



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR
E MASSA NO PSEUDOFRUTO DO CAJU (*ANACARDIUM OCCIDENTALE L.*)**

**TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA
NA ÁREA DE ENERGIA**

JACEK STANISLAW MICHALEWICZ

**Recife-PE
Junho de 2011**

Catálogo na fonte
Bibliotecária Raquel Cortizo, CRB-4 664

M621e Michalewicz, Jacek Stanislaw.
Estudo numérico e experimental da transferência de calor e massa no pseudofruto do caju (*Anacardium occidentale* L.) / Jacek Stanislaw Michalewicz. - Recife: O Autor, 2011.
143 folhas, il., gráfs., tabs., figs.

Orientadores: Prof. Dr: Jorge Recarte Henriquez Guerrero e Prof. Dr: José Carlos Charamba Dutra.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica 2011.

Inclui Referências Bibliográficas e Anexos.

1. Engenharia Mecânica 2. Secagem 3. Caju 4. *Anacardium occidentale* L. 5. Transferência de calor e massa 6. Modelagem numérica. 7. Ajuste de curvas. I. Henríquez, Jorge R. (orientador) II. Dutra, José Carlos Charamba (orientador) III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2011-243

“ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA NO PSEUDOFRUTO DO CAJU (*ANACARDIUM OCCIDENTALE L.*)”

JACEK STANISLAW MICHALEWICZ

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENERGIA
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE**

**Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO
ORIENTADOR/PRESIDENTE**

**Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA
ORIENTADOR**

**Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO PROGRAMA**

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO (UFPE)

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA (UFPE)

Prof. Dr. FABIO SANTANA MAGNANI (UFPE)

Prof^a. Dr^a. ANA ROSA MENDES PRIMO (UFPE)

Prof. Dr. ANTÔNIO GILSON BARBOSA DE LIMA (UFCG)

Prof. Dr. CARLOS ANTÔNIO CABRAL DOS SANTOS (UFPB)

AGRADECIMENTOS

A Deus que me concedeu a vida e tem me dado forças para enfrentá-la.

A minha esposa Glauce, pelo apoio, paciência e compreensão, não só no decorrer deste trabalho, mas durante todos os nossos dias; ao meu filho Lucas que soube compreender o tempo que deixei de dedicar-me a ele para a conclusão deste trabalho, e à minha Sogra Pujancí pelo apoio diário.

Aos meus Pais, irmãos, cunhados e sobrinhos que sempre estiveram torcendo pelo meu sucesso.

Aos meus Amigos e Professores Jorge Recarte Henriquez Guerrero e José Carlos Charamba Dutra, pelos ensinamentos tão valiosos, pela compreensão e ânimo durante todo tempo em que trabalhamos juntos.

Ao meu Amigo Alvaro Ochoa, pela sua valiosa contribuição neste trabalho.

Aos Professores e Amigos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica desta universidade, que tanto me apoiaram.

Aos Colegas do IFPE-Campus Recife, que sempre torceram pelo sucesso deste trabalho.

A FACEPE pelo suporte financeiro durante o período da realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo numérico-experimental da transferência de calor e massa no pedúnculo do caju (*Anacardium occidentale* L.) utilizando uma bancada experimental construída para este fim. Os experimentos de secagem foram realizados em fatias de caju de diferentes espessuras expostas a um fluxo de ar externo sob diferentes condições de ensaios para a temperatura e velocidade do ar. Foram ensaiadas espessuras de 4, 7 e 10×10^{-3} m, nas temperaturas do ar de 60, 70 e 80 °C e velocidades de ar de 3, 4 e 5 m/s. Para cada experimento foram obtidas as curvas da cinética de secagem do caju, e a partir dessas curvas foram determinados parâmetros importantes de secagem tais como o coeficiente de difusão de massa, o coeficiente de transferência de massa e a atividade de água. Posteriormente foi ajustado aos dados experimentais um conjunto de modelos encontrados na literatura para a cinética de secagem, e utilizando-se critérios estatísticos de ajustes foi escolhido, dentre estes modelos, o que melhor representasse a secagem do pedúnculo do caju. Além disso, foi construído um modelo numérico para descrever este mesmo processo, utilizando as equações de transferência de calor e massa com condições de contorno convectivas na superfície. As equações foram discretizadas através do método de volumes finitos com esquema implícito e resolvidas no ambiente MATLAB.

PALAVRAS-CHAVES: Secagem, Caju, *Anacardium occidentale* L., Transferência de calor e massa, Modelagem numérica, Ajuste de curvas.

ABSTRACT

This work represents an experimental-numerical study heat and mass transfer of the apple of cashew (*Anacardium occidentale* L.) using a testing bench specially built for this purpose. The drying experiments were carried out in cashew slices of different thicknesses exposed to an air flow under different test conditions for temperature and air velocity. They were tested thicknesses in 4, 7 and 10 x 10⁻³ m at air temperatures of 60, 70 and 80 °C and air velocities of 3, 4 and 5 m/s. For each experiment were obtained the kinetic curves of cashew drying, and from these curves were determined important parameters of drying such as the diffusion coefficient of mass, the mass transfer coefficient and activity water. Later experimental data was fitted to a set of models found in the literature for air drying, and using statistical criteria adjustment was chosen from these models, which represent the best drying the stem of cashew. In addition, constructed a numerical model to describe this same process, using the equations of heat and mass transfer with convective boundary conditions on the surface. The equations were discretized using the finite volume method and solved with the implicit scheme in MATLAB.

KEY WORDS: Drying, Cashew, *Anacardium occidentale* L., Heat and mass transfer, Numerical modeling, and Curve fitting.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1. O caju	03
2.1.1. <i>Generalidades</i>	03
2.1.2. <i>Características físico-químicas</i>	06
2.1.3. <i>A agro-indústria</i>	09
2.2. Secagem	14
2.2.1. <i>Secadores</i>	14
2.2.2. <i>Aspectos fundamentais da secagem</i>	20
2.2.2.1. <i>Período de secagem a taxa constante</i>	24
2.2.2.2. <i>Período de secagem a taxa decrescente</i>	24
2.2.3. <i>Encolhimento</i>	25
2.3. Fundamentos da modelagem matemática	29
3. ANÁLISE EXPERIMENTAL	35
3.1. Introdução	35
3.2. Descrição da bancada experimental	35
3.3. Metodologia dos ensaios	40
3.4. Resultados dos experimentos	47
3.5. Determinação de propriedades termo-físicas	76
3.5.1. <i>Densidade</i>	76
3.5.2. <i>Difusividade e Energia de ativação</i>	79
3.6. Encolhimento	84
4. MODELOS EMPÍRICOS DE SECAGEM	91
5. MODELOS NUMÉRICOS DE SECAGEM	105
5.1. Equação do transporte de massa	107
5.2. Equação do transporte de energia	109
5.3. Discretização das equações de transporte	111
5.4. Validação e teste de malha do modelo computacional	117
6. CONCLUSÃO	128
7. TRABALHOS FUTUROS	130
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
9. ANEXOS	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Caju (<i>Anacardium occidentale</i> L.).	03
Figura 2.2. Método de secagem por batelada.	16
Figura 2.3. Método de secagem contínua.	16
Figura 2.4. Bandeja típica contendo o material a ser secado por batelada.	17
Figura 2.5. Secador rotativo.	18
Figura 2.6. Secador solar para secagem direta e indireta.	19
Figura 2.7. Princípio da transferência de calor e massa.	21
Figura 2.8. Isoterma de sorção e conteúdos de umidade de um material.	21
Figura 2.9. Evolução no tempo do conteúdo de umidade, da temperatura e da taxa de secagem, para um ar com propriedade constante.	23
Figura 2.10. Curva umidade x tempo.	32
Figura 2.11. Taxa de secagem x umidade.	32
Figura 3.1. Detalhes do secador de bandeja: a) Ventilador e aquecedor de ar; b) Controle de temperatura; c) Laminador de ar; d) Área de teste; e) Termo-higrômetro; e f) Anemômetro.	36
Figura 3.2. Conjunto moto-ventilador.	36
Figura 3.3. Quadro elétrico de comando.	36
Figura 3.4. Dumper de controle da vazão do ar de secagem.	37
Figura 3.5. Laminador de ar.	37
Figura 3.6. Conjunto de resistências com 3 kW totais.	37
Figura 3.7. Variador de tensão.	37
Figura 3.8. Área de testes.	38
Figura 3.9. Bocal de saída.	38
Figura 3.10. Termo-higrômetro interno.	38
Figura 3.11. Termo-higrômetro externo.	38
Figura 3.12. Anemômetro, para medições de velocidade do ar.	39
Figura 3.13. Balança semi-analítica.	39
Figura 3.14. Logger com 2 canais.	39
Figura 3.15. Posicionamento dos termopares no interior da amostra.	40
Figura 3.16. Detalhe da maquina fotográfica no planilhímetro.	40
Figura 3.17. Cortador de caju com lâminas ajustáveis.	41
Figura 3.18. Caju sendo cortado.	41

Figura 3.19. Balança termogravimétrica.	42
Figura 3.20. Detalhe da fixação da bandeja na área de testes.	42
Figura 3.21. Detalhe dos pontos de medição da velocidade do ar de secagem.	43
Figura 3.22. Repetibilidade experimental, para temperatura média de 80 °C, velocidade média de 6,3 m/s, e espessura de 0,007 m.	45
Figura 3.23. Repetibilidade experimental, para temperatura média de 70 °C, velocidade média de 5 m/s, e espessura de 0,007 m.	46
Figura 3.24. Repetibilidade experimental, para temperatura média de 80 °C, velocidade média de 4,1 m/s, e espessura de 0,010 m.	47
Figura 3.25. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 6,2 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,004m de espessura.	51
Figura 3.26. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 6,0 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,007m de espessura.	51
Figura 3.27. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 6,5 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,010m de espessura.	52
Figura 3.28. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 5,0 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,004m de espessura.	52
Figura 3.29. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 5,0 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,007m de espessura.	53
Figura 3.30. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 5,1 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,010m de espessura.	54
Figura 3.31. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 3,6 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,004m de espessura.	54
Figura 3.32. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 3,6 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,007m de espessura.	55
Figura 3.33. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 3,8 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,010m de espessura.	55
Figura 3.34. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,004 m e temperatura do ar média de 81,2 °C.	56
Figura 3.35. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,007 m e temperatura do ar média de 81,2 °C.	57
Figura 3.36. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,010 m e temperatura do ar média de 80,7 °C.	58

- Figura 3.37. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, **58**
para a espessura de 0,004 m e temperatura do ar média de 70,8 °C
- Figura 3.38. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, **59**
para a espessura de 0,007 m e temperatura do ar média de 71,9 °C.
- Figura 3.39. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, **60**
para a espessura de 0,010 m e temperatura do ar média de 70,7 °C.
- Figura 3.40. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, **60**
para a espessura de 0,004 m e temperatura do ar média de 61,6 °C.
- Figura 3.41. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, **61**
para a espessura de 0,007 m e temperatura do ar média de 61,6 °C.
- Figura 3.42. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, **61**
para a espessura de 0,010 m e temperatura do ar média de 61,6 °C.
- Figura 3.43. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a **63**
velocidade média do ar de 3,7 m/s e temperatura média do ar de 80,7 °C.
- Figura 3.44. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a **63**
velocidade média do ar de 5,0 m/s e temperatura média do ar de 81,6 °C.
- Figura 3.45. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a **64**
velocidade média do ar de 6,3 m/s e temperatura média do ar de 80,7 °C.
- Figura 3.46. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a **64**
velocidade média do ar de 3,7 m/s e temperatura média do ar de 71,1 °C.
- Figura 3.47. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a **65**
velocidade média do ar de 5,1 m/s e temperatura média do ar de 71,1 °C.
- Figura 3.48. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a **65**
velocidade média do ar de 6,1 m/s e temperatura média do ar de 71,2 °C.
- Figura 3.49. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a **66**
velocidade média do ar de 3,7 m/s e temperatura média do ar de 61,8 °C.
- Figura 3.50. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a **66**
velocidade média do ar de 5,0 m/s e temperatura média do ar de 62,0 °C.
- Figura 3.51. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a **67**
velocidade média do ar de 6,2 m/s e temperatura média do ar de 61,3 °C.
- Figura 3.52. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a **68**
velocidade média do ar de 3,8 m/s e temperatura média do ar de 61,8 °C.
- Figura 3.53. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a **68**

velocidade média do ar de 5,0 m/s e temperatura média do ar de 62,0 °C.

Figura 3.54. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a **68**
velocidade média do ar de 6,2 m/s e temperatura média do ar de 61,0 °C.

Figura 3.55. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a **69**
velocidade média do ar de 3,7 m/s e temperatura média do ar de 71,1 °C.

Figura 3.56. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a **69**
velocidade média do ar de 5,1 m/s e temperatura média do ar de 71,1 °C.

Figura 3.57. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a **70**
velocidade média do ar de 6,1 m/s e temperatura média do ar de 71,2 °C.

Figura 3.58. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a **70**
velocidade média do ar de 3,7 m/s e temperatura média do ar de 80,7 °C.

Figura 3.59. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a **71**
velocidade média do ar de 5,0 m/s e temperatura média do ar de 81,6 °C.

Figura 3.60. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a **71**
velocidade média do ar de 6,3 m/s e temperatura média do ar de 80,7 °C.

Figura 3.61. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 5,7 e 6,4 m/s e **72**
espessura de 0,004 m.

Figura 3.62. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 5,9 e 6,1 m/s e **72**
espessura de 0,007 m.

Figura 3.63. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 6,2 e 6,7 m/s e **73**
espessura de 0,010 m.

Figura 3.64. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 4,9 e 5,2 m/s e **73**
espessura de 0,004 m.

Figura 3.65. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 5,0 e 5,2 m/s e **74**
espessura de 0,007 m.

Figura 3.66. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 5,0 e 5,2 m/s e **74**
espessura de 0,010 m.

Figura 3.67. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 3,6 e 3,7 m/s e **75**
espessura de 0,004 m.

Figura 3.68. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 3,5 e 3,7 m/s e **75**
espessura de 0,007 m.

Figura 3.69. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 3,6 e 4,1 m/s e **75**
espessura de 0,010 m.

Figura 3.70. Densímetro e óleo vegetal.	77
Figura 3.71. Detalhamento das partes do densímetro.	77
Figura 3.72. Amostras secas de caju.	78
Figura 3.73. Medições para obter a densidade.	78
Figura 3.74. Variação da difusividade vs. Conteúdo de umidade.	79
Figura 3.75. Instrumento para planimetria do diâmetro da amostra.	84
Figura 3.76. Instrumento para planimetria da espessura da amostra.	84
Figura 3.77. Detalhe do planímetro.	85
Figura 3.78. Cálculo da área da amostra no início da secagem.	85
Figura 3.79. Cálculo da área da amostra no fim da secagem.	85
Figura 3.80. Comparativo do encolhimento e da perda de umidade da amostra.	86
Figura 4.1- Comparação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para 0,004 m de espessura.	98
Figura 4.2- Comparação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para 0,007 m de espessura.	99
Figura 4.3- Comparação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para 0,010 m de espessura.	99
Figura 4.4- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 3 m/s e espessura de 0,007m.	100
Figura 4.5- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 4 m/s e espessura de 0,007m.	100
Figura 4.6- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 5 m/s e espessura de 0,007m.	101
Figura 4.7- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 3 m/s e espessura de 0,010 m.	101
Figura 4.8- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 4 m/s e espessura de 0,010 m.	102
Figura 4.9- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 5 m/s e espessura de 0,010 m.	102
Figura 4.10- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para temperatura de 80 °C e espessura de 10 mm.	103
Figura 4.11- Comparação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para o modelo Werma et al. e espessura de 0,007 m.	103

Figura 4.12- Comparação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para o modelo Logarithmic e espessura de 0,010 m.	104
Figura 5.1. Fatia de caju a ser modelada.	106
Figura 5.2. Volume de controle da amostra a ser modelada.	106
Figura 5.3. Representação da malha com o posicionamento dos nós.	111
Figura 5.4 Representação da malha para o volume de fronteira superior e inferior.	112
Figura 5.5. Fluxograma da implementação computacional do modelo matemático que descreve a secagem de caju em fatias.	116
Figura 5.6 Esquema placa plana infinita, problema teste.	117
Figura 5.7 Comparação de resultados numéricos e analíticos para $hm=0,001$.	118
Figura 5.8 Comparação de resultados numéricos e analíticos para $hm=0,1$.	119
Figura 5.9 Teste de simetria para $hm=0,001$.	119
Figura 5.10 Teste numérico para condições de contorno não simétricas.	120
Figura 5.11 Variação do coeficiente de transferência local ao longo da superfície do cilindro. Conforme ÇENGEL (2009).	121
Figura 5.12 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para temperatura de 81,7 °C.	122
Figura 5.13 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para temperatura de 72,6 °C.	122
Figura 5.14 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para temperatura de 61,8 °C.	122
Figura 5.15 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para velocidade de 6,7 m/s.	123
Figura 5.16 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para velocidade de 5,0 m/s.	123
Figura 5.17 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para velocidade de 3,9 m/s.	124
Figura 5.18 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para amostras com espessura inicial de 0,004 m.	124
Figura 5.19 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para amostras com espessura inicial de 0,007 m.	124
Figura 5.20 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para amostras com espessura inicial de 0,010 m.	125

Figura 5.21 Simulação do comportamento da perda de umidade para diversas temperaturas.	126
Figura 5.22 Simulação do comportamento do tempo de secagem para diversas temperaturas e velocidades do ar de secagem para 0,004 m de espessura.	126
Figura 5.23 Simulação do comportamento do tempo de secagem para diversas temperaturas e velocidades do ar de secagem para 0,007 m de espessura.	127
Figura 5.24 Simulação do comportamento do tempo de secagem para diversas temperaturas e velocidades do ar de secagem para 0,010 m de espessura.	127
Figura A1. Termômetro de referência dentro de recipiente com areia	138
Figura A2. Estufa QUIMIS utilizada na calibração de termopares.	138
Figura A3. Esquema da calibração de termopares utilizando a estufa.	139
Figura A4. Gráfico da aferição do termopar TT1.	140
Figura A5. Gráfico da aferição do termopar TT2.	140

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Principais características dos cajueiros, comum e anão precoce.	04
Tabela 2.2. Composição química do pedúnculo de caju.	08
Tabela 3.1. Desvio padrão da repetibilidade experimental do conteúdo de umidade, para temp. média de 80 °C, velocidade média de 6,3 m/s, e espessura de 0,007 m.	44
Tabela 3.2. Desvio padrão da repetibilidade experimental do conteúdo de umidade, para temp. média de 70 °C, velocidade média de 5 m/s, e espessura de 0,007 m.	45
Tabela 3.3. Desvio padrão da repetibilidade experimental do conteúdo de umidade, para temp. média de 80 °C, velocidade média de 4,1 m/s, e espessura de 0,010 m.	46
Tabela 3.4. Conteúdo de umidade das amostras de caju com 0,004 m de espessura.	48
Tabela 3.5. Conteúdo de umidade das amostras de caju com 0,007 m de espessura.	48
Tabela 3.6. Conteúdo de umidade das amostras de caju com 0,010 m de espessura.	49
Tabela 3.7. Cálculo de L, semi-espessura das amostras.	81
Tabela 3.8. Difusividade média experimental.	83
Tabela 3.9. Comparativo dos modelos de encolhimento.	89
Tabela 3.10. Coeficientes utilizados para prever encolhimento do diâmetro da amostra.	89
Tabela 3.11. Coeficientes utilizados para prever o encolhimento da espessura.	90
Tabela 4.1. Umidade de equilíbrio para cada condição experimental.	94
Tabela 4.2. Modelos matemáticos aplicados em curvas de secagem.	95
Tabela 4.3. Resultados estatísticos dos modelos matemáticos aplicados nas curvas médias de secagem.	97
Tabela 4.4. Correlações dos coeficientes dos modelos com a temperatura e velocidade.	98
Tabela A.1. Agrupamento das temperaturas padrão para os termopares.	139
Tabela B.1. Incertezas globais.	142

NOMENCLATURAS

Símbolo	Descrição	Unidades
A	Área da amostra	(m ²)
A_o	Área inicial da amostra	(m ²)
a_w	Atividade de água no material	(kg/kg)
b_o	Metade da espessura inicial do material	(m)
C_p	Calor específico	(J/kgK)
D_{AB}	Coefficiente de difusão de massa	(m ² /s)
D_{eff}	Coefficiente de difusão efetivo	(m ² /s)
e	Espessura do material	(m)
E_a	Energia de ativação	(kJ/mol)
h_m	Coefficiente de transferência de massa	(m/s)
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	(W/m ² K)
h_{fg}	Entalpia de vaporização	(J/kg)
k_∞	Condutividade térmica do ar	(W/mK)
k_m	Condutividade térmica do material	(W/mK)
L	Diâmetro do material	(m)
Nu	Número de Nusselt	
n	Numero de nós da malha	
N''	Fluxo de massa	(kg/m ² s)
Pr	Número de Prandt	
q''	Fluxo de energia	(W/m ²)
Q	Energia	(J)
Re	Número de Reynolds	
Sc	Número de Smith	
Sh	Número de Sherwood	
T	Temperatura	(K)
t	Tempo	(s)
u	Velocidade de encolhimento	(m/s)
UR	Umidade relativa do ar	(%)
UA	Umidade absoluta do ar	(kg/kg ar sec)
V	Velocidade do ar	(m/s)
v	Volume da amostra	(m ³)
v_e	Volume da amostra no equilíbrio	(m ³)
X	Conteúdo de umidade	(kg/kg seca)
X_o	Conteúdo de umidade inicial	(kg/kg seca)
X_e	Conteúdo de umidade de equilíbrio	(kg/kg seca)
y	Distancia do centro à superfície	(m)
α	Coefficiente de difusão térmica	(m ² /s)
μ	Viscosidade dinâmica	(m ² /s)
ρ_∞	Densidade do ar	(kg/m ³)
ρ_m	Densidade do material	(kg/m ³)
ρ_a	Densidade da água	(kg/m ³)
ρ_e	Densidade da água no equilíbrio	(kg/m ³)
ν	Viscosidade cinemática	(m ² /s)

1. INTRODUÇÃO

A secagem é sem dúvida uma das operações mais antigas e mais comuns dos processos industriais. Nos dias atuais o processo de secagem é uma operação fácil e confiável, mas não muito eficiente energeticamente nem tampouco agradável ao ambiente onde está instalado. A maioria dos secadores existentes, principalmente os mais velhos, ainda é controlada total ou parcialmente de forma manual, dependendo exclusivamente do “olho” e experiência do operador.

Um estudo de secagem permite um maior conhecimento do processo que, em conjunto ao desenvolvimento de ferramentas matemáticas e computacionais, possibilita a simulação e o estudo do comportamento do sistema, que pode então ser otimizado e mantido por um sistema de controle capaz de prever alterações no produto final em função das condições climáticas e do processo, mantendo a qualidade do produto.

O estudo aprofundado do processo de secagem de frutas, por exemplo, possibilita a redução de custos e mantém constante a qualidade do produto final, tornando a agro-indústria local e nacional mais competitiva nos mercados interno e externo.

O candidato vem trabalhando em pesquisa na área de transferência de calor e massa desde seu mestrado, onde realizou um estudo sobre o comportamento da secagem de placas de gesso, dimensionando e construindo um túnel de vento, utilizado como bancada experimental para a realização dos ensaios.

Inicialmente foram levantados na literatura existente, os tipos de caju, principais características, os tipos de processamentos existentes assim como os tipos de secagens e secadores utilizados. Também foi levantado os tipos de modelos matemáticos utilizados em secagem considerando fluxo uni-dimensional, e a existência de experimentações. Tais estudos fazem parte da revisão bibliográfica deste trabalho.

No presente trabalho foi projetado e construído um secador tipo bandeja com fluxo de ar impulsionado por um ventilador centrífugo com vazão de ar controlada, e usando 3 kW de potência resistiva ajustáveis, para o aquecimento do ar de secagem. Tal bancada foi construída no laboratório do GET- Grupo de Engenharia Térmica, Departamento de Engenharia Mecânica – UFPE.

Na abordagem numérica utilizada, o modelo matemático do problema foi reduzido a uma análise da transferência de calor e massa em uma única fatia (rodela) de caju, considerando os principais fenômenos físicos envolvidos no processo, numa

abordagem unidimensional, já que a casca foi considerada como isolante. Neste modelo simplificado foram avaliadas as implicações resultantes a um problema unidimensional e as suas discrepâncias com os resultados experimentais obtidos de ensaios programados para esta finalidade.

2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O caju

2.1.1. Generalidades

Segundo ABREU e SOUZA (2004), o caju (*Anacardium occidentale* L.), Fig. 2.1, frutífera originária do Nordeste brasileiro, foi descoberto pelos nativos destas terras, que o utilizavam as mais diversas formas, seja como fruto in natura, seja como suco extraído por prensagem manual ou como uma bebida fermentada (o caoi ou caoim), a qual era utilizada em comemorações e em ocasiões especiais.



