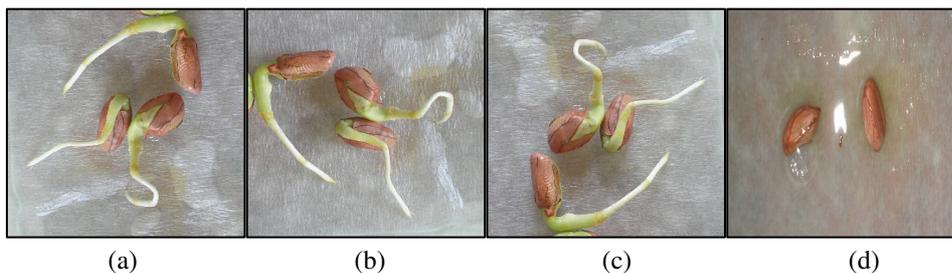


Figura 4.49: Fotos das sementes no 5º dia do teste de germinação. Testemunha (a). Sementes secas fora do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.

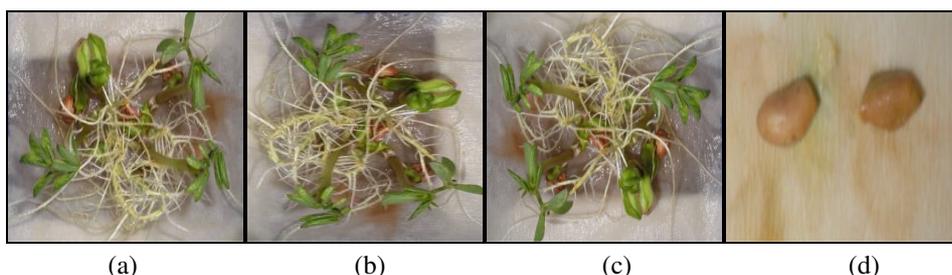


Figura 4.50: Fotos das sementes no 10º dia do teste de germinação. Testemunha (a). Sementes secas fora do pericarpo nas temperaturas de 30° (b), 40 °C (c), 50°C (d), com velocidade do ar de secagem de 1,0 m/s.

Através das Figuras 4.48 (b), (c) e (d); 4.49 (b), (c) e (d) e 4.50 (b), (c) e (d) pode-se observar que as avaliações para as sementes submetidas ao processo de secagem, fora do pericarpo e nas condições de 30 e 40°C, foram capazes de formar plântulas novas, assim como, as sementes processadas dentro do pericarpo. Além disto, a retirada do pericarpo não é perceptível no desenvolvimento das mesmas as quais apresentaram raízes bem desenvolvidas já no 5º dia de teste e parte aérea no 10º dia de germinação. O tamanho das radículas formadas no 5º dia de germinação foi de aproximadamente 2,5cm.

Entretanto, conforme pode-se observar por meio das Figuras 4.48 (d); 4.49 (d) e 4.50 (d), as sementes que foram submetidas à condição de secagem de 50°C não apresentaram sinais de germinação. Este fato pode estar relacionado com a retirada da barreira de proteção do embrião. Diante disto, a parte vital não foi capaz de suportar a alta temperatura utilizada no processo de secagem, fazendo com que não desenvolvesse uma nova plântula.

Com base nos resultados obtidos das avaliações das qualidades fisiológicas das sementes constata-se que, para as condições de temperatura de 50°C, os resultados não foram favoráveis ao desenvolvimento de uma nova plântula. Sendo que, para as sementes processadas fora do pericarpo o embrião se mostrou incapaz de formar uma nova plântula.

Além disto, a partir das comparações dos efeitos do encolhimento na germinação, verifica-se que o mesmo não causou danos significativos à mesma, ou seja, o encolhimento e a formação das fissuras internas nas sementes secas fora do pericarpo não atingiram o embrião. Isto pode ser constatado através das Figuras 4.48 (b) e (c); 4.49 (b) e (c); 4.50 (b) e (c) em que apresentam as sementes secas fora do pericarpo e com poder de gerar plântulas novas mesmo tendo ocorrido o fenômeno de encolhimento das mesmas, conforme já analisado na seção 4.4.