Figura 2.1. Caju (*Anacardium occidentale* L.)

No Brasil, os Estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte produziram em 2007, aproximadamente, 120 mil toneladas de castanha de caju (85% da produção nacional) em uma área de 665 mil hectares (IBGE, 2011).

O fruto do cajueiro é na verdade a castanha, e a parte da qual se extrai o suco de caju é o pedúnculo floral, ou simplesmente pedúnculo. É, também, conhecido como pseudofruto do caju, podendo apresentar-se de várias formas, tamanhos e em tonalidades de cores que vão desde o amarelo-claro, passando pelo alaranjado e indo até um vermelho vivo. A tonalidade de cores não tem interferência nem está relacionada a um sabor mais ou menos doce, mas depende da variedade e de outros fatores, tais como clima e estágio de maturação (ABREU e SOUZA, 2004).

Conforme LEITE e PESSOA (2004), o agro-negócio do caju no nordeste brasileiro surgiu como atividade econômica por ocasião da II Guerra Mundial para atender a demanda dos Estados Unidos pelo Líquido da Casca de Castanha de Caju, que na época constituía insumo estratégico para fabrico de tintas, vernizes, pós de fricção,

lubrificantes, isolantes elétricos, dentre outras aplicações. Depois do período bélico estabeleceu-se um processo de exportação de amêndoas de castanha de caju para os Estados Unidos, por parte do Brasil, enquanto que a Índia fornecia para a então União das Repúblicas Socialistas Soviéticas. Essa geopolítica comercial durou até o ano de 1982, uma vez que, a partir de 1983, a URSS praticamente deixou de adquirir tal produto, fazendo com que a Índia passasse a disputar, com o Brasil, o atrativo mercado norte-americano.

Segundo GALVÃO (2006), o cajueiro comum ou gigante, cultura típica dos países do terceiro mundo, é cultivado no Brasil, Índia, Moçambique, Tanzânia e Quênia. Em meados dos anos 80, o Brasil iniciou o plantio de clones de cajueiro anão-precoce (*Anacardium occidentale* L., var. *nanum*) que veio permitir o cultivo nos moldes da fruticultura moderna, conforme Tabela 2.1. Tais clones têm sido levados do Brasil e plantados em vários países, futuros competidores, inclusive Austrália.

Tabela 2.1. Principais características dos cajueiros, comum e anão precoce.

Características	Cajueiro comum	Cajueiro anão-precoce
Início de produção	3º ano	1º ano
Produção econômica	8º ano	3º ano
Primeira floração	3 a 5 anos	6 a 18 meses
Período de frutificação	5 meses	7 meses
Altura da planta	Até 15 m	Até 5,4 m
Diâmetro da copa	10 a 16 m	6 a 8 m
Produção de castanha/planta/safra	0 a 100 kg	Até 43 kg
Produtividade dos pomares	220 kg/ha	1.300 kg/ha
Variação no peso da castanha	3 a 33 g	3 a 10 g
Estabilidade	12 anos	7 anos

Fonte: Oliveira e Andrade (2004)

A castanha completa seu desenvolvimento entre seis e oito semanas após a polinização, considerada um aquênio preso à extremidade de um pedúnculo hipertrofiado (pseudofruto), comumente chamado de maçã do cajueiro que apresenta estrutura carnosa, suculenta, ligeiramente adstringente e caracterizada por agradável sabor. Comumente chamado de castanha, o fruto é constituído de: pericarpo (casca) e

semente. O pericarpo é composto por epicarpo, mesocarpo e endocarpo, e a semente é composta pela película (tegumento) e embrião (amêndoa) (FILGUEIRAS et al., 1999).

Os autores JUNIOR e BEZERRA (2002) relatam que, o florescimento geralmente coincide com o final da estação chuvosa, variando de país para país, de acordo com o hemisfério e a latitude. O período de florescimento se estende por vários meses, apresentando variação no tempo e no espaço, em função das condições edafoclimáticas predominantes. Os cajueiros, no nordeste do Brasil, florescem ao longo de dois a três meses e, como as florações das árvores não são sincronizadas, não ocorre simultaneamente, a colheita pode prolongar-se por um período de cinco a seis meses. Na natureza existem dois tipos de cajueiros bem definidos em relação ao porte: o cajueiro comum ou gigante (*Anacardium occidentale* L.) e o cajueiro anão-precoce (*Anacardium occidentale* L., var. *nanum*). O cajueiro comum é uma planta que pode chegar até a 15 m, possuindo altura média de 5 a 8 m; é de porte médio e de ramificação baixa. Suas flores são polígamas de dois tipos: perfeitas e estaminadas, arranjadas em inflorescência do tipo panícula.

Segundo GALVÃO (2006), a agroindústria de caju do Nordeste tem relevante importância socioeconômica para o país em função da exploração de 769.465 ha de cajueiros, que mobilizam no campo cerca de 300 mil pessoas e proporcionam uma produção de 295.668 t. de castanha e 2 milhões de t. de pedúnculo por ano. Além de frágil, este produto é altamente perecível, apresentando mecanismos aceleradores de degradação microbiológica contribuindo, assim, para a rejeição ou perda de centenas de milhares de toneladas do produto, chegando a 80% da produção (GOUVEIA et al., 2002 e IBGE, 2011). Segundo OLIVEIRA (2002), os melhores indicadores do ponto de colheita do pedúnculo são: a coloração, a firmeza e a composição. Na prática, contudo, a colheita é realizada quando o pedúnculo está completamente desenvolvido, ou seja, com tamanho máximo, textura firme e coloração característica do clone.

A colheita deve ser feita nas horas de temperatura mais amena. Para que o fruto seja colhido corretamente, deve ser feita uma leve torção para que o pedúnculo se solte do ramo da panícula. Caso o pedúnculo ofereça resistência para soltar-se, ainda não alcançou o estado de maturação para colheita. O contato direto com a palma da mão, também, deve ser evitado por elevar a temperatura da polpa, acelerando a deterioração. Ainda no campo, pode ser feita uma pré-seleção, para separar os caju destinados ao mercado de mesa daqueles que serão destinados à indústria, inclusive fazendo-se o descastanhamento. Essas operações devem ser realizadas à sombra e no menor tempo

possível. Os cajus devem ser acondicionados, em uma única camada, nas caixas plásticas de colheita (47 x 30,5 x 12 cm), revestidas internamente por uma camada de espuma de aproximadamente 1 cm de espessura, para não danificar o pedúnculo. A vida útil pós-colheita do pedúnculo quando armazenado em temperatura ambiente não ultrapassa 48 horas; sob refrigeração, a 5°C e com 85% a 90% de umidade relativa, e devidamente embalada (atmosfera modificada), a vida útil do caju é de cerca de dez a quinze dias.

2.1.2. Características físico-químicas

A composição do caju é bastante complexa e, se por um lado, a presença de vitaminas, taninos, sais minerais, ácidos orgânicos e carboidratos tornam o caju um alimento importante nestes aspectos, por outro lado é responsável pela sua alta perecibilidade, exigindo cuidados especiais para a estocagem, transporte, limpeza e processamento. Segundo GALVÃO (2006), ocorre uma série de transformações físicas e químicas durante o desenvolvimento e maturação do pedúnculo de cajueiro.

Conforme ABREU e SOUZA (2004), muitos autores que falam sobre o caju e seus produtos derivados atribuem ao sabor “travoso”, a grande causa da rejeição do suco de caju no mercado internacional. Este sabor “travoso” do caju é conferido por um grupo de substâncias naturais do próprio fruto do cajueiro, também presente em uma infinidade de outros tecidos vegetais, responsáveis por um sistema de defesa natural da planta contra o ataque de insetos e pequenos animais que venham a se alimentar das suas folhas, caules, flores e frutos. Essas substâncias são conhecidas por uma denominação genérica de taninos. Estes taninos são também conhecidos como compostos fenólicos e dentre os principais deles está o ácido tânico (daí o nome tanino). Todos esses compostos, dependendo do tipo e do tamanho de suas moléculas podem ou não causar o “travo”, conhecido tecnicamente por adstringência, palavra de origem latina e derivada para o português. Esses compostos são responsáveis por mecanismos vitais à planta e, portanto, inúmeras pesquisas estão sendo realizadas visando à obtenção de variedades com menores teores de taninos para obtenção de um caju de mesa mais saboroso e com menos adstringência.

Os açúcares presentes no pedúnculo de caju são aqueles naturalmente encontrados em outras frutas tropicais: a frutose, a glicose e a sacarose em menores proporções. A presença de maior proporção de frutose pode ser preponderante sobre o

sabor adocicado, pois ela é, em uma escala comparativa, mais doce que a sacarose, que por sua vez é mais doce que a glicose. Segundo GALVÃO (2006), no pedúnculo do caju, os principais açúcares encontrados são maltose, sacarose, glicose, celobiose e rafinose. A glicose constitui o principal açúcar presente, seguido por frutose. Os açúcares redutores frequentemente aumentam durante o crescimento e maturação tanto em frutos climatéricos como em não-climatéricos. Esse acréscimo é atribuído principalmente à hidrólise do amido acumulado durante o crescimento do fruto na planta, em açúcares solúveis.

O sabor ácido do pedúnculo de caju deve-se à presença de ácidos orgânicos em quantidade elevada, muitas vezes combinada com um baixo teor de açúcares. Isso confere ao suco um sabor ácido ou “azedo”, o que pode motivar sua rejeição. A vitamina C ou ácido ascórbico é um dos principais ácidos encontrados no suco de caju, em valores médios de 200 a 300 mg / 100 ml do suco integral. Isso coloca o caju como uma fonte muito importante de vitamina C, destacando-o dentre as frutas consagradas como fontes dessa vitamina, como a laranja, a goiaba e a acerola.

O pedúnculo de caju é de interesse nutricional sendo, portanto recomendado como alimento por apresentar, principalmente, um elevado teor de vitamina C. A literatura registra a inclusão do pedúnculo de caju dentre aqueles produtos classificados como boa fonte de vitamina C chegando a conter cerca de três a cinco vezes o teor encontrado em frutos cítricos que são usualmente considerados como fonte desta vitamina. O conteúdo de vitamina C em muitos frutos tende a reduzir durante a maturação e a esta redução, atribui-se à atuação, principalmente, da enzima de ácido ascórbico oxidase. A avaliação do teor de vitamina C em pedúnculos de caju tem sido objetivo de estudo por muitos pesquisadores em diferentes regiões do Mundo cujos valores variam para o pedúnculo maduro de 156 a 455 mg / 100 ml de suco (MAIA et al., 2001).

Conforme a CAJUNOR (2009), como o caju apresenta variação na sua composição química de acordo com o seu tipo, clone e região produtora, são apresentados dados médios do pedúnculo (Tabela 2.2), não havendo, portanto, diferenciação entre os tipos de caju amarelo e vermelho.

O caju possui componentes que lhe conferem o título de alimento funcional, ou seja, que atende as necessidades nutricionais e possui função agregada à saúde pela riqueza em fibras e vitaminas. O caju é, entre as frutas comestíveis cultivadas, uma das que apresenta maior teor de vitamina C (ácido ascórbico), sendo superado apenas pela

acerola (*Malpighia glabra* L.) ou ‘Cereja das Antilhas’, planta introduzida no Brasil há muitos anos, mas que apenas recentemente foi divulgada com maior intensidade, além disso, o pedúnculo do caju é rico em fibras que genericamente é o componente de alimentos como frutas, verduras, grãos e legumes, resistentes à digestão, que não é degradado pelas enzimas digestivas humanas (GALVÃO, 2006).

Tabela 2.2. Composição química do pedúnculo de caju.

Umidade (%)	86,0
Brix	11,0
pH	4,2
Açúcares redutores (%)	7,9
Açúcares totais (%)	8,4
Acidez total (%)	0,36
Ácido ascórbico (mg/100g)	18,5
Taninos (%)	0,35
Cálcio (mg/100g)	14,5
Fósforo (mg/100g)	33,0
Ferro (mg/100g)	0,36

As fibras se ligam a ácidos e sais biliares, contribuindo assim na prevenção de doenças coronárias e câncer de cólon. Porém, esta ligação depende do tipo de fibra (celulose, lignina etc.) e o tipo de ácidos e sais biliares (cólico, taurocólico, glicocólico e outros). As fibras também se ligam às micelas de lipídios, ou seja, a todos os componentes destas micelas como os sais biliares, fosfolipídios, colesterol e ácidos graxos. Portanto, as fibras além de reduzirem os níveis de colesterol no sangue, protegem o organismo contra efeitos de substâncias tóxicas por ligar-se a estes produtos. Os efeitos das fibras foram reconhecidos na década de 50, sendo confirmado o verdadeiro valor das fibras para a nutrição. Nas duas décadas seguintes, alguns pesquisadores realizaram trabalhos pioneiros e publicaram artigos importantes sobre a ação benéfica da fibra na alimentação.

Conforme a CAJUNOR (2009), a casca, que representa de 65% a 70% do peso da castanha, é constituída por um epicarpo coriáceo, atravessado por um mesocarpo esponjoso, cujos alvéolos são preenchidos por um líquido cáustico e inflamável – o

LCC (líquido da casca da castanha). A película ou tegumento da amêndoa que representa cerca de 3% do peso da castanha é rica em tanino.

A amêndoa, que é a parte comestível da castanha, é formada por dois cotilédones de cor marfim. Representa de 28% a 30% do seu peso, porém no processo industrial o rendimento médio é de apenas 21%. A amêndoa da castanha de caju apresenta grande valor nutritivo. É considerada fonte de proteína de alta qualidade, rica em ácidos graxos poliinsaturados e altamente energéticos, rica em gorduras e carboidratos, apresentando ainda elevados teores de cálcio, ferro e fósforo.

2.1.3. A agro-indústria

Segundo LEITE e PESSOA (2004), o avanço tecnológico obtido nos últimos anos permite ampliar significativamente o agronegócio do caju, mediante a exploração de novos produtos e o desenvolvimento de ações voltadas para uma maior agregação de valor.

Estudos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2009) mostram que cada quilograma de castanha corresponde a nove quilogramas de polpa. Assim, a estimativa da produção da polpa, em 2007, é de 2,3 milhões de toneladas. Calcula-se que é utilizado apenas de 15% a 20% da polpa na fabricação de doces, sucos, vinho ou consumo in natura e 85 % é desperdiçado, ou seja, 1,9 milhões de toneladas de alimento sadio e nutritivo são jogados fora.

São reconhecidos dois períodos que caracterizam a evolução da agroindústria do caju. O primeiro, existente desde os primórdios da colonização, caracterizava-se por ser extrativista. Esse sistema subsiste nos dias atuais e responde por parcela significativa de castanha, que entra no circuito de comercialização (MAIA et al., 2001). O segundo período, iniciado em meados da década de sessenta, caracterizou-se por uma considerável expansão dos setores agrícola e industrial. O mercado favorável para os produtores do caju, a existência de incentivos fiscais e subsídios oferecidos aos produtores industriais, e, o fato de serem produtos geradores de divisas necessárias à consolidação do modelo exportador, foram responsáveis pela acelerada expansão agroindustrial do caju. A escassez da matéria-prima, decorrente da elevação de preços da castanha, concorreu para que os empresários do setor, também investissem em programas de plantio, visando o abastecimento de suas indústrias (MAIA et al., 2001)

O aproveitamento industrial do caju é realizado principalmente na região Nordeste do país. Esse aproveitamento visa, basicamente, o beneficiamento da castanha e, em menor escala o aproveitamento do pedúnculo. Mesmo considerando o aproveitamento do pedúnculo sob a forma de sucos, doces, geleias, néctares, farinhas e fermentados, só 15% da produção do pedúnculo é utilizada. Uma das causas para esse baixo aproveitamento está relacionada ao tempo de deterioração do pedúnculo, que ocasiona excessivas perdas no campo e na indústria (CAMPOS et al., 2005).

Segundo ABREU e SOUZA (2004), o aproveitamento de pedúnculos de caju durante a safra, que é caracteristicamente determinada durante três meses do ano, é atualmente insignificante, em relação ao volume dessa matéria-prima perdido a cada ano. Essa perda, segundo dados da Associação das Indústrias Produtoras de Sucos de Frutas Tropicais do Norte e Nordeste do Brasil (ASTN), pode chegar a cifras de até um milhão de toneladas desperdiçadas nos campos de produção de caju, em toda a Região produtora. Essa perda pode estar relacionada a um volume muito elevado de produção em um espaço de tempo muito curto, associado a uma alta perecibilidade do pedúnculo após a retirada da planta e a sua separação da castanha. Tal problema é hoje um desafio para os cajueiros, que estão partindo para o emprego de técnicas agrônomicas mais modernas e racionais, tais como o uso de variedades anãs e precoces, a fertirrigação e o manejo integrado de pragas, possibilitando, dessa forma, uma produção bem mais elevada de frutos, com melhor qualidade e eliminando o fator safra, com uma produção distribuída durante quase todo o ano.

Segundo ABREU e SOUZA (2004), além do consumo natural como fruta fresca, o pedúnculo do caju pode ser utilizado na fabricação de suco de caju, farinha de caju, doces, biscoitos, catchup, pratos quentes, pratos frios, pães, patês, refrigerantes, vinagre, vinho, aguardente, néctar e até hambúrguer, à base da fibra do caju, estabelecendo de modo significativo o desenvolvimento do produto sob o ponto de vista da aceitação do consumidor.

Segundo GALVÃO (2006), o mercado para a comercialização dos produtos do cajueiro é cada vez mais amplo, já que a planta apresenta inúmeras formas de aproveitamento. Da árvore, pode-se obter carvão, sendo as cinzas ricas em potássio, podendo ser, também, utilizadas na fabricação do sabão; as folhas novas, as cascas do tronco e dos ramos, devido aos seus altos teores de taninos, são utilizadas em curtumes; enquanto que a resina, por apresentar bom poder de colagem, é empregada em encadernações de livros e cadernos, colagem de selos e fabricação de vernizes. O

aproveitamento do pedúnculo (pseudofruto) ocorre das mais variadas formas, como in natura ou ainda na fabricação de sucos, sorvetes, cajuína, vinho, licor, doces (compotas, cristalizado, ameixa, massa), geleias, cajuína, refrigerante gaseificado, aguardente, catchup, hambúrgueres e muitos outros.

Quanto ao pedúnculo, as perspectivas são também promissoras. O suco de caju processado a quente (tradicional) perde grande parte dos seus atributos naturais e exige níveis elevados de conservantes e estabilizantes. Ao contrário, o suco processado a frio, mediante processos modernos como micro filtração (mantendo as características naturais do produto) pode estabelecer um novo padrão para esse tipo de produto, notadamente no nicho de mercado pronto para beber. Não se descarta a possibilidade desse produto vir a fazer parte da matriz internacional de blends de sucos. Nesse caso, teria uma elevação brutal da demanda por matéria-prima (pedúnculo), ensejando até o incremento de novos cultivos de materiais com menores índices de presença de taninos e com elevados teores de sólidos solúveis. A obtenção de xarope (suco concentrado, mercado de frutose) e a produção de farinha (pó do caju) se colocam ao lado da produção de ração animal, como outras possibilidades para valorização e utilização do pedúnculo, reduzindo o grande desperdício e vislumbrando um maior equilíbrio da receita dos produtores.

Segundo ABREU e SOUZA (2004), a cajuína não é nada mais que um suco de caju puro, clarificado, sem adição de açúcar e conservantes, acondicionados em garrafas que foram colocadas por um longo período de cozimento em banho-maria para o líquido adquirir uma coloração âmbar e um sabor característico. Felizmente, para a fabricação de cajuína a presença de taninos é fator indispensável, já que essas substâncias são responsáveis pela floculação da polpa presente no suco, quando da adição do agente clarificante, a gelatina comercial.

Por ser rico em fibras não digeríveis, e carente de vitaminas e proteínas, o rejeito das indústrias de aproveitamento do pedúnculo de caju tem seu valor nutritivo limitado, sendo simplesmente utilizado como ração animal ou descartado no meio ambiente. Um aproveitamento racional e eficiente desse rejeito, através de seu enriquecimento proteico, poderá dar resultados satisfatórios na produção de rações.

PAIVA et al.(2000), citam alguns tipos de derivados de caju, como segue:

- Caju ameixa: O produto denominado de caju-ameixa é o pedúnculo cozido em xarope e desidratado, que resulta numa passa enegrecida e de textura macia. A fruta passa, inicialmente, por um processo semelhante ao de frutas cristalizadas, ou seja,

uma impregnação lenta com xarope: em seguida por um processo de desidratação, onde a atividade de água final é reduzida, tornando o produto resistente à contaminação microbológica.

- Vinho de caju: O vinho de caju é a bebida cujo teor alcoólico pode variar de 10 a 14 °GL e obtém-se pela fermentação do suco clarificador e corrigido, de pedúnculos doces, frescos e sãos.
- Suco integral de caju: O suco integral com alto teor de polpa é extraído do caju, com aproveitamento da sua parte sólida mediante processamento tecnológico adequado, não gaseificado, não fermentado, de cor, sabor e aroma característicos, submetido a tratamento térmico, que assegura a sua apresentação e conservação até o momento do consumo. A preservação exige ação mista: tratamento térmico + aditivo.
- Rapadura de caju: A rapadura de caju é o produto obtido da polpa desintegrada e parcialmente desidratada, concentrada com açúcar e pectina até obter consistência firme e textura macia.
- Néctar de caju: O néctar de caju é o produto não fermentado, não gaseificado, destinado ao consumo direto, obtido pela dissolução, em água potável, de 50% no mínimo, de polpa mais suco integral, adicionado de ácido e açúcar.
- Mel clarificado do caju: O mel clarificado de caju é um produto do suco clarificado de caju, de cor âmbar claro e odor característico, acrescido de açúcar e ácido, submetido a tratamento térmico (concentração), que assegura a sua conservação por um longo período.
- Geleia de caju: A geleia de caju é um produto obtido da fervura do pedúnculo, extraindo-se o suco, filtrando-o e adicionando-se quantidades adequadas de açúcar, pectina e ácido até alcançar o grau brix suficiente, para que ocorra a geleificação durante o resfriamento.
- Doce de caju em massa: O doce de caju em massa é um produto resultante do processamento adequado do pedúnculo, com ou sem adição de água, pectina e ajustadores de pH, até uma consistência apropriada, sendo acondicionado de forma a assegurar sua perfeita conservação.
- Doce de caju em calda: O doce de caju em calda é o produto obtido de frutos inteiros ou em pedaços, com o ou sem casca, cozidos em água e açúcar, envasados em lata ou vidro, submetidos a um tratamento térmico adequado.

- Doce de caju cristalizado: O doce de caju cristalizado é o produto resultante do processamento adequado do pedúnculo, com ou sem adição de água, pectina e ajustadores de pH, até uma consistência apropriada, formatados em tabletes e recobertos com açúcar cristal, sendo acondicionados de forma a assegurar sua perfeita conservação.
- Compota de caju: A compota de caju é o produto obtido de frutos inteiros ou em pedaços, com ou sem película, submetidos a um cozimento rápido, envasados em recipientes de vidros, praticamente crus, coberto com calda de açúcar, tendo recebido um tratamento térmico adequado.
- Cajuína: A cajuína é uma bebida elaborada a partir do suco de caju clarificado e esterilizado no interior do recipiente, apresentando uma cor amarela âmbar, resultante da caramelização dos açúcares do próprio suco.

Segundo BRANDÃO et al.(2003), como a maioria dos frutos tropicais, o caju apresenta um alto grau de perecibilidade e elevados índices de perdas na produção. Por isso, diversas pesquisas têm sido feitas na área de conservação destes frutos. Entre os métodos de conservação pesquisados, a desidratação osmótica combinada com a solar vem ganhando interesse, especialmente em países onde existe produção em larga escala de frutas, açúcar a um custo razoavelmente baixo e uma alta incidência de raios solares durante todo o ano. O processo osmótico consiste na remoção parcial da água pelo uso da pressão osmótica, quando o produto entra em contato com uma solução concentrada de solutos. O pré-tratamento promove uma redução no tempo de secagem. A produção de alimentos de umidade intermediária é especialmente indicada para países em desenvolvimento pelo processamento mínimo que é requerido, juntamente com a estabilidade sob condições ambientais, economia de energia e baixo capital de investimento (MARQUES, 2006).

A “Food and Agriculture Organization (FAO)”, com base em 2010, tem mostrado que a comercialização mundial de produtos derivados de frutas cresceu mais de 5 vezes nos últimos quinze anos. Entre os países em desenvolvimento, o Brasil se destaca devido à maior produção, que está concentrada em um pequeno número de espécies frutíferas, as quais são cultivadas e processadas em larga escala.