Sob a ótica da engenharia da secagem de sementes, os avanços na agricultura moderna exigem que o binômio processo e qualidade seja melhorado. Diante disto, torna-se necessário fazer uma análise conjunta do processo tendo em vista buscar informações frente à produção de sementes, através do processo de secagem convectiva. Entretanto, esta análise deve levar em consideração a influência das condições operacionais sobre os efeitos imediatos nas qualidades fisiológicas das sementes, além da caracterização das qualidades físicas das amostras de amendoim.

#### **4.6 Interações entre as Qualidades do Produto com o Processo de Secagem**

As avaliações das interações entre as qualidades do produto com o processo de secagem foram realizadas visando conhecer os fatores que influenciam na preservação desta oleaginosa sob a visão da engenharia de secagem de sementes.

Desta forma e conforme visto seção 4.3, as condições operacionais do equipamento, assim como as barreiras físicas do material influenciaram no processo de secagem das sementes de amendoim em todas as condições avaliadas. Diante dos resultados obtidos foi verificado que o aumento da temperatura do ar de secagem causou aumento na taxa de secagem para todas as partes do amendoim. Este fato era esperado, uma vez que, o

aumento da temperatura causa uma maior taxa de transferência de energia entre o ar de secagem e a amostra, facilitando assim a transferência de massa do material. Além disto, constatou-se que o aumento da velocidade do ar de secagem não é perceptível nas taxas de secagem para o fruto nem para a semente com endocarpo, que para esta análise representam as situações de maior interesse.

Quanto à presença das barreiras físicas, foi observado que a presença do pericarpo fez com que tempo de secagem aumente duas vezes mais, na condição de 40°C e 1,0 m/s. Isto demonstra que a transferência de massa é dificultada pelo mesmo, fazendo com que o processo se torne oneroso.

Sob o ponto de vista de processo, as melhores condições de secagem encontram-se para o caso em que as sementes são processadas fora do pericarpo e provavelmente para os maiores valores de temperatura, sendo que a velocidade do ar de secagem não causa efeito perceptível no processo de secagem, nas condições utilizadas.

Entretanto, no processo de secagem os aspectos referentes às qualidades do produto estão ligados ao processo de remoção de água. Para o caso da agricultura moderna não basta apenas indicar índices de qualidade e sim melhorar a relação entre processo e a qualidade das sementes na saída do secador.

Para tanto, aspectos como qualidades físicas e fisiológicas das sementes do amendoim foram avaliadas e através dos resultados obtidos constatou-se que a secagem das sementes fora do pericarpo leva ao fenômeno de encolhimento, causando prejuízos às qualidades físicas do material. Além disto, aspectos como escurecimento da película vermelha e escurecimento dos cotilédones são observados para as operações do secador com temperaturas de 50°C.

Já para a secagem das sementes dentro do pericarpo, os aspectos referentes às qualidades do material, obtiveram melhores resultados quando comparadas com as submetidas ao processo fora do pericarpo. Os efeitos dos aspectos externos, neste caso, qualidade física, não foram observados nem mesmo para a temperatura de 50°C, como no caso da semente seca fora do pericarpo. Quanto às qualidades fisiológicas, as sementes processadas dentro do pericarpo e na condição de 50°C mostraram-se prejudicadas quanto ao vigor, embora tenham apresentado capacidade de gerar uma nova plântula.

Diante do exposto não se recomenda a secagem das sementes de amendoim sem a proteção do pericarpo. Sendo assim, a busca da equação representativa da cinética de

secagem que melhor se ajuste aos dados experimentais será feita para o fruto. Com isto, pretende-se obter a equação que corresponde à curva característica da cinética de secagem para que torne possível sua utilização na modelagem do problema de secagem e posteriormente melhorar a relação processo e qualidade em secadores convectivos visando incentivar a substituição do método natural de secagem em terreiros.

#### 4.7 Discriminação das Equações de Secagem para o Fruto do Amendoim

Com base nos resultados experimentais obtidos, foi realizado o tratamento dos dados através do pacote computacional STATISTICA<sup>®</sup> visando obter uma equação que represente a cinética de secagem deste material.