2.2. Secagem

2.2.1. Secadores

O processo de secagem convectiva é um complexo processo térmico no qual as transferências de calor e massa ocorrem simultaneamente. Neste processo, o calor é transferido por convecção do ar quente para o produto, aumentando a temperatura tanto deste quanto da água nele contida na forma de umidade. A transferência de massa ocorre quando a umidade presente migra na forma de líquido e/ou vapor do interior do produto para a superfície em contato com o ar quente, pode a fase líquida evaporar-se no interior do produto ou na sua superfície, sendo transferido para o ar na forma de vapor de água. Este processo é fortemente influenciado pela temperatura, umidade relativa e velocidade da corrente de ar que circula ao redor do produto (STRUMILLO e KUDRA, 1989).

Quando um sólido está secando, ocorrem dois processos fundamentais e simultâneos: (1) calor é transferido para evaporar líquido; (2) massa é transferida como um líquido e/ou vapor de dentro do sólido e como um vapor na superfície. Os fatores que governam as taxas destes processos determinam a taxa de secagem (PERRY, 1973).

Segundo PERRY (1973), o mecanismo particular de controle, durante a secagem de um sólido, pode ser determinado por um estudo de gradientes de umidades internas. Também este autor classifica os sólidos em base de fluxo capilar e difusivo, onde no fluxo capilar o conteúdo de umidade que se move nos interstícios dos sólidos até a superfície, ou como conteúdo de umidade livre em cavidades da célula, move-se por gravidade; e a capilaridade, contanto que as passagens por fluxo contínuo estejam presentes. Em secagem, o fluxo líquido que é o resultado da capilaridade aplicada aos líquidos não contidos na solução e para conteúdos de umidades acima do ponto de saturação da fibra, como em tecidos, papel e couro, e para toda a umidade acima do conteúdo de umidade de equilíbrio para a saturação atmosférica, como em pós e sólidos granulares, como pigmentos de pintura, minerais, barro e areia.

Usualmente se estima as condições operacionais de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, para se obter o tempo necessário para finalizar a secagem. Parâmetros como velocidade, temperatura e umidade relativa do ar claramente influenciam a taxa de secagem, assim, um controle adequado das condições higrotérmicas é crucial ao sucesso do processo de secagem (KEEY, 1978).

KEEY(1972) define a secagem como a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido, isto é, a operação na qual a atividade de água de um alimento é diminuída pela remoção de água, através de sua vaporização. A água presente no sólido é chamada de teor de água; portanto, a secagem de interesse do estudo, é caracterizada pela evaporação da água do material biológico.

A secagem pode ser realizada de forma natural, ou seja, aquela em que o ar que promove a secagem do produto provém da ação dos ventos e a energia utilizada emana da incidência direta da energia solar; ou artificial, que consiste em submeter o produto à ação de uma corrente de ar, sob condições controladas de temperatura, umidade, velocidade e direção do fluxo de ar constante (SILVA, 2000).

A secagem artificial é uma operação relativamente cara; entretanto, apresenta uma série de vantagens com relação à secagem natural, como independência das condições climáticas, possibilidade de se estabelecer um programa de operação com mais facilidade; além disso, diminui o risco de deterioração dos alimentos em função do tempo de secagem ser menor (SOUSA, 1999).

A secagem é de vital importância para diferentes processos de produção. No setor agroindustrial a secagem de produtos tais como grão, sementes e alimentos em geral, reduz a atividade microbológica e outras reações que possam causar decomposição dos produtos, permitindo uma redução das perdas, um maior tempo de estocagem e menores custos com transporte (SILVA, 2000; LEON et al., 2002). Os grãos são considerados produtos capilares higroscópicos no qual os poros estão parcialmente cheios de líquido d'água e parcialmente cheio com mistura de ar e vapor de água. Durante o processo de secagem, a umidade evapora para a superfície que deixa o núcleo devido à diferença de pressão de vapor parcial entre o núcleo e o ar circunvizinho. A taxa na qual um núcleo de grão ou um berço de núcleos de grão perde umidade sob diferentes condições de secagem, e em diferentes tipos de secadores, é de grande importância no design de um secador (MOREIRA, 2002).

De forma similar aos grãos e sementes, na indústria madeireira, a secagem é a operação intermediária que mais contribui para agregar valor aos produtos manufaturados da madeira, eliminando os efeitos visuais como rachaduras, empenamentos, colapsos e manchas (JANKOWSKY e DUGATTI, 2001).

Operações comerciais de secagem podem utilizar transferência de calor por convecção, condução, radiação, ou uma combinação destes. Secadores industriais

diferem fundamentalmente pelos métodos de transferência de calor. Porém, independente do modo de transferência de calor, o calor tem que fluir da superfície exterior até o interior do sólido. A única exceção é a secagem dielétrica e microondas, na qual a alta frequência elétrica gera calor internamente e produz uma temperatura alta dentro do material e na superfície.

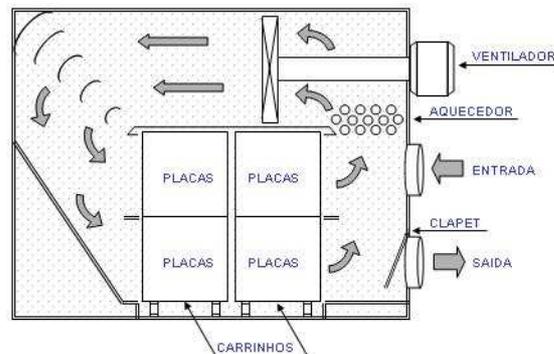


Figura 2.2. Método de secagem por batelada.

Segundo PERRY(1973), STRUMILLO e KUDRA(1989), MOREIRA(2002), dois grandes grupos são formados para classificar os métodos de secagem: o método de secagem descontínua, na qual o material é secado por batelada como mostra a Figura 2.2, e o método de secagem contínua, em que o material vai sendo secado a partir da entrada no secador e ao fim do trajeto é colocado para fora já seco, como mostrado na Figura 2.3.

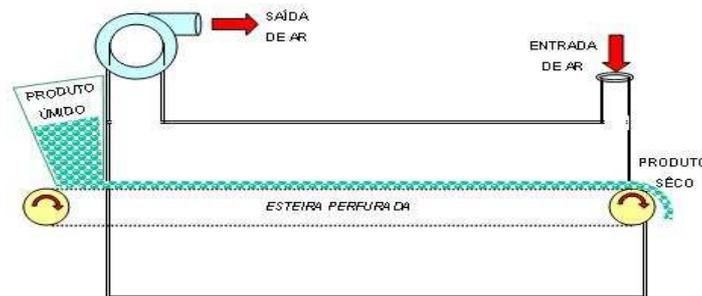


Figura 2.3. Método de secagem contínua.

Existem diversos dispositivos industriais de secagem que utilizam o método recém descrito. Entre outros, pode-se citar o secador tipo bandeja (Figura 2.4) no qual o material a ser secado é colocado sobre bandejas dispostas dentro de um gabinete de secagem em camadas relativamente finas (1 a 6 cm). Nesses secadores, o produto permanece estático durante a secagem e o ar aquecido é forçado a passar pela massa do produto. Este tipo de secador é constituído de uma câmara de secagem, no qual o ar é

insuflado por um ventilador. Eles possuem diversas vantagens por serem de configuração bastante simples, resultando num baixo custo de implantação, e são muito versáteis, uma vez que podem ser utilizados para a secagem de diferentes produtos alimentícios.

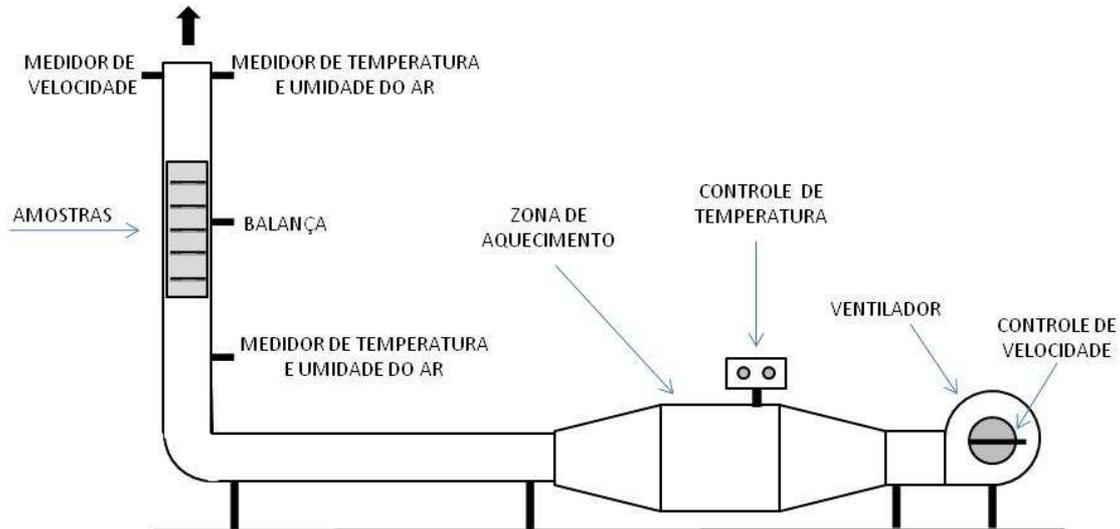


Figura 2.4. Bandeja típica contendo o material a ser secado por batelada.

Nos secadores de leito fixo, o ar de secagem movimenta-se da camada inferior para a superfície da massa do produto. A troca de umidade, que acontece entre o produto e o ar, ocorre em uma região denominada zona de secagem, a qual se move da camada inferior para a superfície da massa, conforme a secagem, dando origem a um gradiente de umidade, o qual não pode ser elevado por comprometer a qualidade do produto final (GOUVEIA, 1999). MOURA (2001) relata que os fatores que determinam o gradiente de umidade nos secadores de leito fixo são: o fluxo de ar, a espessura da camada da amostra e a temperatura de secagem. O gradiente será mais elevado quanto menor for o fluxo de ar e quanto maior for a temperatura de secagem e a espessura da camada do produto. Esses fatores também influenciam o consumo de energia e o tempo de secagem do produto.

O secador de esteira representa uma aplicação do método de secagem contínua. Neste secador o material a ser secado é transportado através de uma esteira feita de telas em aço inox ou pratos perfurados que se movem lentamente. Em secadores rotativos o material a ser secado entra em um tambor perfurado que gira constantemente para revirar o material, conforme Figura 2.5, enquanto que em secadores pneumáticos o material é pulverizado em contracorrente com o ar e é depositado ao fundo do secador.

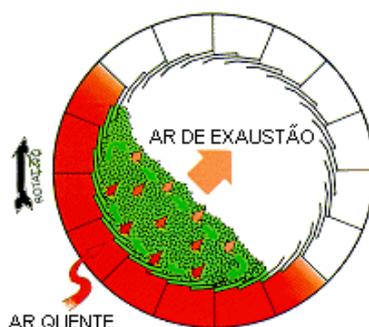


Figura 2.5. Secador rotativo.

Devido à extensa aplicação das técnicas de secagem e a sua importância em diferentes processos de fabricação, muitos estudos teóricos e experimentais sobre técnicas de secagem, efeito dos parâmetros envolvidos e sobre modelos matemáticos e numéricos para simulação do processo de secagem têm sido realizados e publicados na literatura.

Os autores LEON et al.(2002) apresentaram um estudo onde revisam os diferentes parâmetros usados para testar e avaliar os diferentes tipos de secadores solares para secagem de produtos alimentícios. Baseados nesse estudo os autores propõem uma metodologia de análise, as condições de ensaios e uma planilha de avaliação simples contendo os parâmetros mais significativos. Por sua vez, EL-SEBAII et al.(2002-a) realizaram um estudo experimental sobre um tipo de secador solar formado por uma câmara de secagem acoplada a um coletor tipo placa plana onde o ar é aquecido. O coletor é projetado para receber, abaixo da placa absorvedora, algum material que possa armazenar calor aumentado assim a capacidade de aquecimento do ar. Os ensaios experimentais foram conduzidos com e sem material de armazenamento de calor e para diferentes condições ambientais, registrando-se a radiação solar incidente, a temperatura e umidade relativa do ar ambiente, a temperatura na entrada e saída do aquecedor e a distribuição de temperatura em diferentes partes do sistema. Os mesmos autores, EL-SEBAII et al.(2002-b), propõem algumas correlações para a cinética da secagem baseados nesse mesmo estudo experimental.

Segundo MICHALEWICZ et al. (2008), a utilização da energia solar, tendo em vista a grande incidência solar no nordeste, apresenta-se como uma excelente alternativa técnica e econômica para a secagem de alimentos e outros produtos. O uso de secadores solares permite que o beneficiamento dos produtos possa ser feito com baixo capital inicial, além de exigir apenas um treinamento básico para sua operação. As pesquisas atuais são direcionadas no sentido de se construir um secador que possa aproveitar o

máximo à energia solar incidente e que ao mesmo tempo acumule parte dessa energia para secagens noturnas. A secagem solar é provavelmente o mais antigo método de preservação alimentar, no entanto, ele tem vários inconvenientes, como a dificuldade de controlar a taxa de secagem, infestação de inseto e a contaminação microbiana. Por outro lado as características do ar de secagem em secadores solares dependem das condições ambientes, o que pode reduzir a qualidade do produto final (MÜHLBAUER et al., 1993). Trocando a secagem solar por secagem artificial pode-se reduzir significativamente esses inconvenientes e os prejuízos causados por eles (SILVA, 2000). No entanto, a secagem artificial exige custos operacionais mais elevados, o que pode ser inviável para algumas aplicações (LEON et al., 2002). Neste contexto, surge a necessidade de se avaliar e comparar as secagens diretas e indiretas e utilizando fluxo de ar natural e forçado (Figura 2.6).

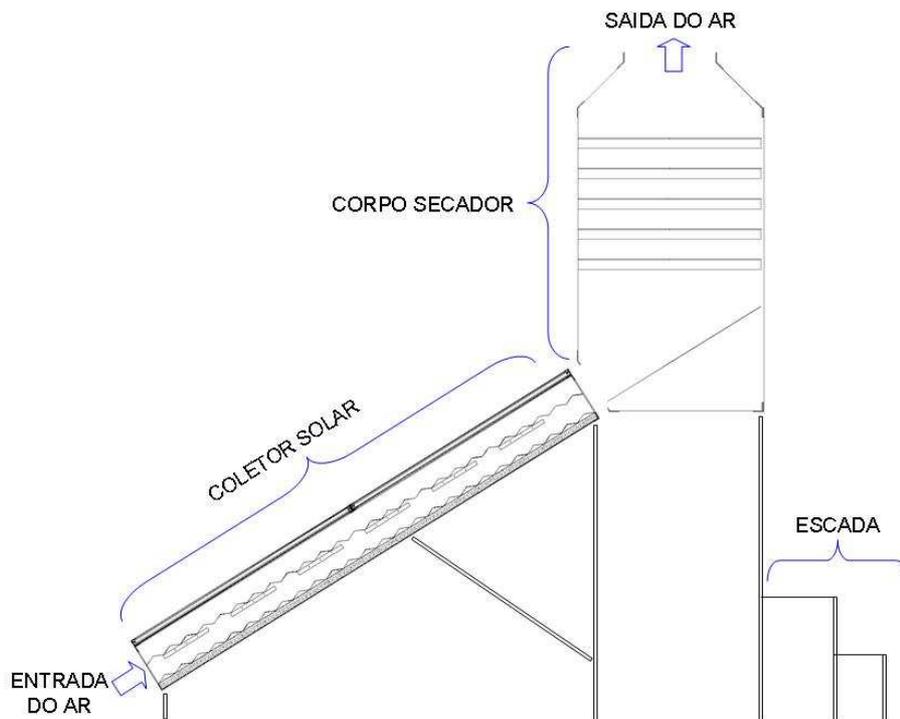


Figura 2.6. Secador solar para secagem direta e indireta

Os autores GLOUANNEC et al. (2002) também desenvolveram um estudo experimental onde usam tecnologia de energia radiante para o processo de secagem. Foi utilizado um protótipo de forno onde a secagem é regulada por mecanismos de convecção, radiação térmica e radiação de microondas. BRAUN et al. (2002) estudaram a utilização de bombas de calor para aquecer o ar num secador de roupas. O sistema

funciona conforme um ciclo Brayton invertido e consistem de um compressor, recuperadores de calor, expensor e uma câmara de secagem. É levantada a eficiência térmica do sistema e compara-se com o sistema convencional que utiliza aquecimento elétrico.

Como mencionado, a secagem de frutas é uma forma de conservação praticada desde a antiguidade. O processo visa à redução da atividade de água do alimento a qual está relacionada intimamente com a sua estabilidade física, química e microbiológica; outro objetivo da secagem de frutas é a significativa redução em volume e peso, o que promove maior facilidade no transporte e armazenamento do produto alimentício.

Inúmeros estudos têm sido conduzidos para analisar o fenômeno de transferência de calor e massa durante o processo de secagem. Diversos autores consideram as condições externas do ar sobre o processo, e outros consideram as condições internas ao produto, com ênfase aos mecanismos de movimento de umidade e seus efeitos sobre o mesmo. Devido à sua grande importância, vários modelos matemáticos têm sido propostos para descrever a redução de umidade durante a secagem de sólidos; contudo, são escassos os trabalhos que incorporam os fenômenos simultâneos de transporte de calor e massa, em uma abordagem concentrada (modelos empíricos e semi-empíricos), segundo Lima et al., citados por MARQUES (2006).

2.2.2. Aspectos fundamentais da secagem

O processo de secagem é um complexo processo de retirada de umidade do interior de um sólido através dos mecanismos de transferência de calor e massa. Neste processo, o calor é transferido por convecção do ar quente para o produto, aumentando a temperatura tanto deste quanto da água nele contido na forma de umidade. A transferência de massa ocorre quando o conteúdo de umidade presente migra na forma de líquido ou vapor do interior do produto para a superfície em contato com o ar quente e então se evapora, sendo transferido para o ar na forma de vapor de água. Esta depende da estrutura porosa do material e é também fortemente influenciado pela temperatura e velocidade da corrente de ar que circula ao redor do produto (STRUMILLO e KUDRA, 1989). A Figura 2.7 mostra um desenho esquemático do processo de secagem numa placa.

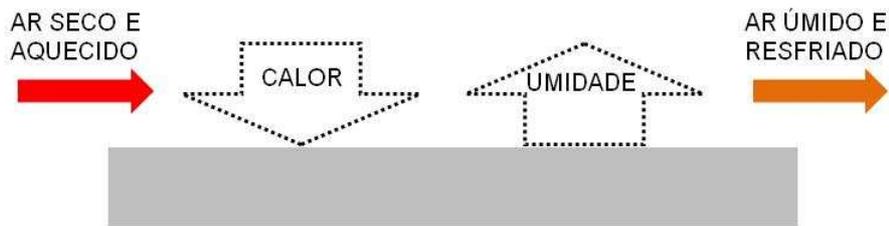


Figura 2.7. Princípio da transferência de calor e massa.

Para melhor se compreender esse processo é importante ter o conhecimento das formas de armazenamento do fluido no interior do sólido, do efeito das tensões viscosas que existem num fluido armazenado num meio poroso, e dos mecanismos de movimentação do fluido no interior de um sólido que está sendo submetido um processo de secagem.

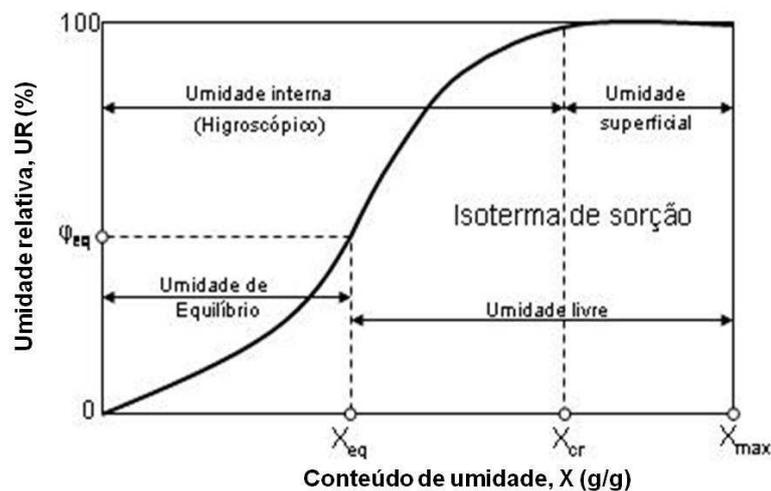


Figura 2.8. Isoterma de sorção e conteúdos de umidade de um material.

De acordo com KEEY (1972) a umidade contida num sólido que vai ser submetido a um processo de secagem pode ser entendida pela observação da Figura 2.8, que representa uma curva da isoterma de sorção, para certo material que relaciona o estado do conteúdo de umidade de equilíbrio, para uma dada temperatura, em função da umidade relativa.

Dentre os diversos valores de umidade que foram ensaiados para a obtenção dessa curva, estão o X_{eq} , X_{cr} e o X_{max} . O primeiro representa o conteúdo de umidade de equilíbrio, que corresponde à umidade que o material a ser secado atingirá, em função das condições ambientais a que ele está submetido. O segundo representa o conteúdo de

umidade não superficial que o sólido pode absorver. E o terceiro é o conteúdo de umidade superficial.

Olhando a Figura 2.8, observa-se que esses valores delimitam faixas de conteúdo umidade com características importantes no processo de secagem. A faixa correspondente à umidade X_{max} , contém a umidade que se chama de superficial, de fácil extração, e cuja pressão de vapor é idêntica à da água pura na mesma temperatura. O grau de dificuldade na remoção da umidade aumenta com valores menores do que X_{cr} , tornando-se muito mais difícil para valores menores do que X_{eq} . Isto porque para valores compreendidos entre X_{eq} e X_{cr} , a umidade está contida nos poros, onde é mais difícil remover devido a pressões de vapor maiores que a da água pura, à mesma temperatura, como se verá adiante. A umidade abaixo da umidade de equilíbrio, já apresenta mais dificuldade na sua extração e, além disso, pode estar na forma líquida nos espaços intramoleculares e contidas na composição da própria molécula do material, como é o caso da gipsita, o que torna o processo de extração bem mais difícil, porque requer temperaturas acima daquelas durante a umidade livre.

De acordo com UGULINO (2007), Lewis em 1921, introduziu o conceito de teor de água de equilíbrio na secagem, relacionando a taxa de secagem com o teor de água livre, ou seja, o conteúdo total de teor de água menos o teor de água de equilíbrio. O teor de água de equilíbrio pode ser interpretado como sendo o conteúdo de água que este apresenta quando a pressão de vapor de água em sua superfície se iguala à pressão de vapor de água no ar que o envolve.

O teor de água de equilíbrio é particularmente importante na secagem visto que ele representa o valor limite para uma condição de umidade relativa e temperatura. Se o alimento for secado até um conteúdo de água menor, que normalmente possui quando em equilíbrio com o ambiente, ele retornará ao seu equilíbrio na estocagem ou manipulação, se precauções não forem tomadas (CÁNOVAS e MERCADO, 1996).

LABUZA et al. (1972) relatam que uma característica fundamental de materiais biológicos que influencia todo o aspecto de manuseio, estocagem, processamento e consumo de produtos alimentares, é sua higroscopicidade que, segundo o pesquisador, é a relação existente entre a água e outros compostos de um produto. Sendo assim, a maior ou menor intensidade com que a água se liga ao alimento pode ser expressa pela chamada atividade de água (a_w), que pode ser definida como a relação entre a pressão do vapor de água no ar e a pressão de vapor de água no ar saturado, medidas a mesma temperatura. Reações químicas e atividade microbológica são diretamente controladas

pela atividade de água; deste modo, é necessário o conhecimento de isotermas de sorção que descrevam satisfatoriamente este comportamento (LABUZA, 1980).

Do ponto de vista da cinética de secagem, de um modo geral, os materiais apresentam duas ou mais fases distintas de secagem, uma que ocorre a taxa de evaporação constante, e nas demais a taxa de evaporação é decrescente, apresentando ainda uma fase anterior a estas que é chamada de período de indução (KEEY, 1972).

Quando um material úmido entra em contato com uma corrente de ar aquecida com temperatura, velocidade e umidade constantes, o comportamento da secagem pode ser representado pela Figura 2.9.

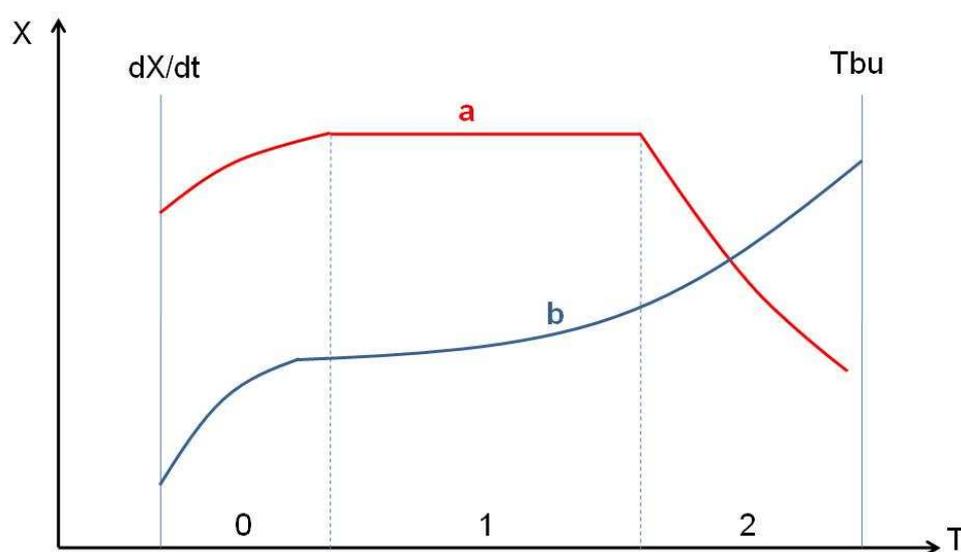


Figura 2.9. Evolução no tempo do conteúdo de umidade, da temperatura e da taxa de secagem, para um ar com propriedade constante.

A curva “a” mostra que no início da secagem o produto estando geralmente a uma temperatura mais baixa que o ar de secagem, ocorre um período de indução, representado pela região “0”. À medida que a temperatura do sólido se eleva, esta imprime uma elevação na taxa de secagem, que continua até que a transferência de calor seja igual a energia necessária para evaporar a água (transferência de massa). Passando para a região “1”, período de taxa constante de secagem, tem-se que a quantidade de água livre no produto é bem grande, sendo a pressão de vapor de água na superfície do produto constante, e sua temperatura igual à temperatura de bulbo úmido. Este período permanece enquanto a migração de água do interior do produto seja suficiente para compensar a perda por evaporação na superfície. Quando a quantidade de água na superfície diminui e conseqüentemente ocasiona um decréscimo na taxa de secagem,

tem-se início da região “2” que descreve o período de taxa decrescente de secagem. Na transição entre a região “1” e “2” tem-se o valor do conteúdo de umidade do produto, denominado de umidade crítica (X_c). Como a transferência de calor não é mais compensada pela transferência de massa, ocorre uma elevação da temperatura do produto (curva b), e esta tende assintoticamente para a temperatura do ar. Neste período o fator limitante é a migração interna de água. A redução da taxa de secagem é mais frequentemente interpretada pela diminuição da pressão parcial de vapor de água na superfície.

2.2.2.1. Período de secagem a taxa constante

Neste período os fatores que governam a secagem são as transferências de calor e massa na interface ar-produto, que são interpretadas por um fenômeno de camada limite. Esta camada pode ser definida como uma fina camada de ar em escoamento laminar ao redor da partícula. Este período é raramente observado na secagem de materiais biológicos, e pode ser detectado apenas sob condições especiais de processo (NOGUEIRA, 1991).

2.2.2.2. Período de secagem a taxa decrescente

Este período é quase sempre o único observado para secagem de produtos agrícolas e alimentícios, sendo que a migração interna de água é quem determina a taxa de secagem. Esta transferência interna de massa é influenciada pela migração de solutos e por sua deformação. No período de taxa decrescente a migração de água por difusão normalmente utilizada, é a baseada na segunda lei de Fick.

Segundo CHIRIFE (1981), os principais mecanismos de transporte durante o período de taxa decrescente são: Difusão líquida; Escoamento capilar e Difusão de vapor.

Segundo SANTIN (1996), no período de secagem decrescente, geralmente o único observado para os produtos biológicos, o comportamento da secagem é fixado pela migração interna de umidade. Os diferentes mecanismos de secagem que governam o deslocamento da água são:

- Movimento de líquidos devido às forças superficiais (difusão capilar);

- Movimento de líquido devido a diferenças na concentração de umidade (difusão líquida);
- Movimento de líquidos devido à difusão de umidade na superfície dos poros (difusão de superfície);
- Movimento de vapor devido a diferenças de concentração de vapor (difusão de vapor);
- Movimento de vapor devido a diferenças de temperatura (difusão térmica);
- Movimento de água e de vapor devido a diferenças de pressão total (fluxo hidrodinâmico).

Estas transferências internas de massa são influenciadas por dois fenômenos importantes para os produtos biológicos: migração de solutos e deformação, pois os produtos biológicos frequentemente se retraem no decorrer da secagem.

Em sólidos amorfos, as curvas de secagem mostram o primeiro período de taxa decrescente muito reduzido, e a maior parte do processo é controlada pela difusão do líquido em razão de terminarem em valores elevados do teor crítico de umidade (FOUST, 1982). Segundo OKADA (1997), cada mecanismo pode predominar em um dado período do processo de secagem. Os mecanismos mais comuns ou que predominam sobre os demais são os de difusão para os materiais amorfos, e de capilaridade para os materiais porosos.

2.2.3. Encolhimento

A secagem de produtos agrícolas com alto teor de umidade inicial, como é o caso do caju, é acompanhada de um encolhimento bastante significativo, pelo qual o material sofre alterações em suas dimensões e sua forma original. Este fenômeno, pelas características marcantes, deve estar previsto na modelagem, com vistas a se obter melhor representação física do processo de secagem e maior confiabilidade nos coeficientes determinados, como o coeficiente de difusão (QUEIROZ, 1994)

Os autores VAGENAS e MARINOS-KOURIS (1991b), ao estudarem a secagem de damasco, propuseram encolhimento linear proporcional à variação do teor de umidade. Consideraram variação nas três dimensões, porém, supondo material isotrópico, ou seja, o coeficiente de encolhimento linear era o mesmo nas três direções. BALABAN (1989) testou a influência do encolhimento nos problemas de difusão de calor e massa, desenvolvendo modelos com e sem a consideração de encolhimento. Por simplicidade, assumiu um decréscimo linear da dimensão com o teor de umidade,

alertando, porém, que quando esta correlação fosse não-linear, poderia ser facilmente incorporada ao modelo. Definiu funções que expressavam o grau de encolhimento e repetiu os cálculos com diferentes níveis de encolhimento máximo: 70%, 50% e 30% do original. Para a solução numérica, utilizou o método de diferenças finitas centrais com grade variável, resultante das equações de diferenças finitas centrais levemente modificadas para contemplar distâncias entre os nós variáveis e desiguais. Após cada passo de tempo, a distância entre os nós era ajustada de acordo com o teor de umidade médio daquela fatia. Comparando os resultados obtidos dos modelos com e sem consideração de encolhimento, concluiu que estes podem apresentar diferenças significativas nos valores estimados médios e locais do teor de umidade e da temperatura.

Os autores MULET et al. (1989) estudaram o processo de secagem de cenoura através de modelos com diferentes complexidades, considerando fronteira móvel ou fixa e difusividade constante ou dependente do teor de umidade e temperatura locais. O encolhimento foi representado por uma correlação linear entre o volume da amostra e seu teor de umidade médio. O problema de fronteira móvel foi resolvido explicitamente por um método de diferenças finitas, sendo a discretização das equações desenvolvida com base no conteúdo de matéria seca de cada sub-volume. SUAREZ e VIOLLAZ (1991), estudando a secagem de fatias de batata, incorporaram o fenômeno ao modelo, desenvolvendo a equação da difusão para corpos que sofrem encolhimento durante a secagem. A equação da difusão transformada apresentava um fator multiplicativo da derivada parcial do teor de umidade no espaço, que era função da densidade mássica do sólido totalmente seco, da densidade mássica da água e do teor de umidade. Este termo teve origem na consideração de aditividade de volume do sólido seco e da água, supondo encolhimento unidirecional. Além disso, consideraram que existe uma relação linear entre o teor de umidade e a metade da espessura da fatia, devido ao encolhimento.

FUSCO et al. (1991) estudaram o encolhimento nos modelos difusionais, considerando diferentes geometrias. Apresentaram uma boa revisão de literatura sobre estudos do encolhimento representado pelas relações de volume com o teor de umidade e, diferentemente dos demais, optaram por uma expressão que correlacionava estas duas propriedades através de uma função de terceiro grau. Obteve solução numérica pelo método de diferenças finitas, adotando uma malha fixa com a interface móvel, localizada no contorno do material. Em todas as geometrias estudadas, os modelos com encolhimento apresentaram melhores resultados.

BERTHET et al. (1992) desenvolveram um modelo difusional com evaporação na superfície do material, considerando encolhimento, ao analisarem a secagem de polímeros. Foi derivada uma expressão para o volume de uma membrana esférica em função da concentração local que levava em conta a aditividade do volume do esqueleto sólido e da umidade presente neste. A partir desta relação, calcularam o teor de umidade ao longo do raio como o produto da nova concentração pelo novo volume da membrana. Desta forma, conseguiram analisar a cinética da variação da dimensão ao longo do raio e do tempo e concluíram que o encolhimento ocorre primeiro em pontos próximos à superfície externa do material e leva algum tempo para acontecer no interior da esfera; este tempo será maior para posições mais próximas do centro da esfera.

Segundo UGULINO (2007), os sistemas alimentícios sólidos e semi-sólidos são altamente heterogêneos e podem ser considerados como consistindo de uma rede sólida tridimensional ou uma matriz usualmente com uma grande quantidade de água, na maioria dos casos uma solução aquosa. bio-polímeros são elementos estruturais comuns da matriz sólida. Em casos mais complexos a composição da estrutura é formada pela incorporação de elementos estruturais.

A particular estrutura do material e as características mecânicas dos elementos em equilíbrio definem o volume da amostra e determinam o seu tamanho e formato. Quando a água é removida do material, um desequilíbrio de pressão é produzido entre o interior do material e a pressão externa, gerando contração que leva o material a encolher ou entrar em colapso, mudando a forma e ocasionalmente produzindo rachaduras no produto. Esta é também uma das razões pela qual a secagem a vácuo e a liofilização promovem, em geral, um menor encolhimento.

De acordo com MAYOR e SERENO (2004) existem alguns fatores que afetam a magnitude do encolhimento durante os processos de desidratação tais como o volume de água removida, a mobilidade da matriz sólida, a taxa de secagem e as condições de processamento. O encolhimento de materiais biológicos aumenta com o aumento do volume de água removida, uma vez que, quanto maior a quantidade de água removida do material, maior serão as tensões de contração originadas no interior do mesmo.

Em alguns casos, o equilíbrio mecânico é alcançado quando o volume encolhido do material se iguala ao volume de água removida. Em outros casos, porém, o volume de água removido durante as fases finais de secagem é maior que a redução de volume da amostra. Tal fato pode ser explicado pela diminuição na mobilidade da matriz sólida do material a baixos conteúdos de umidade (UGULINO, 2007).

A descrição clássica do processo de secagem contempla a existência de dois períodos distintos: um primeiro período quando a superfície do material está saturada e a taxa de secagem é constante e um segundo período quando a difusão interna é importante e a taxa de secagem é decrescente. No período de taxa constante, a umidade no interior do material está presente essencialmente na forma líquida e a taxa de secagem é influenciada pelas condições externas. No entanto, esta descrição não é adequada à secagem de materiais deformáveis. A secagem deste tipo de material raramente apresenta um período de taxa de secagem constante (KATEKAWA, 2006)

Os autores MAY e PERRÉ (2002) demonstraram que a existência do período de taxa de secagem constante está condicionada a duas restrições: a pressão na superfície igual à pressão de saturação e uma área de transferência constante. Como durante a secagem de materiais deformáveis a segunda condição não é satisfeita, o período de taxa constante pode não ser observado. Os autores consideraram a redução do volume do material e, conseqüentemente, a redução de sua área superficial, e mostraram que a razão entre a taxa de secagem e a área superficial se mantém constante durante o primeiro período de secagem. Esta razão, que define a densidade de fluxo mássico de umidade, é dependente apenas das condições externas. Assim, a descrição do primeiro período de secagem utilizando o conceito de densidade de fluxo mássico constante é mais adequada. Com este resultado, os autores defendem fortemente a consideração do processo de encolhimento na modelagem da secagem de materiais deformáveis.

Conforme citado no trabalho de KATEKAWA (2006), à medida que o processo de secagem evolui e o teor de umidade diminui, o material se torna vítreo com uma menor mobilidade e a taxa de encolhimento é reduzida. A redução do volume do material não compensa a remoção de água e inicia-se a formação dos espaços “vazios” no interior da matriz sólida e o encolhimento é dito não ideal. Neste estágio, o transporte interno de umidade deixa de ser exclusivamente por escoamento líquido e outros mecanismos como a difusão pela fase gasosa começam a ocorrer. No decorrer da secagem, estes mecanismos se tornam dominantes.

A relação entre a taxa de encolhimento e a mobilidade da matriz sólida é frequentemente explicada através da teoria da temperatura de transição vítrea. Segundo esta teoria, o material não sofre encolhimento se o processo de secagem ocorre abaixo da temperatura de transição vítrea, quando ele apresenta comportamento vítreo. Em contrapartida, quanto maior for a temperatura do material durante a secagem em relação

à temperatura de transição vítrea, maior será o encolhimento, conforme citação de KATEKAWA (2006).

Segundo KATEKAWA (2006), diversas maneiras de levar em conta o encolhimento no modelo de secagem são encontradas na literatura. Como o encolhimento pode tornar o problema de secagem em um problema de fronteiras móveis, a maneira de levá-lo em conta traz consequências às técnicas de resolução do modelo proposto. A estratégia mais simples e mais frequente consiste em considerar que o encolhimento ocorre devido apenas à remoção de água líquida e formular uma expressão para uma ou mais dimensões materiais em função do teor de umidade, que pode ser puramente empírica ou possuir algum fundamento físico. Esta expressão é então utilizada para definir o domínio de resolução do modelo durante o processo simulado a cada instante de tempo, criando um efeito de malha computacional móvel. MAYOR e SERENO (2004) apresentam uma revisão da modelagem do encolhimento durante a secagem.

Diversos tipos de frutas já foram testados quanto à aptidão para o consumo na forma seca, algumas delas tradicionalmente consumidas em âmbito mundial, outras ainda a título experimental. Os conhecimentos obtidos com a secagem de frutas e vegetais, de forma geral, foram utilizados neste trabalho, já que alguns fatores condicionantes, como o encolhimento e elevado teor de umidade inicial apresentam metodologias de abordagem teóricas e experimentais bastante semelhantes.

2.3. Fundamentos da modelagem matemática

Existem métodos empíricos, teóricos e semi-empíricos para se descrever matematicamente o processo de secagem. O método empírico é utilizado para análise de secagem usando-se dados experimentais, que podem ser determinados em laboratório e na utilização da análise adimensional; geralmente, este método se baseia nas condições externas de secagem, não fornecendo indicações sobre o transporte de energia e massa no interior do produto, muito embora forneça informações práticas para elaboração de projetos (SILVA, 1995).

Vários autores vêm tentando estudar a influência das diferentes condições de processo nas mudanças de volume dos materiais durante a secagem. Na maioria dos casos, tal análise é realizada verificando o efeito de cada condição de processo como temperatura, velocidade do ar ou umidade relativa do ar. Infelizmente, os resultados

encontrados na literatura não trazem resultados que elucidem sobre a influência destas condições de processamento no encolhimento (UGULINO, 2007).

Inúmeros estudos vêm sendo conduzidos para se analisar o fenômeno de transferência de calor e massa durante o processo de secagem. Diversos autores consideram as condições externas do ar sobre o processo, enquanto outros levar em conta as condições internas do produto, com ênfase aos mecanismos de movimento de umidade e seus efeitos sobre o mesmo. Em razão de sua grande importância, alguns autores propuseram modelos matemáticos com o objetivo de descrever a redução de umidade durante a secagem de sólidos; contudo, informando que são escassos os trabalhos que incorporam os fenômenos simultâneos de transporte de calor e massa, em uma abordagem concentrada (modelos empíricos e semi-empíricos) (LIMA et al., 2004).

Uma revisão na literatura mostra que diversos estudos foram realizados considerando-se o encolhimento na secagem de materiais biológicos. UGULINO (2007) fizeram uma vasta revisão sobre os modelos de secagem que levam em consideração o encolhimento. De acordo com o autor os modelos dividem-se em dois grandes grupos:

- Modelos fundamentais (teóricos): os modelos fundamentais são baseados em interpretações físicas dos sistemas alimentícios estudados e tentam prever mudanças na geometria do material baseados nas leis da conservação de massa e volume.
- Modelos empíricos: os modelos empíricos consistem em aplicar um ajuste aos dados experimentais de encolhimento em função do conteúdo de umidade do material.

Em ambos os casos, os modelos se dividem em lineares e não lineares.

Nos estudos de KATEKAWA (2006), o primeiro passo no processo de modelagem é uma descrição verbal do sistema de interesse ou, como o autor o denomina, a construção do modelo conceitual. Este modelo conceitual é então traduzido no modelo matemático, que deve ser resolvido para a obtenção dos resultados desejados. A primeira parte do modelo conceitual consiste na descrição física do sistema, como dimensionalidade e composição. A segunda parte do modelo conceitual consiste no processo de transferência em si, desde a seleção das variáveis utilizadas até a escolha da formulação para a descrição do processo de secagem. Também segundo KATEKAWA (2006), ao se considerar a existência de duas ou mais fases, a aplicação das equações de balanço macroscópicas não pode ser direta, apesar de muitos autores

não considerarem esta restrição. A saída é muitas vezes, utilizar médias volumétricas das variáveis em um elemento representativo, que possibilita o tratamento do meio descontínuo como um continuum.

A tarefa de um método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes na equação por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Um método analítico que tivesse a habilidade de resolver tais equações permitiria obter a solução de forma fechada e calcular os valores das variáveis dependentes num nível infinitesimal, isto é, para um número infinito de pontos. Por outro lado, quando se decide fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, se aceita ter a solução num número discreto de pontos (vértices da malha), esperando que, quanto maior for este número de pontos, mais próxima da solução exata será a solução aproximada (ou numérica).

Numa simulação de um processo de secagem, é desejado estimar as condições operacionais de temperatura e umidade relativa do ar adequadamente, e o tempo necessário para alcançar a secagem requerida. Na maioria das vezes estas condições são determinadas de forma experimental, submetendo a amostra a um processo de secagem controlado, onde cada um dos parâmetros envolvidos, são monitorados e mantidos em condições similares àquelas que deverão ser encontrados num processo de grande escala.

PERRY (1973), através da Figura 2.10 apresenta uma curva característica típica da variação do conteúdo de umidade com o tempo, enquanto que a Figura 2.11 representa a variação da taxa de secagem com o conteúdo de umidade. Nelas podem-se observar quatro períodos diferentes. O primeiro, no intervalo AB, mostra uma taxa crescente durante o início do processo. O segundo, representado pelo trecho BC, mostra um período onde a taxa atinge seu valor máximo e é constante. O terceiro e quarto períodos, CE, e ED, respectivamente, mostram uma taxa que varia linearmente, e uma taxa que varia exponencialmente com o conteúdo de umidade.

Cada um destes períodos é dominado por mecanismos físicos diferentes cuja compreensão é essencial para uma adequada interpretação dos resultados experimentais e também para a implementação de modelos matemáticos que permitam simular numericamente o processo de secagem.

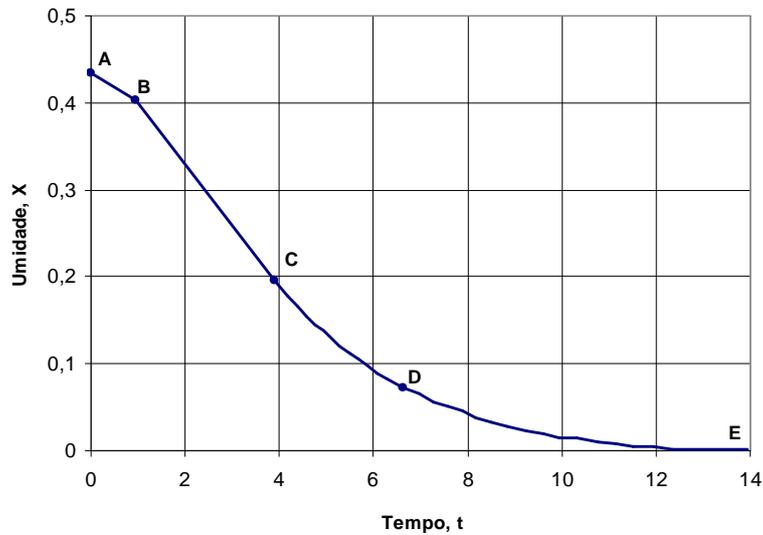


Figura 2.10. Curva umidade x tempo

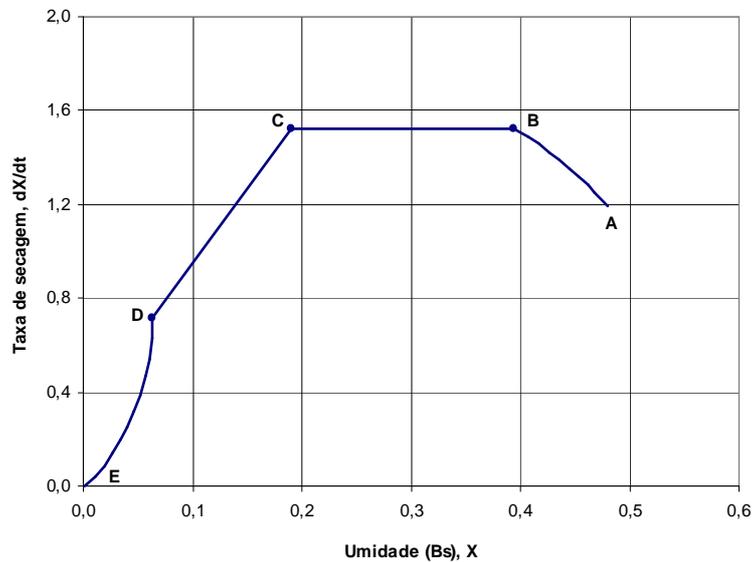


Figura 2.11. Taxa de secagem x umidade

Quando o calor para a evaporação no período de taxa constante, é fornecido por um gás aquecido, um equilíbrio dinâmico é estabelecido entre a taxa de transferência de calor para o material por convecção e a entalpia de vaporização. Esse balanço de energia dá a equação diferencial, Equação 2.1 abaixo, que permite calcular o valor da taxa do conteúdo de umidade durante esse período:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{h_m A \Delta T}{H_{fg}} \quad (2.1)$$

Segundo KEEY (1972) não existe uma teoria simples que abranja todos esses modos de movimentação e transferência de massa. Na prática o procedimento para a determinação de alguns parâmetros como condutividade, difusividade, e tempo de secagem, tem sido a escolha de um desses modelos para predizer esses parâmetros. Segundo PERRY (1973), do ponto de vista de projetos de secadores, pode-se considerar dois modelos principais, o modelo de difusão e o modelo de capilaridade.

Quando a difusão líquida controla a secagem no período de taxa variável, a equação diferencial para transferência de massa unidimensional para regime transitório, a Equação 2.2 é usada para descrever a taxa de umidade.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

A solução da equação diferencial acima pode ser obtida a través de uma série de Fourier e representada para valores médios de umidade. CRANK (1975) e BROOKER et al. (1992) apresentaram a solução analítica para materiais com geometria para placa plana infinita, dada pela Equação 2.3, com as seguintes condições de contorno:

$$X=X_0; t=0; 0 < y < L$$

$$X=X_e; y=L; t>0$$

$$\frac{\partial X}{\partial y} = 0; y=0; t>0$$

$$XR = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right) \quad (2.3)$$

onde, X_e é o conteúdo de umidade de equilíbrio com o ambiente, e X_0 é o conteúdo de umidade inicial e L representa o valor da metade da espessura da placa.

Para períodos longos de secagem, a equação da difusão pode ser simplificada através do truncamento da série no primeiro termo, conforme a Equação 2.4:

$$XR = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-D_{ef} t \left(\frac{\pi}{2d}\right)^2\right) \quad (2.4)$$

Partindo-se desta equação, e diferenciando-se esta em relação ao tempo, obtém-se a equação da taxa de secagem,

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{-\pi^2 D_{ef}}{4L^2} (X - X_{eq}) \quad (2.5)$$

Com a curva de velocidade de secagem é possível se obter o tempo necessário para secar um material, sob condições constantes de secagem, entre dois limites de umidade, a partir da expressão, conforme se vê na Equação 2.6, abaixo:

$$N = -\frac{dX}{dt} \quad (2.6)$$

A integração da Equação 2.7 permitirá o cálculo do tempo de secagem,

$$\int_0^t dt = \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{N} \quad (2.7)$$

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

Para este trabalho foi necessário a construção de um secador tipo bandeja, tomando como base o trabalho de dissertação de MICHALEWICZ (2003), que está instalado no Laboratório do GET, no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco em Recife. Para a obtenção dos dados necessários, o secador foi instrumentado com balança, anemômetro, termopares e termo-higrômetros.