O ajuste foi feito para as equações de Lewis (1921), Page (1949), Henderson & Henderson (1968) e Brooker *et al.*(1974). Conforme apresentadas na Tabela 2.1, as mesmas são usualmente utilizadas para materiais orgânicos e apresentam dois ou três parâmetros a serem determinados.

Os parâmetros determinados para o fruto de amendoim, o qual apresentou o melhor resultado frente ao binômio processo e qualidade, estão reunidos na Tabela 4.11, para  $T_f$  em °C e t em horas, bem como os valores dos parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste das equações. Estes parâmetros estatísticos se referem ao desvio padrão, Teste-t, coeficiente de correlação e variância explicada.

Através da Tabela 4.11 é possível analisar os valores dos parâmetros obtidos das equações e seus respectivos parâmetros estatísticos. O bom ajuste das equações é averiguado para baixos valores de desvio padrão, altos valores de Teste-t, ou seja, razão entre o parâmetro determinado e o desvio padrão, bem como os valores de coeficiente de correlação próximo a unidade e altos valores de variância explicada.

Diante disto e através da Tabela 4.11, constata-se que os parâmetros para as equações de Lewis (1921), Henderson & Henderson (1968) e Brooker (1974), embora, apresentem baixos valores de desvio padrão, têm os valores de teste-t para a determinação do

parâmetro A em média 8,6 vezes maior do valor referente a equação de Page (1649). Logo, constata-se que o melhor ajuste é obtido para a equação 2.4.

O bom ajuste para a equação de Page (1949) é confirmado diante dos baixos valores de desvio padrão e altos valores de Teste-t para todos os parâmetros determinados (A, B e n), além de apresentar variância explicada de 99,62%.

O nível de significância, ou seja, a chance de erro, desta análise estatística é de 5%. Portanto, o valor de P menor que 0,05 possibilita assegurar a validade dos parâmetros com 95% de confiança.

Tabela 4.11: Valores dos parâmetros das equações analisadas e parâmetros estatísticos.

Parâmetros (*) (**)	Desvio Padrão	Teste-t	Coefficiente de Correlação	Variância Explicada (%)
Equação de Lewis (1921) – Equação 2.1				
A = 0,280	0,031	9,041	0,956	90,61
B = 12,13	0,174	69,71		
Equação de Page (1949) – Equação 2.4				
A = 0,428	0,0081	52,84	0,998	99,62
B = 6,931	0,0342	202,6		
n = 0,576	0,0053	108,67		
Equação de Henderson & Henderson (1968) – Equação 2.3				
A = 0,175	0,0291	6,14	0,987	97,66
B = 11,47	0,1525	75,46		
Equação de Brooker (1974) – Equação 2.2				
A = 0,194	0,0387	5,02	0,983	97,31
B = 8,843	0,1262	70,71		
C = 0,812	0,0268	30,39		

\* p-valor < 0,0001

\*\* Nível de significância de 5%

As Figuras 4.51 a 4.53 mostram os resultados típicos para o ajuste da equação de Page (1949), nas condições de 30, 40 e 50°C e 1,0 m/s, respectivamente.

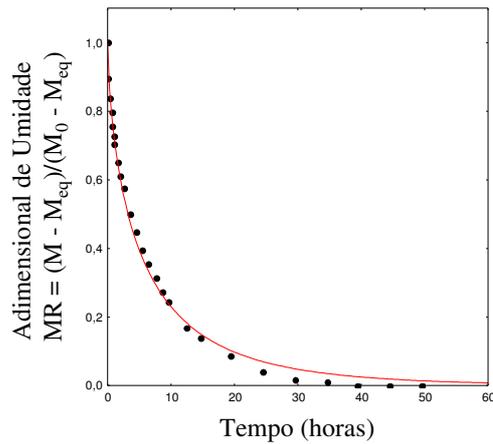


Figura 4.51: Ajuste da equação de Page (1949) na condição de 30°C e 1m/s.

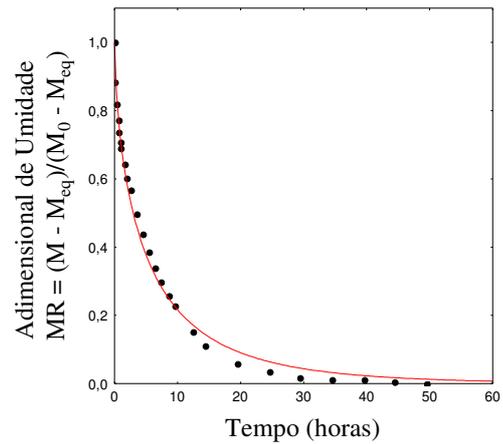


Figura 4.52: Ajuste da equação de Page (1949) na condição de 40°C e 1m/s.

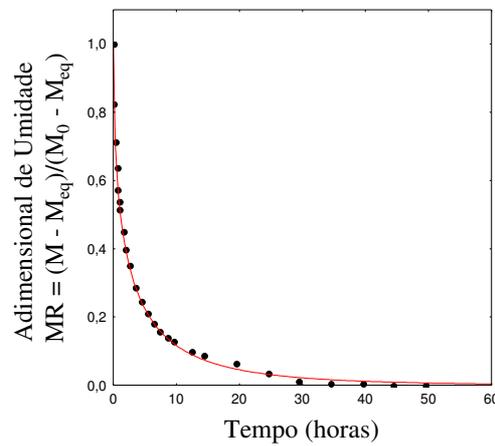


Figura 4.53: Ajuste da equação de Page (1949) na condição de 50°C e 1m/s.

Através das Figuras 4.51 a 4.53 observa-se o bom ajuste das determinações de MR em função do tempo de secagem diante da proximidade das determinações experimentais com os valores previstos pela equação de Page (1949).

Assim, recomenda-se o uso da Equação de Page (1949) para representar os dados obtidos na secagem de fruto de amendoim, sendo representada pelas Equações (4.1) e (4.2).

$$MR = \exp(-k \cdot t^{0,576}) \tag{4.1}$$

$$\text{onde } , k = 0,428 \cdot \exp(-6,931/T_f) \tag{4.2}$$

Estas equações são válidas para o domínio de  $30^{\circ}\text{C} \leq T_f \leq 50^{\circ}\text{C}$  e  $0,5 \text{ m/s} \leq V_f \leq 1,5 \text{ m/s}$ .

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos e diante dos resultados obtidos neste trabalho sobre a secagem de amendoim têm-se, para as condições operacionais utilizadas, as conclusões descritas a seguir.

A padronização das amostras de amendoim coletadas com maturidade fisiológica, diretamente do solo, permitiram a condução dos testes de secagem no secador de convecção forçada. Foram atendidas todas as necessidades específicas para a condução dos testes com a partícula isolada.

As metodologias empregadas para analisar os efeitos do escoamento do fluido sobre o sistema composto, bem como, seus respectivos subsistemas, mostraram-se adequadas. Desta forma, tornaram possíveis as análises em relação ao transporte de umidade, ao encolhimento e à evolução da forma da partícula, durante a secagem por convecção forçada.

Os estudos experimentais da análise da influência das condições operacionais na redução de umidade da partícula mostraram que para a semente com e sem endocarpo, bem como para o fruto, o mecanismo de transferência de massa é tipicamente difusivo. O efeito da velocidade do ar de secagem não foi perceptível indicando que as resistências externas ao transporte de massa foram desprezíveis em relação às resistências internas. As características apresentadas pelas sementes oleaginosas foram confirmadas, onde os períodos de secagem à taxa constante não foram significativos para as sementes com e sem endocarpo, bem como para o fruto.

No tocante aos subsistemas, a resistência externa controla o processo de secagem para o pericarpo nas primeiras horas, em que é observado o período de secagem à taxa constante. Após este período, o mecanismo difusivo passa a governar a transferência de massa entre o sólido e o fluido de secagem. O início deste período foi evidenciado pelo cálculo de umidade crítica, que apresentou valor de  $(0,31 \pm 0,02)$  b.s.. Mediante a abordagem

adotada é considerado como ponto pseudocrítico. O mesmo mostrou-se independente das condições operacionais.