No planejamento experimental foi considerado o arranjo de três condições em três parâmetros diferentes, como a temperatura e velocidade do ar de secagem e a espessura da amostra, resultando em 27 condições experimentais.

Para a obtenção dos valores de densidades do caju, úmido e seco, foi necessária a confecção de um picnômetro e a elaboração dos procedimentos de medição, a fim de ter confiabilidade nos resultados. Ao final de cada secagem, a amostra era submetida à medição de sua densidade. E para a análise do encolhimento, foi confeccionado um planilhímetro para se obter as áreas das amostras durante a secagem.

3.2. Descrição da bancada experimental

O secador consiste de quatro módulos básicos, conforme a Figura 3.1. O primeiro módulo que é o de fluxo, contém um ventilador com controle de velocidade através de um dumper instalado em sua entrada, o segundo módulo que é o de aquecimento, é composto por um conjunto de três resistências elétricas com 1 kW cada, responsável pelo aquecimento do ar de secagem vindo do primeiro módulo, o terceiro módulo que é o da equalização do ar de secagem, é composto por dutos e um laminador de ar, e o quarto e último módulo que é a área de testes, é composto por um medidor de temperatura e umidade do ar de secagem, uma janela de inspeção e uma bandeja onde são colocadas as amostras, e na saída contém um medidor de velocidade de ar.

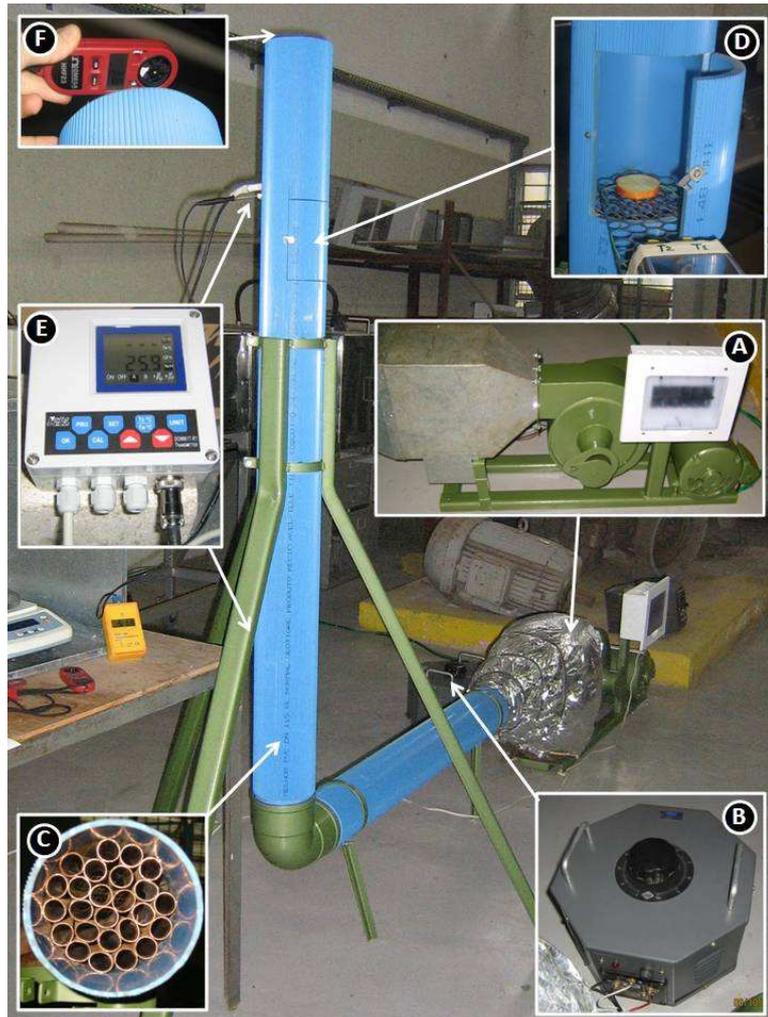


Figura 3.1. Detalhes do secador de bandeja: a) Ventilador e aquecedor de ar; b) Controle de temperatura; c) Laminador de ar; d) Área de teste; e) Termo-higrômetro; e f) Anemômetro.

O ventilador utilizado é do tipo centrífugo, montado em uma base, e acionado por um motor elétrico trifásico de 1,5 CV, Figura 3.2, e alimentado por um quadro elétrico geral, Figura 3.3.



Figura 3.2. Conjunto moto-ventilador



Figura 3.3. Quadro elétrico de comando

Na entrada do ventilador está instalado um dumper tipo “faca” que controla a vazão de ar do secador, e está identificada com as devidas vazões utilizadas nos experimentos, conforme mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4. Dumper de controle da vazão do ar de secagem



Figura 3.5. Laminador de ar

A zona de aquecimento é composta de um conjunto contendo três resistências de 1 kW cada, na qual o controle da temperatura é feito através de um variador de tensão, ligado à resistência elétrica R2 (central), conforme Figuras 3.6 e 3.7, respectivamente. O conjunto é isolado com mantas de lã de rocha com 5 cm de espessura.



Figura 3.6. Conjunto de resistências com 3 kW totais



Figura 3.7. Variador de tensão

O ar de secagem ao passar pelo conjunto de resistências percorre os dutos até chegar à área de secagem, onde se localizam as amostras. Antes que o ar chegue às amostras, ele ainda atravessa um laminador para ar, garantindo a sua uniformidade, Figura 3.5.



Figura 3.8. Área de testes



Figura 3.9. Bocal de saída

Na ultima parte do secador, que consiste da área testes, Figura 3.8, e do bocal de saída do ar utilizado na secagem, Figura 3.9. Pode-se observar que existe uma malha de proteção anterior a área de testes.

Para a instrumentalização do secador, foram instalados internamente dois termo-higrômetros, para obter dados de temperatura e umidade do ar, antes e após as amostras, como mostra a Figura 3.10, e externamente ao secador foi utilizado um termo-higrômetro portátil, para o acompanhamento da temperatura e umidade do ar ambiente, Figura 3.11. Ambos da marca Delta Ohm, modelo DO9861T, precisão de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1$, para a temperatura e $0,1\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}/^{\circ}\text{C}$.



Figura 3.10. Termo-higrômetro interno.



Figura 3.11. Termo-higrômetro externo.

As medições das velocidades do ar foram obtidas através de medições realizadas no bocal de saída do secador, utilizando-se um anemômetro de “rotor” da marca Omega e modelo HHF23, e precisão de $0,1\text{ m/s} \pm 3\%$, conforme Figura 3.12. Estas velocidades

eram posteriormente recalculadas para a área de testes onde se encontravam as amostras.



Figura 3.12. Anemômetro, para medições de velocidade do ar.

O acompanhamento da perda de massa das amostras foi obtido através de leituras constantes compassadas durante todo o processo de secagem, através de uma balança semi-analítica com precisão de 0,01g, conforme Figura 3.13.

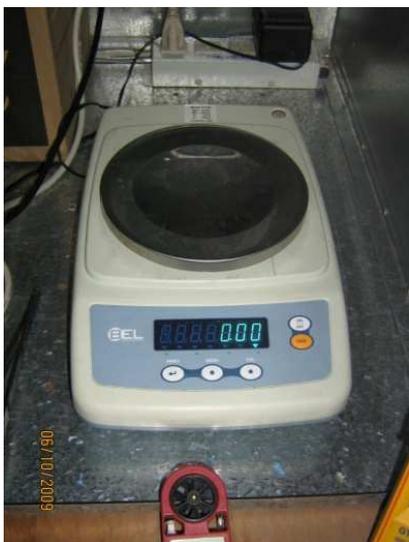


Figura 3.13. Balança semi-analítica.



Figura 3.14. Logger com 2 canais.

Foram levantadas as temperaturas internas do caju no decorrer da secagem, utilizando-se um logger com dois canais, Figura 3.14, da marca MINIPA, modelo MT-600, com precisão de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1\%$, através de termopares tipo K. O posicionamento dos termopares dentro das amostras se deu uma no centro e outro na extremidade, conforme Figura 3.15. Estes termopares foram calibrados conforme citado no Anexo A.

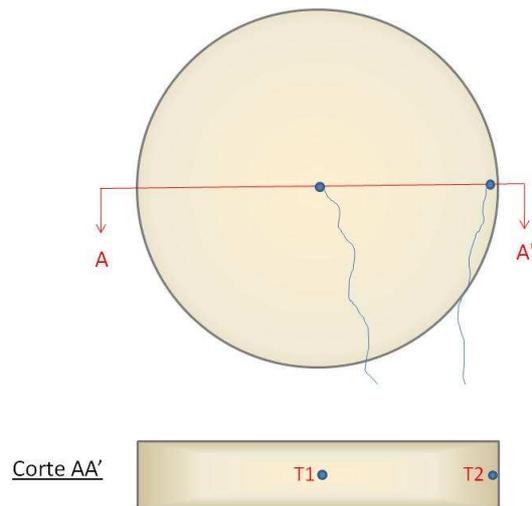


Figura 3.15. Posicionamento dos termopares no interior da amostra

Foi construído um planilhmetro, para registrar o encolhimento do caju durante a secagem, confeccionado em cantoneiras de alumínio e composto por uma base contendo uma placa com três coordenadas milimetradas, e uma barra superior para a fixação da máquina fotográfica da marca Toshiba, modelo PDR-M60, com foco constante, conforme Figura 3.16.



Figura 3.16. Detalhe da máquina fotográfica no planilhmetro.

3.3. Metodologia dos ensaios

A importância das variáveis em um processo pode ser determinada através da adoção de um método de planejamento experimental, o qual possibilita o planejamento e execução do experimento de forma organizada, com um número de ensaios reduzidos ao mínimo necessário. Este método permite, ainda, a verificação dos efeitos individuais e de interação de todas as variáveis sobre a resposta, a definição das variáveis mais

importantes para o processo, a avaliação dos erros experimentais e de regressão, e a modelagem empírica dos resultados em função das variáveis escolhidas, através de programas estatísticos de regressão. Os ensaios foram realizados em 27 condições, variando-se as temperaturas do ar de secagem em 60, 70 e 80 °C, as velocidades do ar em 3, 4, e 5 m/s, e as espessuras das fatias em 4, 7 e 10 x 10⁻³ m. Cujas faixas foram consideradas seguindo diversos trabalhos encontrados na literatura para secagem de frutas e vegetais.

Os cajus foram adquiridos no mercado local (CEASA-Recife-PE), sendo utilizados os maduros, cuja castanha exibiu a coloração cinza-castanha e o pedúnculo completamente vermelho. Foram descartados os cajus que apresentavam injúria física, conforme AZOUBEL (2002).

Os cajus foram lavados em água corrente e posteriormente foram descontaminados com água clorada a 50 ppm por 10 minutos. Após esta operação foram descastanhados manualmente e cortados conforme os experimentos. Para os experimentos no secador tipo bandeja, os cajus foram cortados em rodelas de 4, 7 e 10 x 10⁻³ m de espessura, e cuja casca foi mantida. Para que se tivesse um corte com espessura precisa e uniforme foi confeccionado um cortador em aço inoxidável com lâminas ajustáveis para as diversas espessuras, conforme Figuras 3.17. Antes do corte, era escolhida a região do caju que tivesse um diâmetro próximo a 0,05 m, conforme a Figura 3.18, cujo diâmetro era achado com a utilização de um paquímetro.



Figura 3.17. Cortador de caju com lâminas ajustáveis.

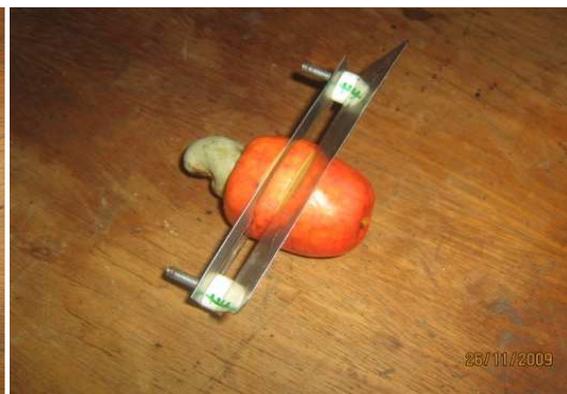


Figura 3.18. Caju sendo cortado.

Considerou-se como final de secagem, quando o ultimo algarismo lido na balança semi-analítica, não mais variasse. Na qual esta foi a massa de equilíbrio da amostra, para uma determinada característica do ar de secagem.

O valor da massa seca, foi determinado através de uma balança termogravimétrica, marca GEHAKA, modelo IV2000, Figura 3.19. A quantidade de umidade considerada foi uma média obtida experimentalmente na balança termogravimétrica, e cujo valor foi confirmado com a literatura atual, TACO (2006). Foram realizados 10 experimentos para obter a massa seca do material que resultou um teor de umidade médio de 88%, na qual foi tomado como valor inicial de todas as amostras usadas em todos os experimentos.



Figura 3.19. Balança termogravimétrica

As amostras foram postas em uma bandeja de tela tipo “belinox”, nas dimensões de 83 x 300 mm, onde uma parte ficou para dentro do secador na área de testes e a outra para o lado de fora, suportando o logger de temperatura, conforme Figura 3.20. A cada 20 minutos este conjunto foi retirado para ser pesado na balança.



Figura 3.20. Detalhe da fixação da bandeja na área de testes

A velocidade do ar de secagem foi medida na saída do secador conforme o ponto A da Figura 3.21. Com os valores observados no anemômetro no ponto A, para cada velocidade, obteve-se uma vazão real deste ponto, chamado Q (ponto A). Como a vazão no ponto A é a mesma no ponto B, dividindo pela área livre calculada no ponto B, obteve-se a verdadeira velocidade do ar de secagem.

A área de testes utilizada tinha um diâmetro de 0,11 m e as amostras ensaiadas, em média tinham um diâmetro de 0,05 m, ou seja, as amostras ocupavam grande parte da área de testes. Com esta observação, foram necessários cálculos pontuais das novas velocidades de ar, devido a dois fatores, primeiro que a própria velocidade varia durante o processo de secagem e segundo é que a mostra encolhe. Com isto observou-se, por exemplo, que para uma velocidade de 5 m/s, medido pelo anemômetro, a velocidade do ar que passa pela amostra no início da secagem ficou em torno de 7,4 m/s e que com o encolhimento da amostra no final da secagem chegou ao valor de 5,7 m/s.

As velocidades de 3, 4 e 5 m/s, citadas até o presente momento são apenas de referência, nas quais daqui por diante apenas serão referenciadas as médias das velocidades reais de cada experimento.

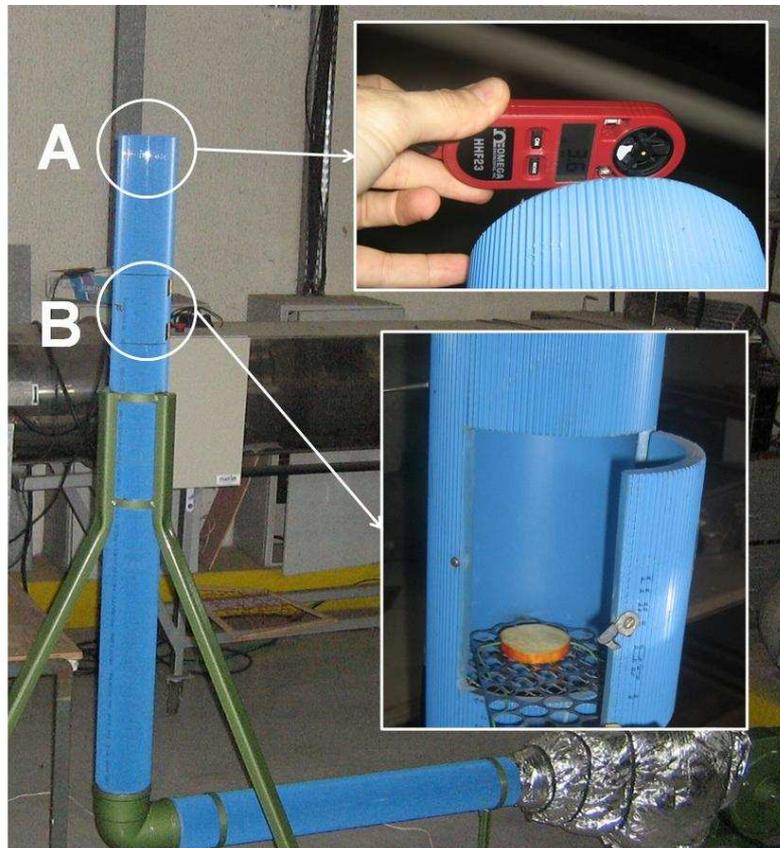


Figura 3.21. Detalhe dos pontos de medição da velocidade do ar de secagem.

Segundo MACHADO (2009), a composição físico-química do pedúnculo varia largamente em função da variedade, do estágio de maturação, do tamanho, da duração da colheita e de variações ambientais, regionais, entre outros fatores. Essas mudanças ocorrem durante a pós-colheita e estão diretamente relacionadas com o metabolismo oxidativo decorrente da respiração celular que está intimamente associada às mudanças de qualidade, desordens fisiológicas, tempo de vida útil, maturidade, manejo e tratamentos pós-colheita. Partindo desta consideração, alguns experimentos foram refeitos para verificar a repetibilidade do processo de secagem em fatias triplicadas em três condições experimentais aleatórias.

A repetibilidade representa o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas, de uma mesma grandeza, efetuadas nas mesmas condições, método de medição, observador, instrumento de medida, local, condições de utilização e em intervalo de tempo curto entre medições. A repetibilidade pode ser expressa quantitativamente em termos de parâmetros estatísticos de dispersão de resultados, principalmente a amplitude, o desvio padrão e o coeficiente de variação percentual.

Na Tabela 3.1, apresenta-se um comparativo do conteúdo de umidade das amostras que foram secas utilizando uma temperatura média de 80 °C, velocidade média de 6,3 m/s, e espessura de 0,007 m, com seus desvios padrões e coeficientes de variação. E na Figura 3.22, as três repetições desta mesma condição.

Tabela 3.1. Desvio padrão da repetibilidade experimental do conteúdo de umidade, para temp. média de 80 °C, velocidade média de 6,3 m/s, e espessura de 0,007 m.

Tempo (s)	Temp.=80,9 °C Vel.=5,9 m/s	Temp.=81,5 °C Vel.=6,5 m/s	Temp.=80,6 °C Vel.=6,5 m/s	Média	Desv.Pad	Coef.Var
0	7,33	7,33	7,33	7,33	0,00	0,00
1200	3,88	4,19	4,86	4,31	0,50	11,69
2400	2,22	2,44	2,40	2,35	0,12	5,04
3600	1,26	1,31	1,34	1,30	0,04	3,16
4800	0,61	0,61	0,64	0,62	0,02	2,87
6000	0,23	0,34	0,38	0,32	0,08	24,75
7200	0,13	0,28	0,31	0,24	0,09	38,83
8400	0,09	0,24	0,28	0,20	0,10	50,09
9600	0,06	0,21	0,27	0,18	0,11	60,19
10800	0,05	0,20	0,25	0,17	0,10	61,26
12000	0,05	0,18	0,24	0,16	0,10	64,38
13200	0,03	0,18	0,24	0,15	0,11	71,14
14400	0,03	0,18	0,24	0,15	0,11	74,41
15600	0,03	0,17	0,24	0,14	0,11	74,90
16800	0,03	0,16	0,24	0,14	0,11	75,48
18000	0,02	0,16	0,24	0,14	0,11	80,01

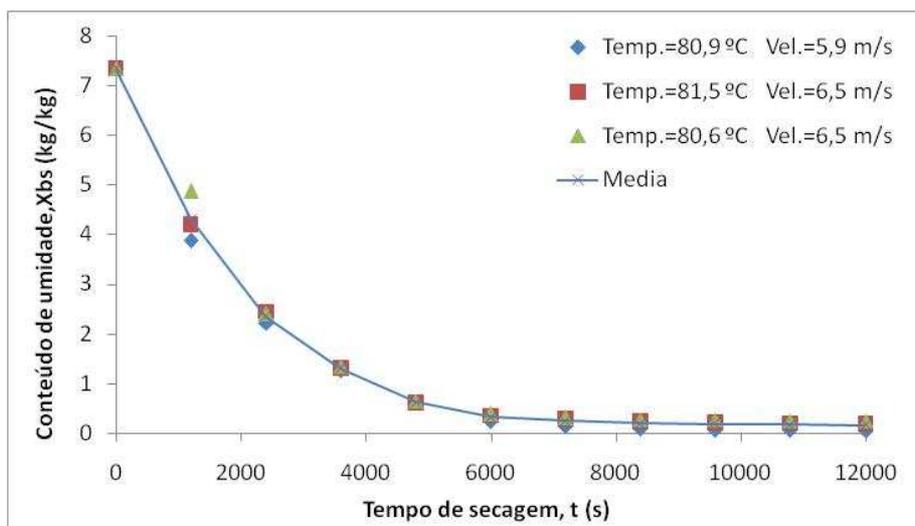


Figura 3.22. Repetibilidade experimental, para temperatura média de 80 °C, velocidade média de 6,3 m/s, e espessura de 0,007 m.

Na Tabela 3.1, percebe-se que para conteúdos de umidades menores da amostra, isto é, final da secagem, o coeficiente de variação chegou a 80,01%, devido a massa inicial do primeiro experimento ($T=80,9\text{ °C}$ e $V=5,9\text{ m/s}$) ter sido inferior aos demais, na ordem de 1,5 e 0,9 g, em relação ao segundo e terceiro experimentos respectivamente.

Na Tabela 3.2, apresenta-se um comparativo do conteúdo de umidade das amostras que foram secas utilizando uma temperatura média de 70 °C, velocidade média de 5 m/s, e espessura de 0,007 m, com seus desvios padrões e coeficientes de variação. E na Figura 3.23, as três repetições desta mesma condição.

Tabela 3.2. Desvio padrão da repetibilidade experimental do conteúdo de umidade, para temp. média de 70 °C, velocidade média de 5 m/s, e espessura de 0,007 m.

Tempo (s)	Temp.=72,6 °C Vel.=5,2 m/s	Temp.=70,5 °C Vel.=4,9 m/s	Temp.=69,6 °C Vel.=4,9 m/s	Média	Desv.Pad	Coef.Var
0	7,33	7,33	7,33	7,33	0,00	0,00
1200	4,08	4,78	4,83	4,56	0,42	9,16
2400	2,66	3,36	3,25	3,09	0,38	12,30
3600	1,71	2,19	2,03	1,98	0,25	12,54
4800	1,06	1,38	1,25	1,23	0,16	13,22
6000	0,65	0,84	0,65	0,71	0,11	15,88
7200	0,44	0,48	0,27	0,40	0,11	28,56
8400	0,36	0,33	0,13	0,27	0,12	44,93
9600	0,31	0,27	0,09	0,22	0,12	53,10
10800	0,27	0,23	0,05	0,18	0,11	61,94
12000	0,26	0,22	0,05	0,18	0,11	61,43
13200	0,26	0,19	0,05	0,17	0,11	66,12
14400	0,26	0,19	0,04	0,16	0,12	70,13
15600	0,26	0,19	0,04	0,16	0,12	70,13

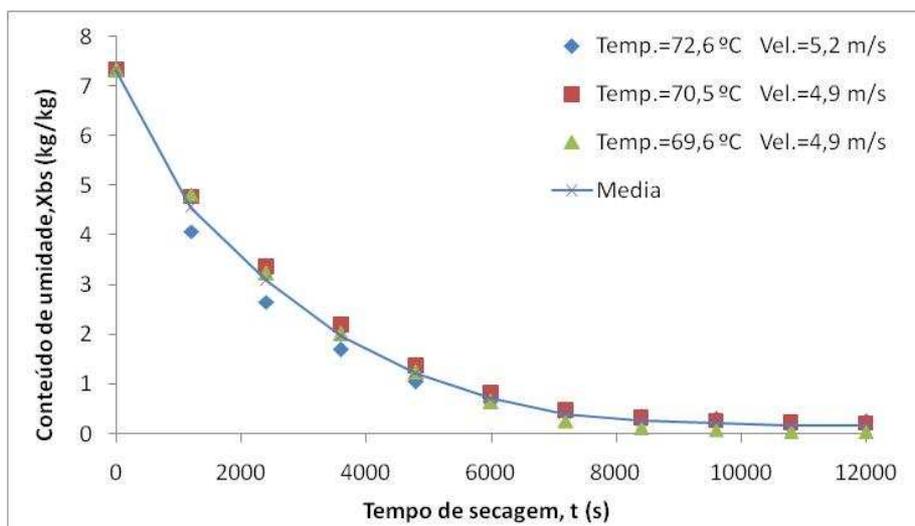


Figura 3.23. Repetibilidade experimental, para temperatura média de 70 °C, velocidade média de 5 m/s, e espessura de 0,007 m.

Na Tabela 3.2, percebe-se que para conteúdos de umidades baixos, no final da secagem, o coeficiente de variação chegou a 70,13%, devido a massa inicial e a temperatura no primeiro experimento ($T=72,6\text{ °C}$ e $V=5,2\text{ m/s}$) ter sido superior aos demais. Como também, o terceiro experimento ($T=69,6\text{ °C}$ e $V=4,9\text{ m/s}$) apresentar uma massa inicial bem inferior aos demais; da seguinte forma, 13,3, 10,1 e 9,7 g, respectivamente.

Tabela 3.3-Desvio padrão da repetibilidade experimental do conteúdo de umidade, para temp. média de 80 °C, velocidade média de 4,1 m/s, e espessura de 0,010 m.

Tempo (s)	Temp.=79,9 °C Vel.=3,9 m/s	Temp.=81,7 °C Vel.=4,2 m/s	Temp.=80,9 °C Vel.=4,2 m/s	Média	Desv.Pad	Coef.Var
0	7,33	7,33	7,33	7,33	0,00	0,00
1200	5,15	5,57	5,58	5,44	0,25	4,51
2400	3,91	4,21	4,21	4,11	0,18	4,30
3600	2,94	3,19	3,18	3,10	0,14	4,48
4800	2,14	2,39	2,38	2,30	0,14	6,14
6000	1,53	1,70	1,69	1,64	0,09	5,69
7200	1,01	1,06	1,05	1,04	0,03	2,45
8400	0,64	0,68	0,67	0,66	0,02	3,35
9600	0,37	0,40	0,39	0,39	0,02	5,18
10800	0,23	0,23	0,22	0,22	0,01	2,29
12000	0,15	0,15	0,14	0,15	0,01	3,43
13200	0,12	0,11	0,11	0,11	0,00	2,58
14400	0,10	0,09	0,08	0,09	0,01	7,87
15600	0,09	0,07	0,08	0,08	0,01	15,29
16800	0,08	0,06	0,09	0,07	0,02	21,80
18000	0,07	0,05	0,05	0,06	0,01	17,34
19200	0,07	0,04	0,04	0,05	0,01	25,72
20400	0,06	0,04	0,04	0,04	0,01	26,54
21600	0,05	0,03	0,04	0,04	0,01	26,22

Na Tabela 3.3, apresenta-se um comparativo do conteúdo de umidade das amostras que foram secas utilizando uma temperatura média de 80 °C, velocidade média de 4,1 m/s, e espessura de 0,010 m, com seus desvios padrões e coeficientes de variação. E na Figura 3.24, as três repetições desta mesma condição.

Também na Tabela 3.3, percebe-se também que para conteúdos de umidades menores da amostra, isto é final da secagem, o coeficiente de variação chegou a 26,22%, bem inferior aos apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2. Isto se deu, devido à massa inicial das três amostras ensaiadas, terem valores muito próximos, como também suas temperaturas e velocidades médias.

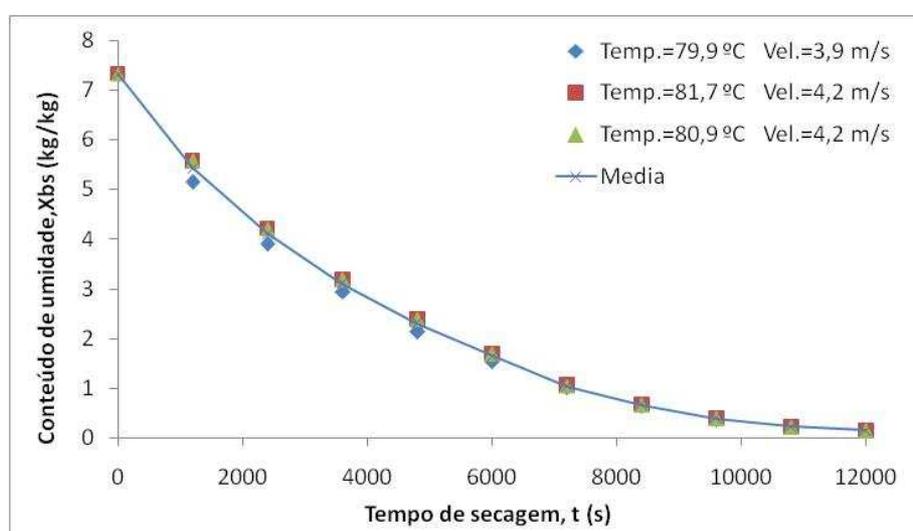


Figura 3.24. Repetibilidade experimental, para temperatura média de 80 °C, velocidade média de 4,1 m/s, e espessura de 0,010 m.

Considerando que as análises realizadas neste trabalho foram qualitativas, e na faixa da curva da secagem decrescente, no início da secagem, assumiu-se que um único experimento para cada condição seria suficiente para representar a secagem do pseudofruto do caju.

3.4. Resultados experimentais

Os dados experimentais deste trabalho foram adquiridos a uma frequência de 20 minutos do começo ao fim dos experimentos. No estudo dos efeitos das principais variáveis do processo, os dados são apresentados na forma adimensional. Para obter o conteúdo de umidade foram utilizados os dados da perda de massa, registrados pela balança semi-analítica e a massa seca do caju em base seca, através da seguinte Eq.3.1.

$$Xbs = \frac{(m_{Total} - m_{seca})}{m_{seca}} \quad (3.1)$$

As Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6, apresentamos resultados dos conteúdos de umidades em função do tempo secagem, para as espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m, respectivamente. Observa-se que o tempo de secagem varia de acordo com as condições do ar de secagem. Cada coluna contém as temperaturas e velocidade médias do ar de secagem, para cada experimento. Na Tabela 3.4 a temperatura variou em três faixas de 61,1 a 62,3, de 69,7 a 71,6 e de 80,9 a 81,3 °C, como também as velocidades, de 3,6 a 3,7, de 4,9 a 5,2 e 5,7 a 6,4 m/s, para os experimentos com 0,004 m de espessura.

Tabela 3.4-Conteúdo de umidade das amostras de caju com 0,004 m de espessura.

TEMPO (s)	T=81,3 °C V=6,4 m/s E=0,004 m	T=71,6 °C V=5,7 m/s E=0,004 m	T=61,1 °C V=6,4 m/s E=0,004 m	T=80,9 °C V=4,9 m/s E=0,004 m	T=69,7 °C V=5,2 m/s E=0,004 m	T=61,5 °C V=4,9 m/s E=0,004 m	T=81,3 °C V=3,6 m/s E=0,004 m	T=71,1 °C V=3,7 m/s E=0,004 m	T=62,3 °C V=3,6 m/s E=0,004 m
0	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33
1200	1,36	2,16	3,13	2,44	4,34	3,36	2,57	3,98	3,55
2400	0,09	0,44	1,75	0,63	2,37	1,31	0,70	2,10	1,79
3600	0,04	0,12	0,77	0,13	1,06	0,61	0,18	0,80	0,74
4800	0,04	0,06	0,31	0,06	0,48	0,33	0,12	0,29	0,28
6000	0,03	0,03	0,13	0,04	0,34	0,15	0,08	0,14	0,14
7200		0,03	0,14	0,03	0,30	0,12	0,07	0,13	0,10
8400		0,03	0,12		0,28	0,12	0,05	0,10	0,07
9600		0,01	0,09		0,27	0,08		0,09	0,05
10800			0,08		0,25	0,07		0,09	0,04
12000					0,25			0,07	
13200					0,24				

Tabela 3.5-Conteúdo de umidade das amostras de caju com 0,007 m de espessura.

TEMPO (s)	T=80,9 °C V=5,9 m/s E=0,007 m	T=72,5 °C V=6,1 m/s E=0,007 m	T=61,5 °C V=6,0 m/s E=0,007 m	T=81,7 °C V=5,1 m/s E=0,007 m	T=72,6 °C V=5,2 m/s E=0,007 m	T=61,8 °C V=5,0 m/s E=0,007 m	T=80,9 °C V=3,5 m/s E=0,007 m	T=70,6 °C V=3,7 m/s E=0,007 m	T=61,5 °C V=3,6 m/s E=0,007 m
0	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33
1200	3,88	4,48	5,20	4,15	4,08	4,82	4,48	4,81	4,82
2400	2,22	2,82	3,95	2,35	2,66	3,36	3,15	3,35	3,48
3600	1,26	1,64	3,00	1,22	1,71	2,34	2,15	2,29	2,62
4800	0,61	0,79	2,25	0,59	1,06	1,57	1,41	1,52	1,88
6000	0,23	0,28	1,64	0,31	0,65	1,01	0,88	0,95	1,29
7200	0,13	0,13	1,16	0,20	0,44	0,63	0,54	0,58	0,85
8400	0,09	0,08	0,80	0,17	0,36	0,38	0,32	0,35	0,52
9600	0,06	0,08	0,55	0,15	0,31	0,24	0,20	0,23	0,33
10800	0,05	0,07	0,40	0,13	0,27	0,18	0,22	0,20	0,23
12000	0,05	0,06	0,33	0,13	0,26	0,15	0,12	0,16	0,17
13200	0,03	0,05	0,31	0,12		0,11	0,10	0,15	0,16
14400	0,03	0,03	0,29			0,11	0,08	0,14	0,12
15600		0,03	0,27			0,09	0,07	0,13	0,11
16800			0,24				0,07	0,13	0,09
18000							0,06	0,11	0,08
19200							0,05		0,07

Na Tabela 3.5 para 0,007 m de espessura e na Tabela 3.6 para 0,010 m de espessura, pode-se observar que a média das três faixas de temperatura foram 61,6, 71,9

e 81,2, e 61,6, 70,7 e 80,7, respectivamente. Da mesma forma, observam-se as velocidades do ar que foram 3,6, 5,1 e 6,0, e 3,9, 5,1 e 6,5, respectivamente.

Tabela 3.6-Conteúdo de umidade das amostras de caju com 0,010 m de espessura.

TEMPO (s)	T=80,0 °C V=6,7 m/s E=0,010 m	T=69,4 °C V=6,5 m/s E=0,010 m	T=60,5 °C V=6,2 m/s E=0,010 m	T=82,3 °C V=5,0 m/s E=0,010 m	T=71,1 °C V=5,0 m/s E=0,010 m	T=62,8 °C V=5,2 m/s E=0,010 m	T=79,9 °C V=3,9 m/s E=0,010 m	T=71,7 °C V=3,6 m/s E=0,010 m	T=61,5 °C V=4,1 m/s E=0,010 m
0	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33
1200	5,43	5,55	5,57	5,88	5,38	5,62	5,15	5,39	6,07
2400	4,08	4,36	4,59	4,38	4,24	4,69	3,91	4,10	5,09
3600	3,08	3,48	3,82	3,18	3,35	3,94	2,94	3,12	4,32
4800	2,22	2,76	3,18	2,22	2,63	3,24	2,14	2,34	3,69
6000	1,58	2,19	2,65	1,58	2,01	2,56	1,53	1,73	3,20
7200	1,07	1,70	2,21	0,97	1,50	2,26	1,01	1,25	2,74
8400	0,69	1,26	1,86	0,59	1,10	1,87	0,64	0,85	2,33
9600	0,42	0,91	1,54	0,28	0,77	1,52	0,37	0,57	2,00
10800	0,25	0,61	1,28	0,14	0,54	1,22	0,23	0,38	1,70
12000	0,16	0,38	1,05	0,08	0,35	0,95	0,15	0,25	1,44
13200	0,12	0,23	0,84	0,06	0,23	0,76	0,12	0,17	1,20
14400	0,09	0,16	0,67	0,05	0,15	0,54	0,10	0,15	1,02
15600	0,08	0,11	0,52	0,04	0,11	0,37	0,09	0,12	0,87
16800	0,06	0,10	0,41	0,03	0,08	0,26	0,08	0,11	0,74
18000	0,04	0,08	0,33	0,03	0,07	0,17	0,07	0,10	0,62
19200	0,03	0,08	0,26	0,03	0,05	0,12	0,07	0,08	0,56
20400	0,02	0,07	0,22	0,03	0,04	0,10	0,06	0,07	0,49
21600		0,06	0,19	0,02	0,03	0,08	0,05	0,07	0,45
22800		0,05	0,17	0,02	0,03	0,07	0,05	0,06	0,41
24000		0,05	0,16		0,02	0,06	0,05	0,05	0,38
25200			0,15		0,02	0,05	0,04	0,04	0,36
26400			0,15			0,05		0,03	0,35
27600			0,13			0,04			0,34
28800			0,12			0,04			0,33
30000									0,32

Considerações sobre algumas escolhas metodológicas

Pelos resultados das tabelas acima, observa-se que em espessuras diferentes têm-se curvas de secagem diferentes, onde alguns secaram muito mais rápido do que outros. O intervalo de tempo adotado entre uma amostragem e outra, foi o mesmo para todos os experimentos, como dito anteriormente. Porém, nos experimentos com espessuras menores, especialmente em temperaturas mais elevadas, apresentaram poucas informações da cinética de secagem, e que para aumentar essa quantidade de informações Com isto, verificou-se que neste trabalho, poderia ter sido investigado, para cada espessura, o intervalo de tempo apropriado.

Outra coisa a observar, é quanto ao teor de umidade inicial das amostras. Baseados em dados da literatura, encontrou-se valores médios para teores de umidades iniciais. Esses valores foram adotados em todos os experimentos. Como se pode

observar nos gráficos que se seguem, em vários experimentos ocorreram discrepâncias entre o que seria esperado, e o que foi registrado no experimento.

Parte das discrepâncias observadas pôde ser justificada pela não determinação do teor de umidade inicial em cada amostra. A relação área/volume é outro fator que pode explicar algumas dessas divergências. Por último, depois de uma análise dos dados gerados, concluiu-se que poderia ter sido feito estudos da estrutura fibrosa de cada amostra, haja vista que foram utilizados nos experimentos, diversos tipos de caju com estruturas fibrosas diferentes podem apresentar curvas de secagem de secagem diferentes para amostras dimensionalmente iguais, e idênticas condições de secagem. Isto também pode explicar parte das discrepâncias encontradas. A dificuldade de aquisição dessa fruta inviabilizou a possibilidade de se repetir os experimentos, com as modificações metodológicas descritas acima e do tratamento de dados mais acurados, pois as discrepâncias só foram percebidas no final da tese, quando foi feito um tratamento dos dados mais acurado. Mesmo assim, acreditou-se ter ainda um bom material, que permitiu um bom estudo numérico-experimental da cinética secagem do caju.

Apresentação Gráfica dos Resultados

a) Nas Figuras 3.25 a 3.33, estão apresentados os gráficos do conteúdo de umidade em função do tempo de secagem, construídos com os dados das Tabelas 3.4 a 3.6, e que mostram a influência que a temperatura do ar de secagem tem na perda de umidade das fatias de caju.

As Figuras 3.25 a 3.27 apresentam as curvas da perda de umidade das fatias de caju, para espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m respectivamente, onde para cada espessura fixou-se a velocidade e variou-se a temperatura do ar de secagem. As velocidades médias do ar de secagem para as três espessuras ficaram em torno de 6,2, 6,0 e 6,5 m/s, respectivamente. Dificuldades experimentais, não permitiram obter velocidades exatamente iguais, porém as obtidas estão muito próximas.

Na Figura 3.25, as temperaturas médias do ar para as três curvas apresentadas foram $61,1 \pm 0,8$, $71,6 \pm 0,5$ e $81,3 \pm 1,1$ °C.

Observando-se os experimentos graficados na Figura 3.25, vê-se que as amostras secaram de forma semelhante. As secagens feitas com as temperaturas do ar mais altas foram mais rápidas, como era esperado, do que a de temperatura mais baixa, porém não de uma forma discrepante.

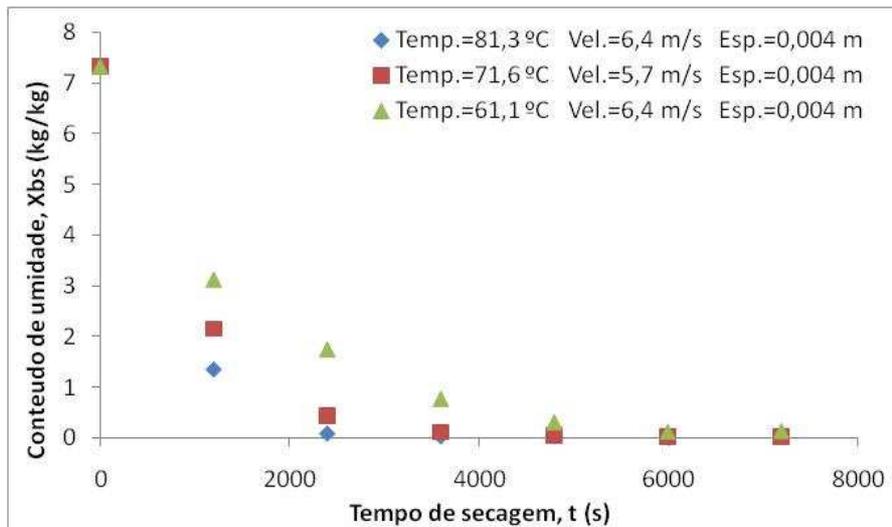


Figura 3.25. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 6,2 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,004m de espessura.

Na Figura 3.26, observa-se que a curva para 72,5 °C aparece bem próxima da de 80,9 °C, do que a amostra secada a 61,5 °C, indicando que as duas primeiras secaram mais rápido. Em parte isso se deveu às temperaturas mais altas. O experimento de temperatura mais baixa se diferenciou dos outros dois, tendo um tempo total de secagem muito maior. Sua curva poderia ter caído mais próxima da amostra que secou a 72,5 °C. Isto pode ter acontecido pelo uso de uma amostra de caju de estrutura fibrosa diferente, que causou maior dificuldade à movimentação da água no interior das amostras, ou, uma amostra cujo fruto teria um teor de umidade mais alto do que o das outras duas.

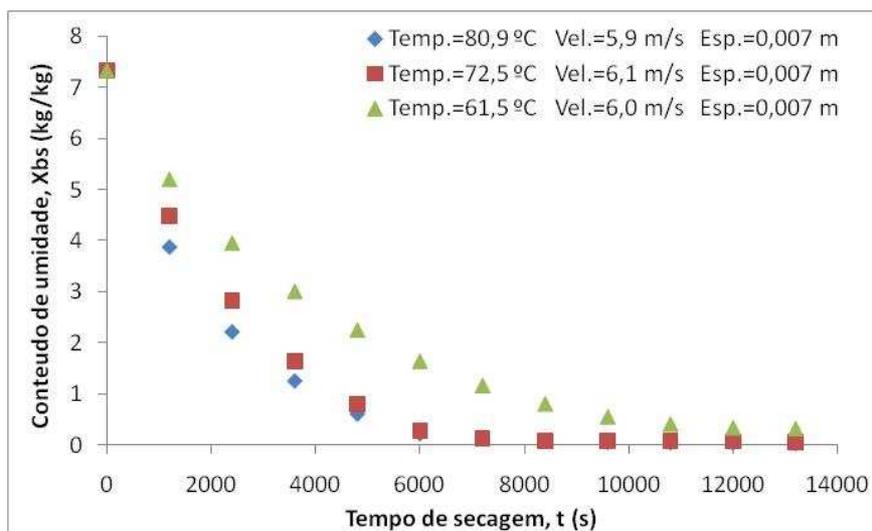


Figura 3.26. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 6,0 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,007m de espessura.

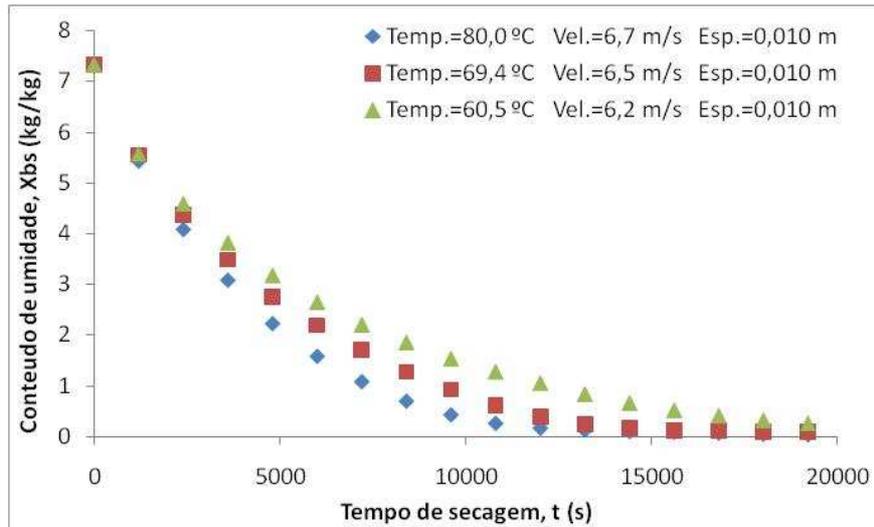


Figura 3.27. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 6,5 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,010m de espessura.

O comportamento das secagens, apresentado na Figura 3.27, se encontram dentro do esperado, observa-se que com temperaturas maiores a secagem será mais rápida. A amostra cuja temperatura de secagem foi de 80,0 °C secou mais rápido que as outras duas.

As Figuras 3.28 a 3.30 apresentam as curvas de secagem para os mesmos tipos de amostras (espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m), conservando a mesma variação de temperatura, e mantendo fixa a velocidade em uma faixa menor. Nelas, as velocidades médias do ar de secagem aparecem com valores em torno de 5,0, 5,1 e 5,1 m/s, respectivamente.

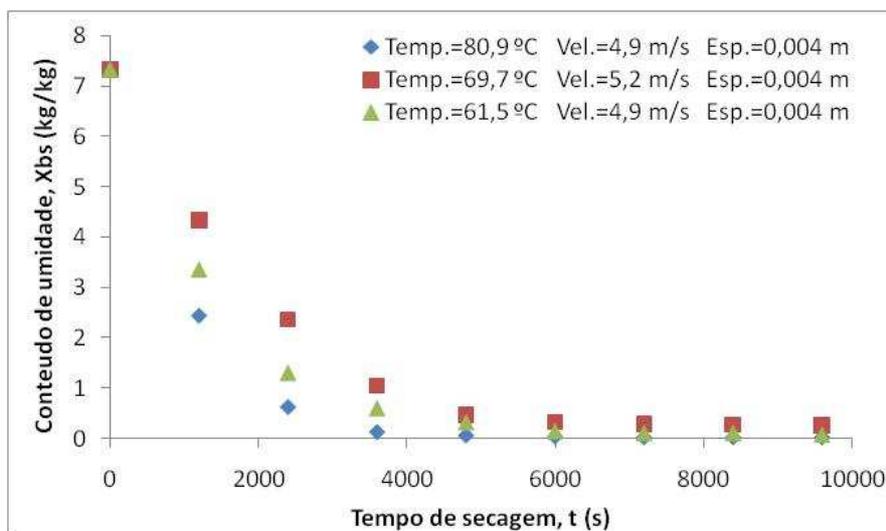


Figura 3.28. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 5,0 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,004m de espessura.

Na Figura 3.28 observa-se que a curva do experimento com 69,7 °C de temperatura apresenta-se acima a de 61,5 °C secou mais lentamente. Esperava-se que acontecesse o contrario, pois se as amostras eram geometricamente iguais, as que tivessem maior temperatura deveriam secar mais rápido. Conforme já mencionado anteriormente, esta discrepância pode ser explicada pela diferença de umidades iniciais das amostras, e/ou a estruturas fibrosas diferentes. Isto pode ter acontecido, devido à necessidade de garantir amostras de geometrias tão iguais quanto possíveis, aliado ao grande número de experimentos, o que fez com que muitos ensaios fossem feitos com amostras iguais, de tipos de caju diferentes, de pés diferentes, e até de locais diferentes. Estes possíveis problemas só foram percebidos quanto à sua importância, na fase final de tratamento dos dados.

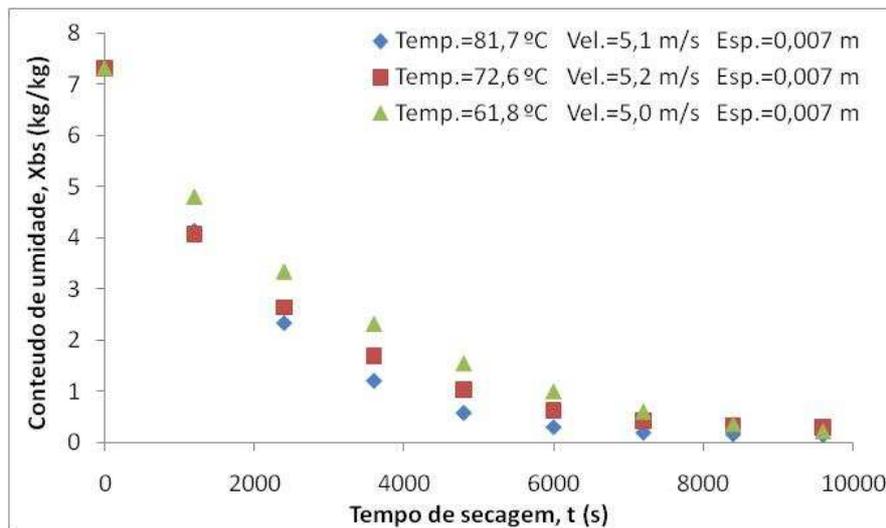


Figura 3.29. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 5,0 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,007m de espessura.