As avaliações das barreiras físicas no processo mostraram que as presenças do endocarpo e do pericarpo aumentam a resistência ao transporte de umidade das amostras para o ar de secagem, em relação às situações em que as barreiras são removidas.

Os estudos realizados através das análises de imagens mostraram o desenvolvimento de concavidades nas superfícies das sementes processadas com e sem endocarpo, localizadas nas regiões posteriores ao escoamento do fluido de secagem.

As reduções das dimensões das sementes com e sem o endocarpo e fora do pericarpo demonstraram a ocorrência do fenômeno de encolhimento e a formação de fissuras internas, provenientes da ação de forças mecânicas sofridas pelo material, devido a dessorção de água destas amostras. Isto permite afirmar que as sementes de amendoim não devem ser submetidas à secagem por convecção forçada sem a proteção do pericarpo, uma vez que as qualidades físicas das mesmas são prejudicadas, embora apresentem os melhores resultados em relação ao processo, quando submetidas fora do pericarpo.

As avaliações das qualidades fisiológicas reforçam a idéia de que, as sementes de amendoim não devem ser processadas fora do pericarpo do fruto, além disto, não são recomendadas operações com temperaturas de 50°C, quando se pretende obter um produto de boa qualidade fisiológica.

A discriminação das principais equações de secagem empíricas e semi-empíricas, usuais para matérias orgânicas, mediante regressão não linear, mostrou que entre as equações com apenas dois ou três parâmetros, foi possível representar os dados experimentais da dinâmica de secagem. Estas equações foram ajustadas para os melhores resultados entre as interações do processo e das qualidades das sementes. A discriminação mostrou que a equação de Page permite uma descrição adequada do processo de secagem convectiva do fruto de amendoim, com 99,62% dos pontos explicados dentro dos limites operacionais utilizados na unidade de secagem.

Com a ótica da engenharia de secagem constata-se que este trabalho contribui para a produção de sementes para fins agrícolas, que apresentam capa protetora.

## **CAPÍTULO 6**

### **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com base nos resultados advindos das etapas que permitiram cumprir os objetivos deste trabalho, verifica-se a possibilidade de continuidade dos estudos envolvendo a secagem de amendoim. Buscando contribuir para a continuação destas investigações, algumas sugestões para trabalho a serem realizados posteriormente estão descritas adiante:

- Realizar a caracterização de cada parte estudada quanto a fatores de forma, porosidade, massa específica, entre as outras, a fim de aprofundar na representação dos fenômenos envolvidos no processo, tal como determinar as dependências da evolução da forma e o encolhimento das amostras em função dos períodos de secagem;
- Analisar os efeitos de borda das vagens no processo de secagem, neste caso utilizando frutos de amendoins com três sementes;
- Desenvolver uma modelagem matemática para a representação dos fenômenos envolvidos no processo;
- Analisar a representação da cinética de secagem do pericarpo via curvas generalizadas;
- Realizar um estudo experimental específico para a determinação dos coeficientes de transferências de calor e massa entre cada parte e o ar de secagem;
- Realizar estudos específicos sobre o uso do amendoim para fins alimentícios, tal como, avaliar o teor de óleo, proteínas, carboidratos e teor de aflatoxina, e