Na Figura 3.29, as temperaturas médias ficaram em torno de $61,7 \pm 1,0$, $72,6 \pm 0,4$ e $81,7 \pm 0,8$ °C, o experimento com temperatura do ar de 72,6 °C teve a taxa de secagem próxima a de 81,7 °C no início do processo mantendo-se diferente no restante do processo. Pode-se supor que a umidade inicial das duas estiveram bem próximas, porém a diferença no resto do processo de secagem se deve a diferença de temperatura. Em relação a isto a amostra de temperatura mais baixa seca mais lentamente, como esperado, num padrão diferente das outras duas, podendo ter sido uma amostra de estrutura fibrosa diferente.

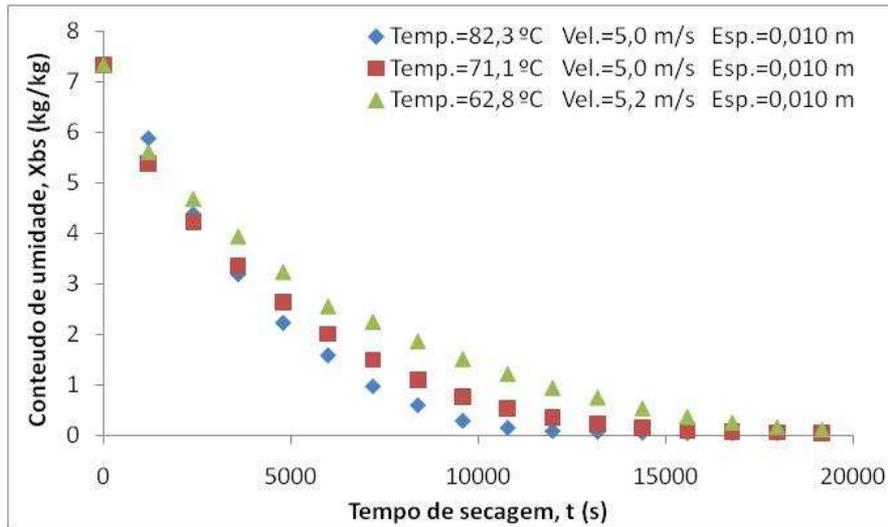


Figura 3.30. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 5,1 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,010m de espessura.

Na Figura 3.30, o comportamento apresentado pelas curvas para amostras com espessuras maiores, se encontram dentro do esperado a partir de 4000 segundos, e que no início da secagem a amostra com temperatura 82,3 °C apresentou uma taxa de secagem menor que a das outras amostras. Isto pode ser explicado pelo teor de umidade inicial diferente das demais amostras.

As Figuras 3.31 a 3.33 apresentam a perda de umidade das fatias de caju, para espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m e velocidades médias do ar em torno de 3,6, 3,6 e 3,8 m/s respectivamente.

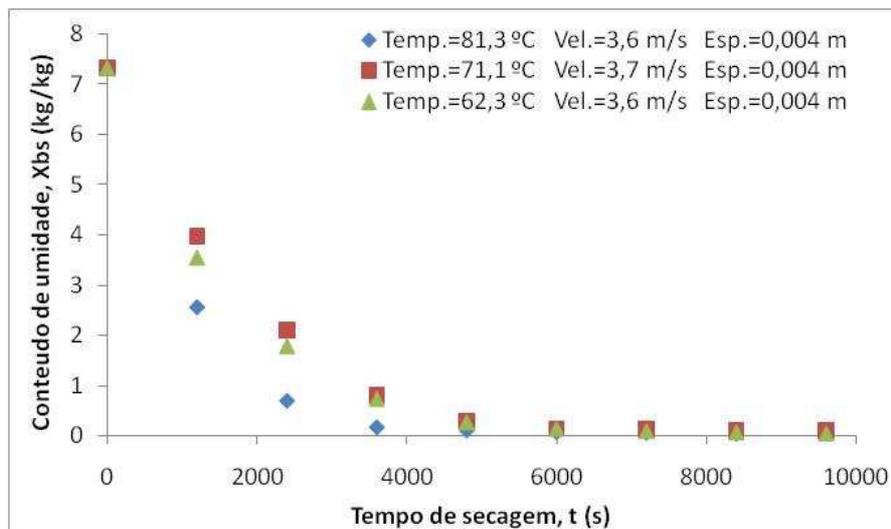


Figura 3.31. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 3,6 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,004m de espessura.

Na Figura 3.31 observa-se que a curva do experimento com 71,1 °C de temperatura apresenta-se acima a de 62,3 °C, o que não era de se esperar. Esperava-se que o experimento com 71,1 °C secasse mais rápido. Conforme já mencionado anteriormente, esta discrepância pode ser explicada pela diferença de umidades iniciais das duas amostras. A curva com temperatura 81,3 °C secou mais rápido.

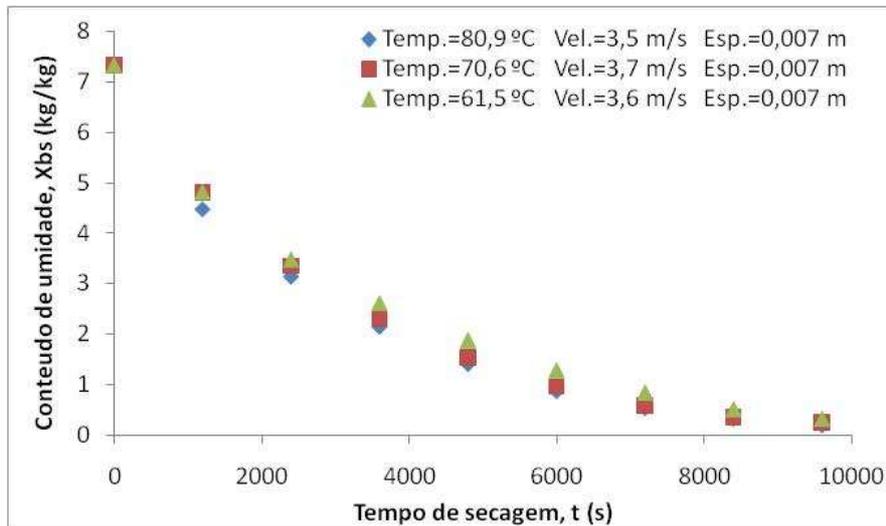


Figura 3.32. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 3,6 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,007m de espessura.

Na Figura 3.32 observa-se que as três curvas apresentam suas velocidades de secagem bem próximas, o que não é de se esperar, como foi dito anteriormente, para maiores temperatura esperava-se maiores velocidades de secagem. Isto pode ser explicado pela utilização de amostras com estruturas fibrosas diferentes.

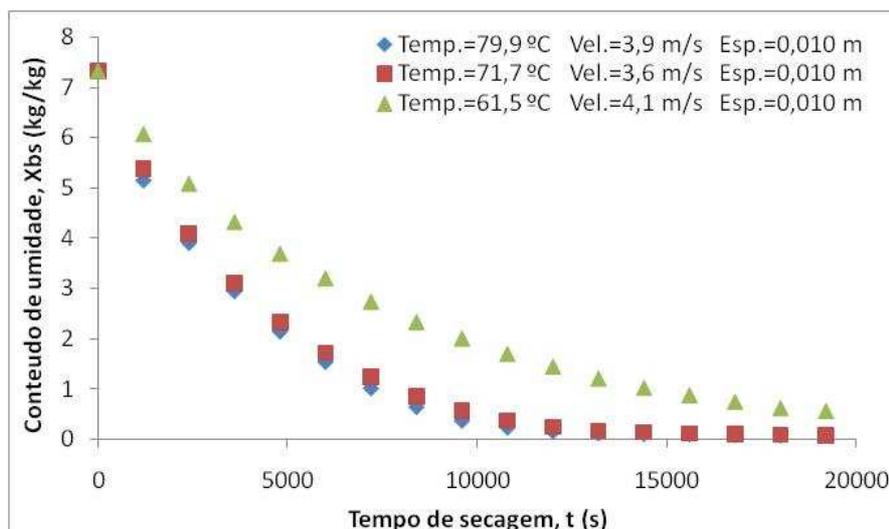


Figura 3.33. Conteúdo de umidade, variando-se a temperatura, com 3,8 m/s de velocidade média do ar de secagem e 0,010m de espessura.

Na Figura 3.33, observa-se que o experimento com 71,7 °C apresenta-se bem próxima a de 79,9 °C, indicando que ambas tiveram velocidades de secagens bem próximas, o que não era de se esperar. Isto pode ter acontecido pelo uso de uma amostra de caju de estrutura fibrosa diferente, que causou maior dificuldade à movimentação da água no interior das amostras. O experimento com 61,5 °C apresentou-se dentro do esperado.

b) Nas Figuras 3.34 a 3.42, são apresentados os gráficos do conteúdo de umidade em função do tempo de secagem, construídos com os dados das Tabelas 3.4 a 3.6 e que mostram a influência que a velocidade do ar de secagem tem na perda de umidade em fatias de caju.

As Figuras 3.34 a 3.36 apresentam as curvas da perda de umidade das fatias de caju, para espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m respectivamente, onde para cada espessura fixou-se a temperatura do ar e variou-se a velocidade do ar de secagem. As temperaturas médias do ar de secagem para as três espessuras ficaram em torno de 81,2, 81,2 e 80,7 °C respectivamente.

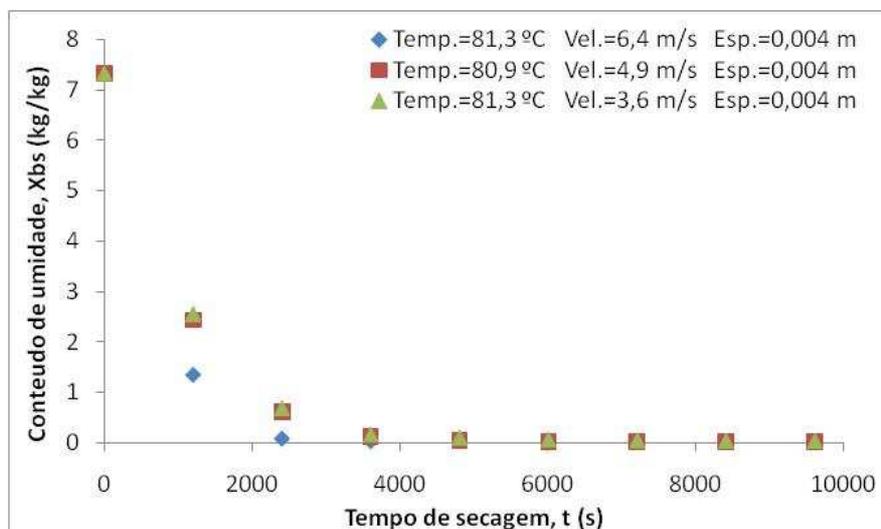


Figura 3.34. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,004 m e temperatura do ar média de 81,2 °C.

Nos resultados apresentados na Figura 3.34 as temperaturas do ar apresentam variações em torno de $81,3 \pm 1,1$, $80,9 \pm 1,5$ e $81,3 \pm 1,1$ °C, e que as velocidades médias do ar de secagem apresentaram-se em torno de 6,4, 4,9 e 3,6 m/s, respectivamente. O que é de se esperar é que quanto maior a velocidade do ar de secagem, maior é seu coeficiente de transferência de massa. Analisando os dados experimentais observou-se que os

diâmetros iniciais das amostras tinham valores bem próximos. Observa-se que com maior velocidade do ar seca-se mais rápido.

Também na Figura 3.34, observa-se experimento com velocidade de 3,6 m/s, que sua curva ficou próxima a de 4,9 m/s, isto pode ter acontecido pelo uso de uma amostra de caju de estrutura fibrosa diferente, que causou maior dificuldade à movimentação da água no interior das amostras, ou uma amostra cujo fruto teria um teor de umidade mais alto do que o das outras duas.

A Figura 3.35, apresenta curvas para experimentos com velocidades médias do ar de secagem, 5,9, 5,1 e 3,5 m/s, para temperaturas próximas a média de 81,2 °C. Analisando os dados experimentais, observa-se que a velocidade média do ar para o experimento com 5,9 m/s ficou proporcionalmente mais próxima a da 5,1 m/s. Segundo MACHADO(2009), a velocidade do ar de secagem tem influencia na cinética da secagem, onde para velocidades do ar maiores devem-se ter velocidades de secagem maiores. Entretanto, isto não aconteceu nos experimentos com velocidade de 3,6 m/s e 4,9 m/s. Mais uma vez, acredita-se que isto pode ser explicado pela diferença das amostras, dessas duas velocidades.

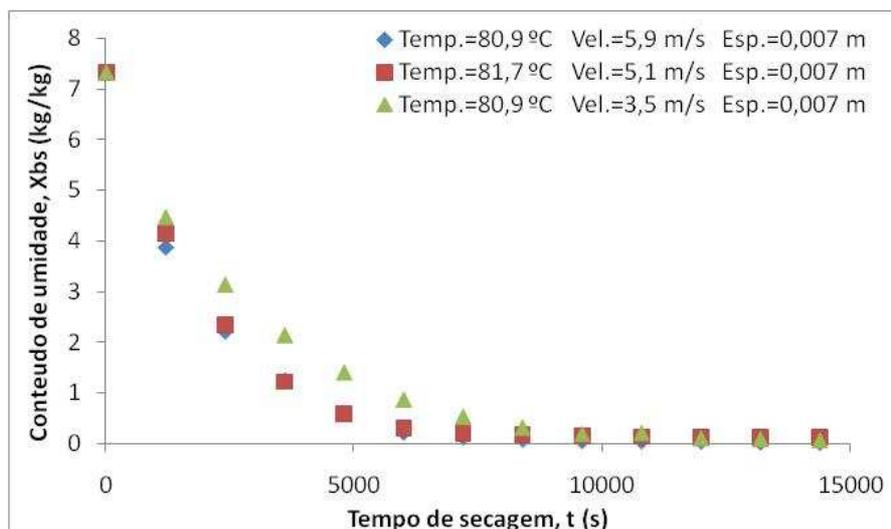


Figura 3.35. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,007 m e temperatura do ar média de 81,2 °C.

A Figura 3.36, apresenta curvas para experimentos com velocidades médias do ar de secagem, variando na ordem 6,7, 5,0 e 3,9 m/s, e suas temperaturas ficaram a ordem de 80,0±1,2, 82,3±1,5 e 79,9±1,2 °C. Observa-se que o experimento com 3,9 m/s secou mais rápido, foi discrepante, pois para maiores velocidades do ar esperava-se

maior velocidade de secagem. Isto também pode ser justificado pelo uso de amostras com estrutura fibrosa diferente, que pode ter causado maior dificuldade à movimentação da água no interior das amostras.

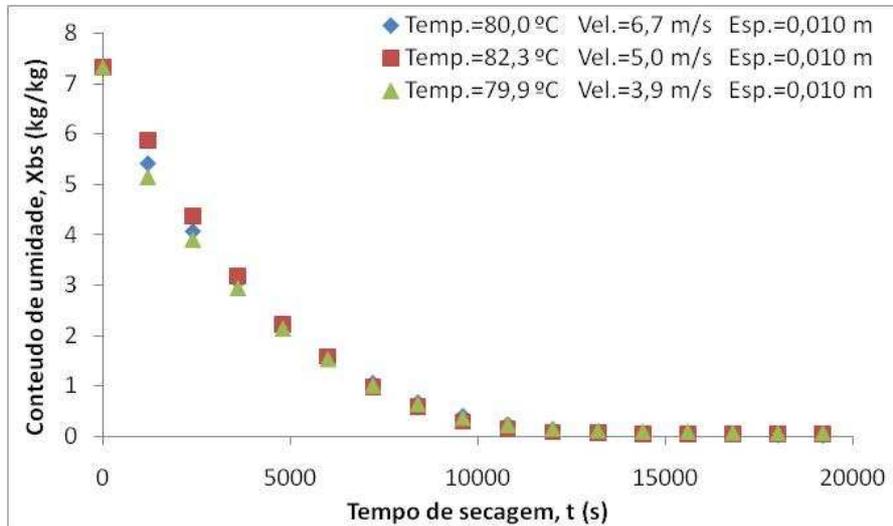


Figura 3.36. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,010 m e temperatura do ar média de 80,7 °C.

As Figuras 3.37 a 3.39 apresentam as curvas de secagem para os mesmos tipos de amostras (espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m), conservando a mesma variação da velocidade do ar, e mantendo fixa a temperatura do ar em uma faixa menor. Nelas, as temperaturas médias do ar de secagem aparecem com valores em torno de 70,8, 71,9 e 70,7 °C.

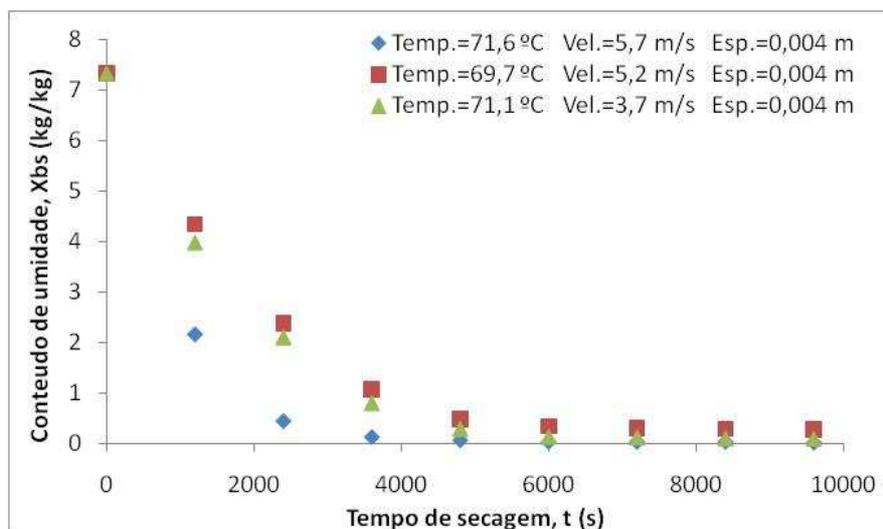


Figura 3.37. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,004 m e temperatura do ar média de 70,8 °C

Na Figura 3.37 observa-se que a curva do experimento com velocidade média do ar em 5,2 m/s apresenta-se acima a de 3,7 m/s, o que não era de se esperar. Analisando os demais fatores envolvidos na secagem observou-se que ambas as amostras apresentaram características dimensionais semelhantes. Observa-se na curva com velocidade de 5,2 m/s que sua velocidade de secagem foi mais lenta do que nos outros dois experimentos. Acredita-se que as amostras apresentaram características das fibras internas diferentes.

Na Figura 3.38, o comportamento apresentado pelas curvas para amostras com espessuras maiores, também se encontram dentro do esperado. Observa-se através das curvas que seus comportamentos estiveram próximos, e que logo no início o experimento com 6,1 m/s secou ligeiramente mais rápido do que o experimento com 5,2 m/s, e ao final mostrou que com velocidades do ar maiores podem-se ter tempos de secagem maiores, conforme a literatura.

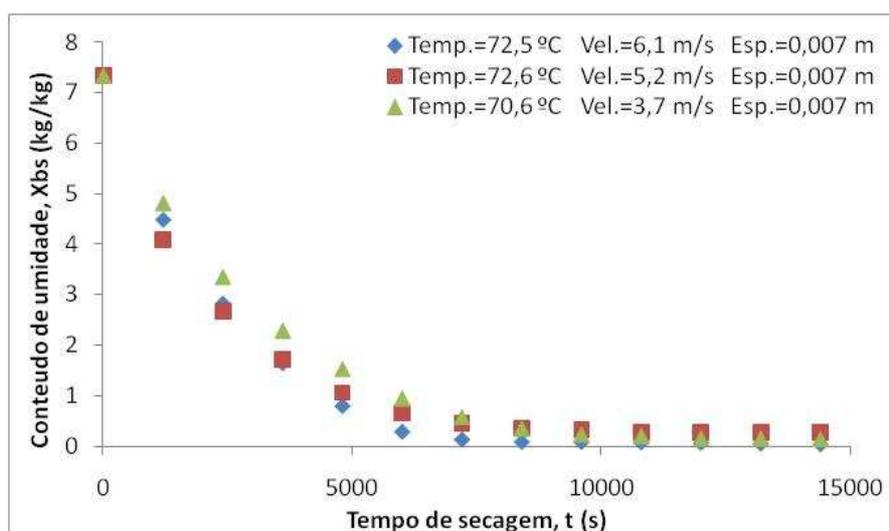


Figura 3.38. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,007 m e temperatura do ar média de 71,9 °C.

A Figura 3.39, apresenta curvas para experimentos com velocidades médias do ar de secagem, variando na ordem 6,5, 5,0 e 3,6 m/s, com uma temperatura média na ordem de 70,7 °C. As curvas apresentaram características bem próximas, mas o experimento com 3,6 m/s apresentou uma discrepância maior que as demais. Essas variações podem ser justificadas também pela utilização de amostras com características das fibras internas diferentes.

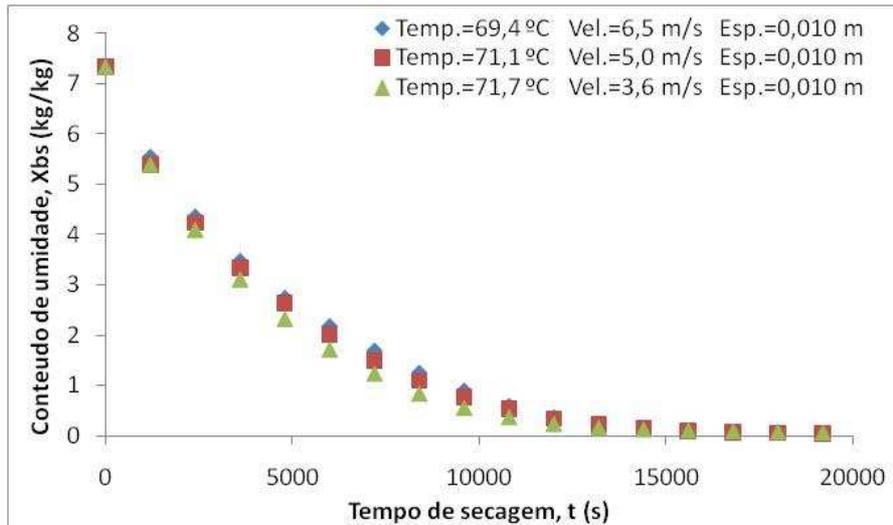


Figura 3.39. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,010 m e temperatura do ar média de 70,7 °C.

As Figuras 3.40 a 3.42 apresentam as curvas de secagem para os mesmos tipos de amostras (espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m), conservando a mesma variação da velocidade do ar, e mantendo fixa a temperatura do ar em uma faixa menor. Nelas, as temperaturas médias do ar de secagem aparecem com valores em torno de 61,6 °C.

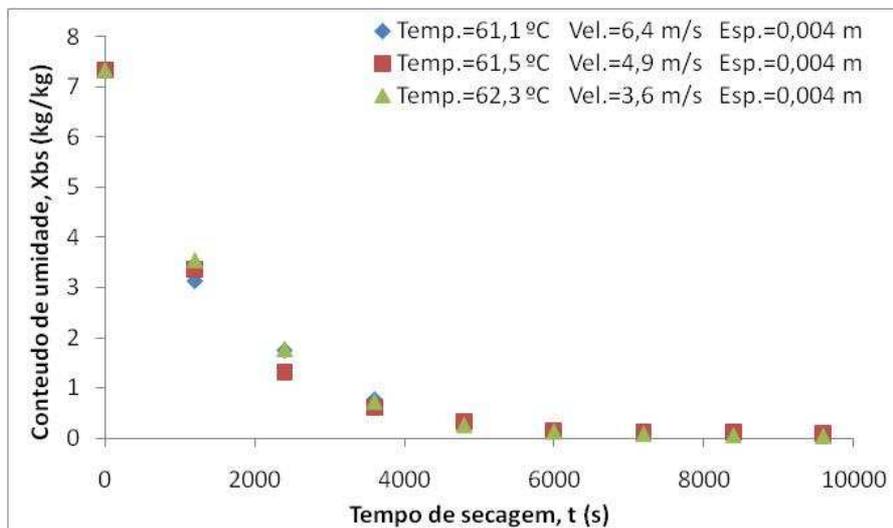


Figura 3.40. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,004 m e temperatura do ar média de 61,6 °C.