- Realizar testes de secagem, tendo a abordagem adotada neste trabalho, para outras sementes que apresentam capas protetoras, como por exemplo, macadâmia, castanhas e outras produzidas em nosso país.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES D. G. **Avaliação do nível de aflatoxina em amendoim (*Arachis hypogae L.*) armazenado após a secagem natural e artificial.** 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.
- AMARAL, D.; DALPASQUALE, V.A. **Custos de secagem de sementes de milho (*Zea mays L.*) em espigas usando simulação matemática.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, SP v. 20, n. 1, p. 55 – 66, 2001.
- ARRIECHE, L. S. **Evolução da forma e encolhimento de um sistema gel durante a secagem por convecção forçada.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.
- ARRIECHE, L. S. **Modelagem matemática do processo de secagem, por convecção forçada, de sistemas simuladores de alimentos esféricos e deformáveis.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Química) )-Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos ,2007.
- ARRIECHE, L. S. ; SARTORI, D.J.M. . Fluid flow effect and mechanical interactions during drying of a deformable food model. **Drying Technology**, v. 26, p. 54-63, 2008
- AZZOUZ, S.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Drying kinect equation of single layer of grapes. In: International Drying Symposium, 11, 1998, Halkidiki Greece. **Proceedings...Greece: A. S. Mujundar, 1998.** v. B., p. 988-997.
- BARROZO, M. A. S. **Transferência de calor e massa entre o ar e semente de soja em leito deslizante e escoamento cruzado.** 1995. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.
- BRAGA FILHO, W. **Transmissão de calor.** São Paulo, 1 ed. Pioneira Thomson Learning, 2004.
- BIRD, K. T.; HANISAK, M. D.; RYTHER, J. **Fenômenos de transporte,** Rio de Janeiro, 2 ed. LTC, 2004
- BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. W. Drying of cereal grains. Inc. Westport, CN, **The AVI Publishing Co.,** 265p., 1974.
- BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** Van Nostrand Reinold, New York, 450 p., 1992.

- CANECCHIO, V. F. **Cultura do amendoim**. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas, SP, 1987, 40 p.
- CARNEIRO, L. M. T. A. **Antecipação da colheita, secagem e armazenamento na manutenção da qualidade de grãos e sementes de trigo comum e duro**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes, ciência, tecnologia e produção**. 3. ed. Campinas: Fundação Cargill, 424p, 1988.
- CASSANDRE, J. E. F.; MOREIRA, M. F. P.; SARTORI, D. J. M. Desenvolvimento de um secador de convecção forçada com reciclo de ar. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA (COBEQ-IC), 3., 2001, Belo Horizonte. **Anais...**2001. p. 1-4.
- CHIOU, R. Y-Y. *ei al.* Characterization of peanut kernels as affected by harvest date and drying practices. **Journal Agriculture Food Chemical**. Taiwan, v. 40, n. 9, p.1536-1540, 1992.
- COLSON, K., YOUNG, J. H. Two componet thin layer drying model for unshelled peanuts. **Transaction of the Agriculture - ASAE**. New York, USA, v. 33, n. 1, p. 241-246, 1990.
- CONAB-COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Indicadores da agropecuária**. Brasília. Disponível em:<<http://www.conab.gov.br/conbweb>> acessado em:09 out. 2008.
- DALBELLO. O. **Eficiência do processo de secagem do amendoim (Arachis hipogae L.) e milho de pipoca (Zea mays L.)**. 1995. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.
- DIAS, D. G. F. Maturação de sementes – reportagem de capa **Seed News**. v. 2. n. 6 (2001). Disponível em: <<http://www.seednews.inf.br/portugues/seed56/artigocapa56a.shtml>> acessado em 30 nov. 2008.
- DUARTE, C.; ARRIECHE, L. S.; SARTORI, D. J. M. Evolução da forma de encolhimento de sistema simulador gel cilíndrico durante a secagem por convecção forçada. In: 7º COBEQ-IC, **Anais ...** São Carlos , 2007.
- EMBRAPA-MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E DESENVOLVIMENTO. Disponível em: <<http://www.embrapa.gev.br>> acessado em 30 nov. 2008.
- ERTAS, A. et al. Design and development of a new peanut curing process for west Texas. **Drying Technology**. Texas, v. 17, n. 6, p. 1149-1159, 1999.
- FERREIRA, M. M. P. **Desenvolvimento, caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Química) )-Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos ,2003.

- FERNANDEZ, E. M.; ROSELEM, C. A. Ácidos graxos e proteína em grãos de amendoim em função da calagem e do método de secagem. **Bragantia**. Campinas, v. 57 n. 1, 1998.
- FORTES, M. & OKOS, M. R. Drying Theories their bases and limitations as applied to food and grains. In: **Advances in Drying**. Washington, Ed. Arum S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation, 1980 p. 119-154.
- FUMAGALLI, F. **Secagem de pêscoço em secador a microondas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.
- FUSCO, A. J. *et al.* A difusional model for drying with volume change. **Drying Technology**, v. 9, n 2 p. 397-417, 1991.
- GERIN, M.A.N. et al. Adubação do amendoim (*Arachis hipogae* L.) em área de reforma de canavial. **Scientia Agricola**, Piracicaba v. 53, n. 1, jan./abr. 1996.
- HAN, R. J.; MOSS, O. R.& WONG, B. A. Derivation and application of an Analytical Solution of the Mass Transfer Equation to the Case of Forced Convective Flow around a Cylindrical and Spherical Particle with Fluid Surface Properties. **Journal Aerosol Science**. Great Britain, n. 2, v. 27, p. 235 – 247, 1996.
- HENDERSON, J. M. & HENDERSON, S. M. A computational procedure for deep-bed drying analysis. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v 13, p. 87-98, 1968.
- KEEY, R. B. Theoretical foundations of drying technology. In: **Advances in Drying**. Washington, Ed. Arum S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation, p. 1-19, 1980.
- KEEY, R. B. **Drying of loose and particulate materials**. Hemisphere Publishing Corporation, 1 ed, 504 p., 1992.
- KREITH, F. **Princípios de transferência de calor**. Pioneira Thomson Learning, ed. 6, p.383-397, 2003.
- KRZYZANOWSKI, F. C., WEST, S. H., FRANÇA NETO, J. B. Drying peanut seed using air ambient temperature at low relative humidity. **Revista Brasileira de Sementes**, Pelotas, v. 28, n. 3, p. 1-5, jan./mar. 2006.
- KUNZE, O. R.; CLARK, L. E.; SORENSON, J. W. Continuous and intermittent drying of peanuts under vacuum. **Transaction of the ASAE**. v. 17. n. 67, p. 783-787, dec. 1968.
- LASSERAN, J. C. Princípios gerais de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, MG, v. 3, n.3, p. 17-46, 1978.
- LEWIS, W. K. The rate of drying solids materials. In: THE SIMPOSIUM ON DRYING, **The Journal of I. & . Eng. Chem**. v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.

- MANCINI, M. C. **Transferência de massa em secadores de grãos**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996
- MARCOS-FILHO, J.; CICERO, S. M.; SILVA, W.R. **Avaliação da qualidade de sementes**. Ed. da Fundação de Estudos Agrícolas. Luis de Queiroz. Piracicaba, 1987.
- MASSARANI, G. & SILVA TELLES, A. C. S. **Aspectos da secagem de material sólido particulado**. In: Tópicos Especiais de Secagem. J. T. Freire e D. J. M. Sartori (eds), São Carlos, SP, p. 2-39, 1992.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA. **Regras para Análises de Sementes**. Coordenação de Laboratório Vegetal, Brasília, 1992.
- MOREIRA, R. *et al.* Mathematical modeling of the drying kinetics of chestnut (*Castanea sativa Mill.*) – influence of the natural shells. **Food and Bioproducts Processing**, v.4, n.83, p. 306-314, dec., 2005.
- MRANI, I., BÉNET J. C., FRAS G., ZRIKEM Z. Two Dimensional simulation of dehydration of a highly deformable gel: Moisture content, stress and strains fields. **Drying Technology**, v. 9, n. 15, p. 2165-2193, 1997.
- MUJUNDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 2. ed, New York: Marcel Dekker, v. 1, 742p., 1995.
- MUJUNDAR, A. S. Innovation and globalization in drying R&D. In: International Drying Symposium (IDS)...**Procesdiing**. Hungary, 2006. p.3-13.
- NAKAGAWA, J.; ROSELIM, C.R.; ALMEIDA, R. M. Efeitos da Maturação e dos Métodos de Secagem na Qualidade de Sementes de Amendoim. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 8, n. 3, p. 83-89, 1986.
- NOOMHORM, A.; PREMAKUMAR, K.; SABAREZ, H. T. Desing and development of a conduction drier for accerelated drying of peanuts. **Journal of Food Engineering**, v. 21, p. 411-419, feb./jun.,1994.
- OVERHULTS, D G. *et al.* Drying of soybeans with heated air. **Transactions of the ASAE**, v. 16, p.112-113, 1973.
- PAGE, C. Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layers. **M.S. Thesis**, Purdue University, 1949.
- PALACIOS, T. R. *et al.* Peanut drying kinetics: determination of the efective diffusivity for in-shell and shelled peanuts by applyng a short-time analytical model to measured data. In: PROCEEDINGS OF THE 14th INTERNATIONAL DRYIG SYMPOSIUM, 14., 2004, São Paulo. **IDS**. São Paulo, Brazil, p. 1448-1455, 2004..
- PASSOS, S. M. G.; CANÉCHIO, V. F.; JOSÉ, A. **Principais Culturas**. 2. ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, v. 1,1987.

- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's chemical engineers handbook**. 7<sup>th</sup> Edition. USA, McGraw-Hill, 1997.
- PINTO, L. A. A. **Cinética da secagem de filés de peixes: Uso de um modelo difusivo com variação de volume**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.
- POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. 2 ed. Brasília, 1985.
- PRADO, M. M. (1999), **Secagem de sementes de papaya**. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1999.
- QUEIROZ, D, M.; PEREIRA, J. A. M. **Secagem de grãos a baixa temperatura**. Centreinar, Viçosa-MG, 1982.
- RATTI, C.. Shrinkage during drying of foodstufs. **Journal of Food Engineering**, v. 23, p. 91-105, 1994.
- ROSSETTO, C. A. V.; SILVA, O. F.; ARAÚJO, A. E. S. Influência da calagem, da época da colheita na incidência de fungos e aflatoxina em grãos de amendoins armazenados. **Ciência Rural**. Santa Maria. v. 35, n2, p. 309-315, 2005
- SCARPELINI, Larissa Matos; ARRIECHE, Leonardo da Silva; SARTORI, D. J. M. . Secagem de sementes em infrutescências de *Cecropia Glaziovii*. S.: Preservação de espécies pioneiras de ecossistemas tropicais. In: COBEQ-IC, 2008, São Carlos. Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. CD Rom São Carlos: UFSCar, 2007. v. 1. p. 1-6.
- SENADEERA, W. *et al.* Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. **Journal of Food Engineering**, v. 58, p. 277-283, 2003.
- SISSON, L. E.; PITTS, D. R. (1972), **Fenômenos de transporte**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara.
- SOGAB, M. N. **Curso de controle de poluição atmosférica**. São Paulo – SP: CETESB, p. 13, 1987.
- SRZEDNICKI, G. S., JOENG, Y. H., DRISCOLL, R. H. Studies on drying of Australian Sweet Cherries, **Proc. Of the 10<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS'96)**-Drying 96, Krakow, Poland, v. B, p. 831-838, 1996.
- SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T.; HOSAKA, H.. Shrinkage in dehydration of root vegetables. **Journal of Food Science**, v. 5, n. 41, p. 1189 - 1193, 1976.
- TAKOR, N. J., *et al.* Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying. **Journal of Food Engineering**, n. 40, p. 153- 160, 1999.

- THOMPSON, T. L.; FEERT, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying. **Transactions of ASAE.**, St. Joseph, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968.
- TRAVAGLINI, D. A. & TANGO, J. S. Estudo sobre as temperaturas de secagem do amendoim em casas e os seus efeitos sobre as qualidades do produto armazenado. **Coletânea do Instituto de Tecnologia de Alimentos**, SP, v.1, p. 364-379, 1965/1966.
- URETIR, G.; OZILGEM, M.; KATNAS, S. Effects of velocity and temperature of air on the drying rate constants of apple cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 30, p. 339-350, 1996.
- VAGENAS, G. K.; MARIONOS-KOURIU, D.. Design and optimization of an industrial dryer for sultana raisins. **Drying Technology**, v. 9, p. 439-461, 1991.
- VÁZQUEZ, G. *et al.* Proposals for the exploration of food and wood industry lignocellulose wastes based on their chemical composition, **Proceeding...** Barcelona, Spain, 2005.