A Figura 3.40, apresenta curvas para experimentos com velocidades médias do ar de secagem, variando na ordem 6,4, 4,9 e 3,6 m/s, e suas temperaturas ficaram na ordem de $61,1 \pm 0,8$, $61,5 \pm 0,5$ e $62,9 \pm 0,5$ °C. Como foi dito anteriormente, esperava-se que para velocidade maior do ar deveria ter maior velocidade de secagem, como isto

não ocorreu, acredita-se também que as amostras apresentaram características das fibras internas diferentes.

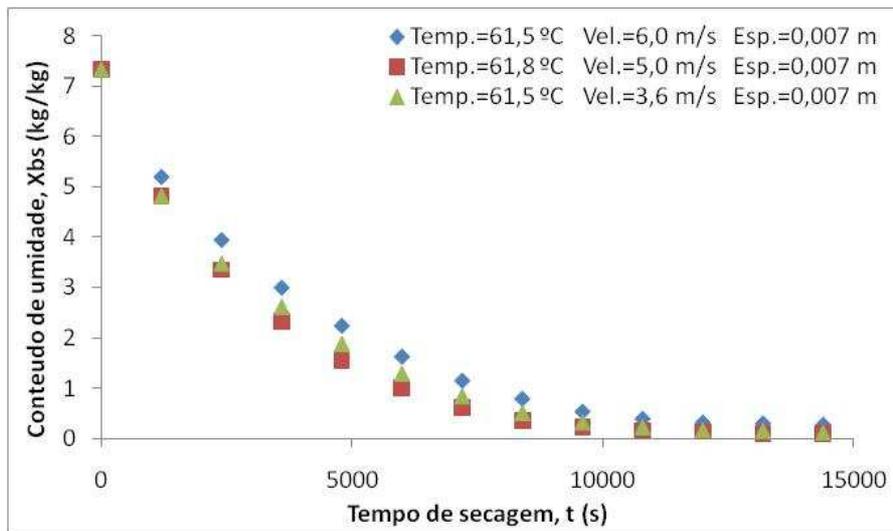


Figura 3.41. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,007 m e temperatura do ar média de 61,6 °C.

Na Figura 3.41, As curvas apresentaram características bem próximas, mas o experimento com 6,0 m/s apresenta-se uma pouco acima das demais mostrando que secou mais lento. Acredita-se que para maior velocidade do ar de secagem, maior deveria ser a velocidade de secagem. Essas variações podem ser justificadas também pela utilização de amostras com estruturas fibrosas diferentes.

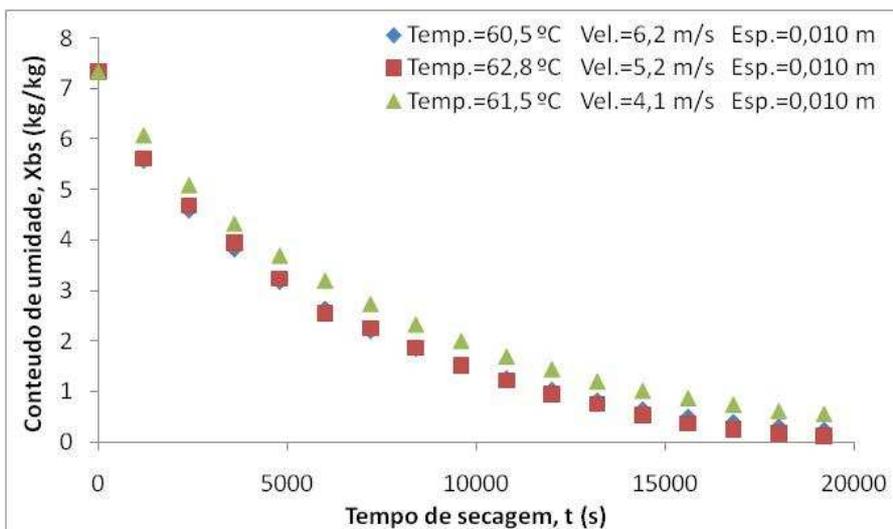


Figura 3.42. Conteúdo de umidade, quando se varia a velocidade do ar de secagem, para a espessura de 0,010 m e temperatura do ar média de 61,6 °C.

A Figura 3.42 mostra que o experimento com a maior velocidade do ar, teve uma velocidade maior de secagem no início, e depois se igualou à do experimento com 5,2 m/s ao final do processo. Já o experimento com velocidade do ar de 4,1 m/s secou mais lentamente do que os experimentos com velocidades do ar 6,2 e 5,2 que está dentro do esperado.

Analisando o comportamento da velocidade do ar de secagem nas perdas de umidade, Observa-se que não é possível inferir, com precisão sobre a influência da velocidade na cinética de secagem. Ocorreram muitas discrepâncias no lote de experimentos que testou a influencia da velocidade. Em relação a isto, e tentando explicar essas discrepâncias, vale relembrar os problemas metodológicos descritos anteriormente sobre a relação dos diâmetros das amostras, o diâmetro da seção de teste do secador, do encolhimento das mostras e a variação das velocidades próximas à superfície de secagem. Além disso, deve-se incluir o fato de não se ter medido o teor de umidade inicial dessas amostras, bem como o desconhecimento da importância da estrutura fibrosa de cada amostra, e sua influência no processo de secagem, como responsáveis pelas discrepâncias apresentadas nesse lote de ensaios.

c) Nas Figuras 3.43 a 3.51, são apresentados gráficos do conteúdo de umidade em função do tempo de secagem, construídos com os dados das Tabelas 3.4 a 3.6 e que mostram a influência da espessura da amostra na perda de umidade em fatias de caju.

As Figuras 3.43 a 3.45 apresentam as curvas da perda de umidade das fatias de caju, onde se fixou as temperaturas e velocidades médias do ar e se variou as espessuras em 0,004, 0,007 e 0,010 m. Nestes gráficos as médias das velocidades médias do ar de secagem se apresentaram em torno de 3,7, 5,0 e 6,3 m/s e as médias das temperaturas médias das três curvas foi de 80,7, 81,6 e 80,7 °C. Dificuldades experimentais, não permitiram obter velocidades exatamente iguais, porém as obtidas estão muito próximas.

Na Figura 3.43, observa-se que o comportamento da curva para o experimento com espessura 0,004 m, apresenta-se com uma taxa de secagem muito maior que as outras duas amostras. O esperado é que ela tivesse uma velocidade de secagem, mais próxima da amostra com espessura de 0,007 m. Isto pode ser explicado por uma amostra diferente das outras duas, com estrutura fibrosa mais simples que ofereceu menor resistência à saída da umidade.

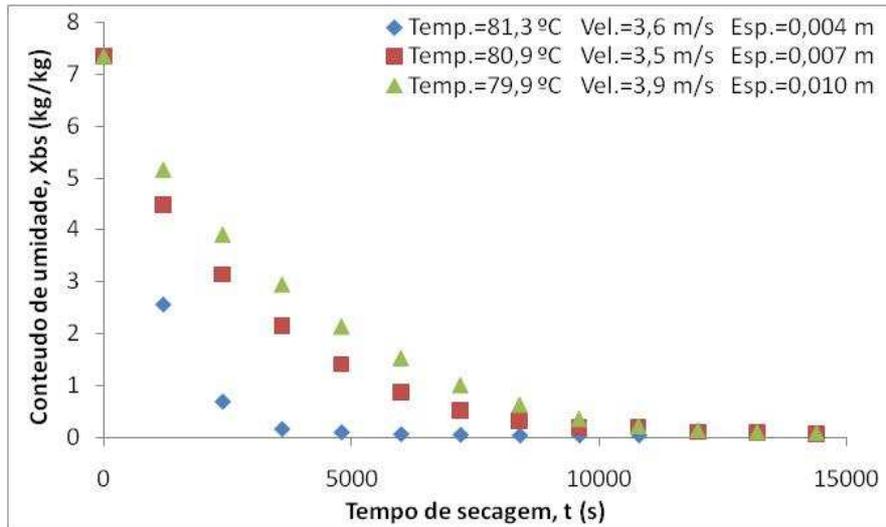


Figura 3.43. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a velocidade média do ar de 3,7 m/s e temperatura média do ar de 80,7 °C.

Nas Figuras 3.44 e 3.45, as curvas apresentam comportamentos semelhantes, quando se variam suas espessuras, tendo como variações das temperaturas e velocidades médias na ordem de 80,9 a 82,3 °C e 4,9 a 5,1 m/s, e 80,0 a 81,3 e 5,9 a 6,7 m/s respectivamente. Elas apresentaram um comportamento dentro do esperado.

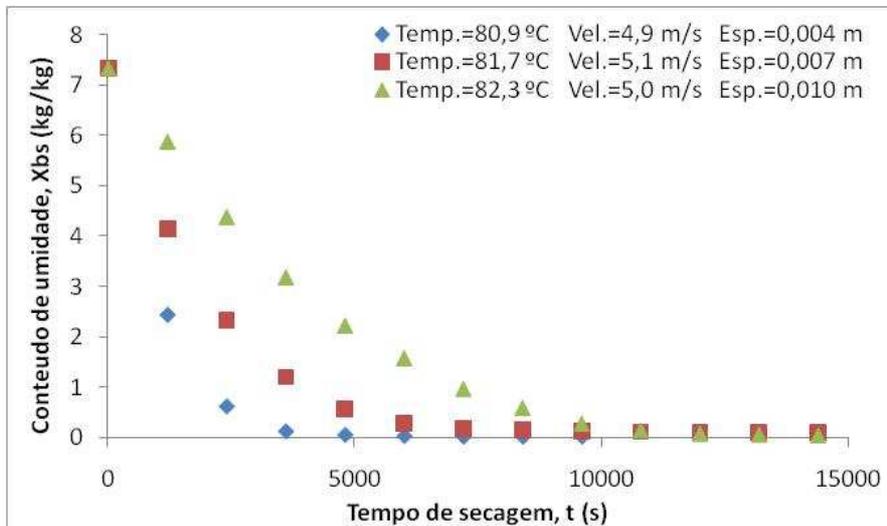


Figura 3.44. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a velocidade média do ar de 5,0 m/s e temperatura média do ar de 81,6 °C.

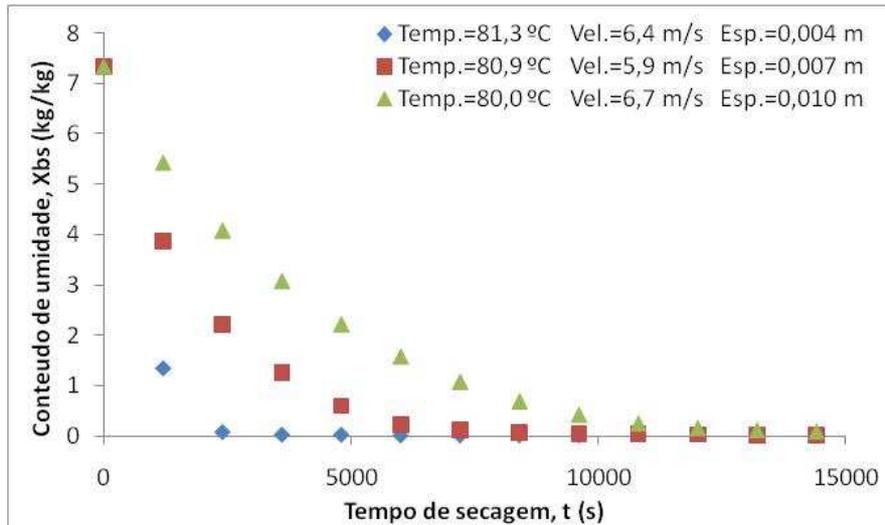


Figura 3.45. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a velocidade média do ar de 6,3 m/s e temperatura média do ar de 80,7 °C.

As Figuras 3.46 a 3.48 apresentam as curvas da perda de umidade das fatias de caju, onde se fixou as temperaturas e velocidades médias do ar em patamares menor e se variou apenas as espessuras em 0,004, 0,007 e 0,010 m. Nestes gráficos as médias das velocidades médias do ar de secagem se apresentaram em torno de 3,7, 5,1 e 6,1 m/s e as médias das temperaturas médias das três curvas foi de 71,1, 71,1 e 71,2 °C. Dificuldades experimentais, não permitiram obter velocidades exatamente iguais, porém as obtidas estão muito próximas.

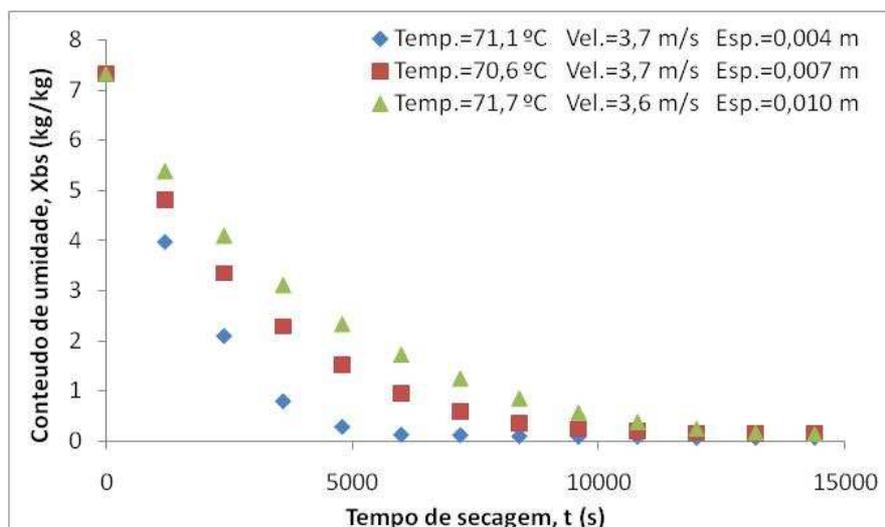


Figura 3.46. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a velocidade média do ar de 3,7 m/s e temperatura média do ar de 71,1 °C.

Na Figura 3.46, observa-se que o comportamento da curva para o experimento com espessura 0,004 m, como na Figura 3.43, apresentou uma taxa de secagem maior que as outras duas amostras. O esperado é que ela tivesse uma velocidade de secagem um pouco menor.

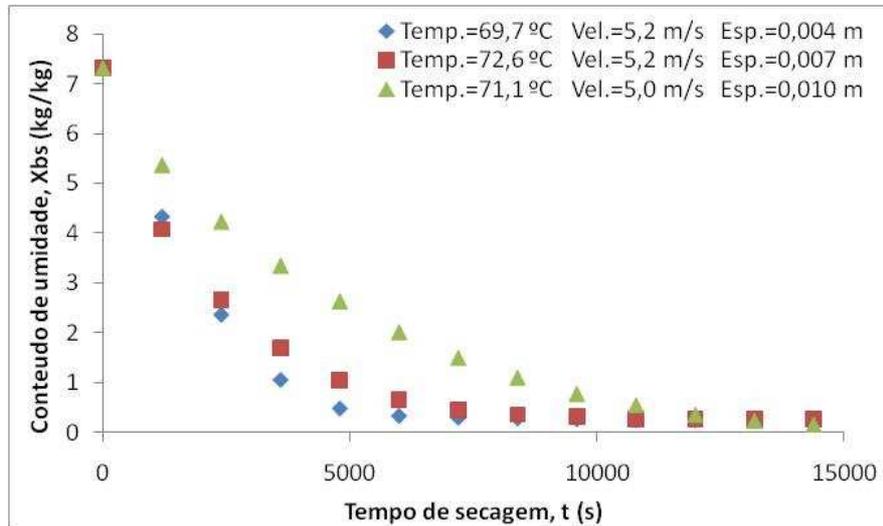


Figura 3.47. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a velocidade média do ar de 5,1 m/s e temperatura média do ar de 71,1 °C.

Na Figura 3.47, observa-se que nos experimento com 0,004 e 0,007 m de espessura suas curvas estiveram bem próximas durante toda secagem, e que a amostra de 0,010 secou mais lentamente, dentro do esperado. Acredita-se também que a proximidade das duas curvas de secagem, mais uma vez pode ser explicada pelas características diferentes das fibras internas.

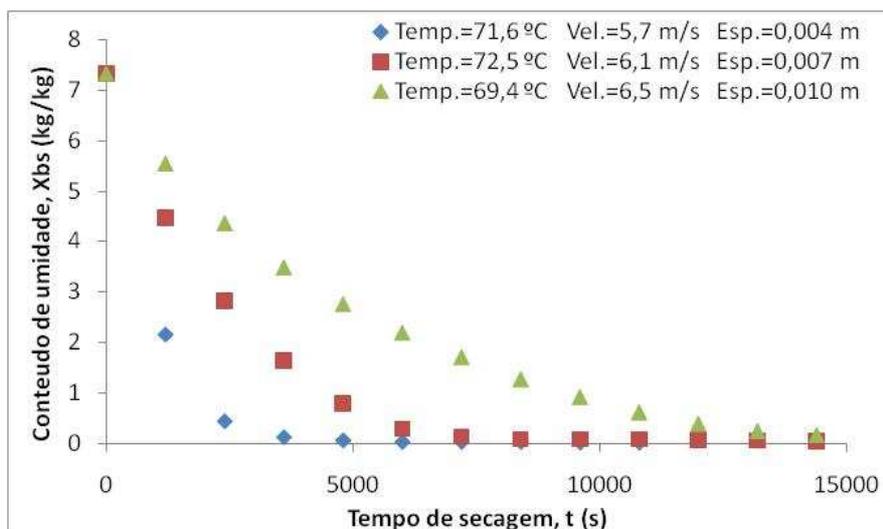


Figura 3.48. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a velocidade média do ar de 6,1 m/s e temperatura média do ar de 71,2 °C.

Na Figura 3.48, as curvas apresentam comportamentos semelhantes, e dentro do esperado.

As Figuras 3.49 a 3.51 apresentam as curvas da perda de umidade das fatias de caju, onde se fixou as temperaturas e velocidades médias do ar em patamares ainda menor e se variou apenas as espessuras em 0,004, 0,007 e 0,010 m. Nestes gráficos as médias das velocidades médias do ar de secagem se apresentaram em torno de 3,7, 5,0 e 6,2 m/s e as médias das temperaturas médias das três curvas foi de 61,8, 62,0 e 61,0 °C.

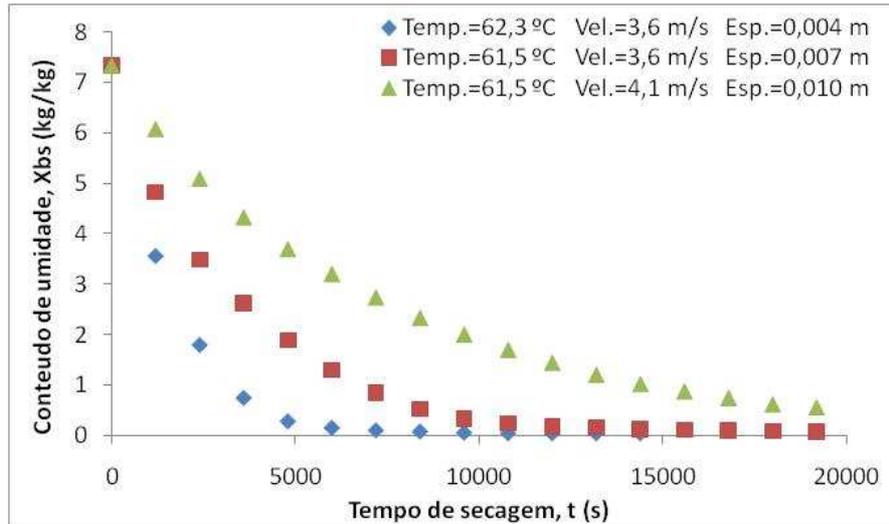


Figura 3.49. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a velocidade média do ar de 3,7 m/s e temperatura média do ar de 61,8 °C.

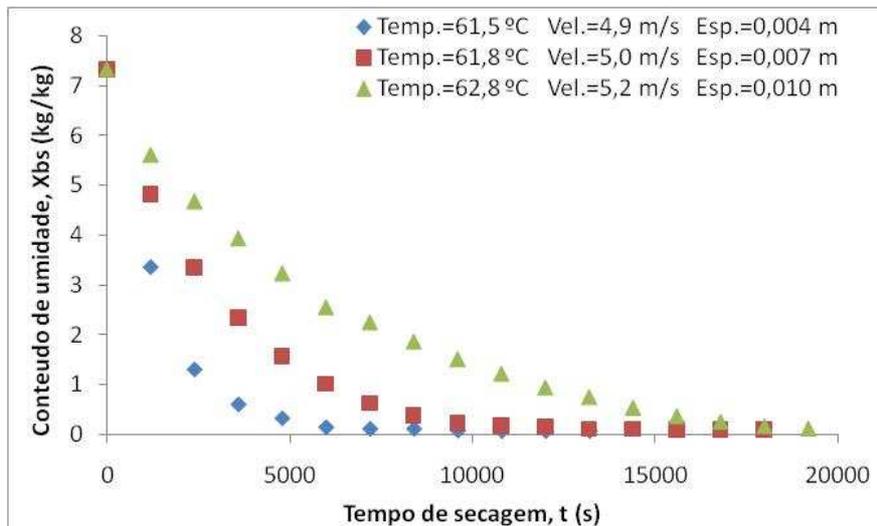


Figura 3.50. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a velocidade média do ar de 5,0 m/s e temperatura média do ar de 62,0 °C.

Da mesma forma da análise anterior, nas Figuras 3.49 e 3.50, as curvas apresentam comportamentos semelhantes, quando se variam suas espessuras, tendo

como variações das temperaturas e velocidades médias na ordem de 61,5 a 62,3 °C e 3,6 a 4,1 m/s, e 61,5 a 62,8 e 4,9 a 5,2 m/s respectivamente. Elas apresentaram um comportamento dentro do esperado

Na Figura 3.51, observa-se que o comportamento da curva para o experimento com espessura 0,004 m, como na Figura 3.46, apresentou uma taxa de secagem maior que as outras duas amostras. O esperado é que ela tivesse uma velocidade de secagem um pouco menor.

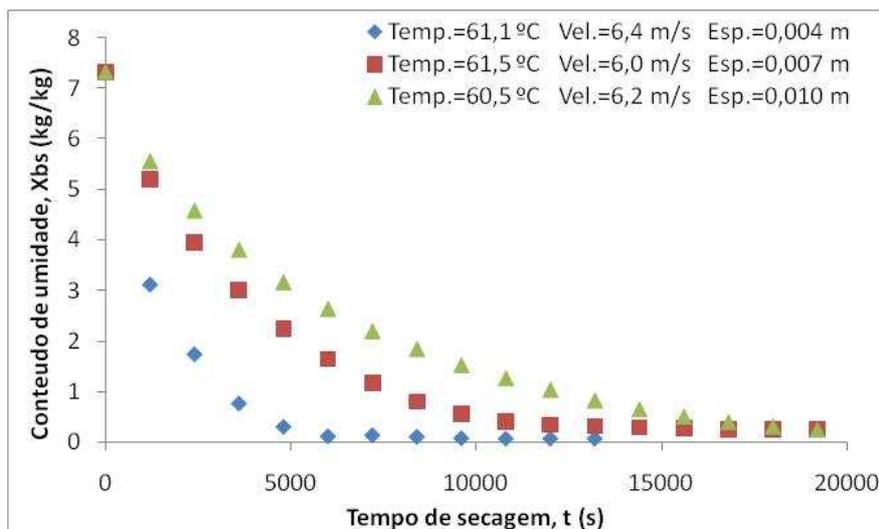


Figura 3.51. Conteúdo de umidade, quando se varia a espessura da amostra, para a velocidade média do ar de 6,2 m/s e temperatura média do ar de 61,3 °C.

d) Nas Figuras 3.52 a 3.60, são apresentados gráficos da evolução da temperatura no centro das fatias de caju em função do tempo de secagem, para as amostras com espessuras 0,004, 0,007 e 0,010. Nestas curvas, em sua totalidade, observa-se que houve flutuações, e que são justificadas, pela movimentação dos termopares no interior das amostras, principalmente naquelas com espessuras menores, pois devido ao encolhimento da amostra os termopares se moviam, saindo do seu posicionamento inicial.

As Figuras 3.52 a 3.54 apresentam a evolução da temperatura no interior das amostras cujas velocidades médias do ar de secagem variaram de 3,6 a 4,1, 4,9 a 5,2 e 6,0 a 6,4 m/s respectivamente. As temperaturas do ar de secagem ficaram em um patamar na ordem de 61 °C. É de se esperar que para uma mesma faixa de temperatura do ar de secagem, e supondo que as amostras apresentem as mesmas condições experimentais, o perfil da temperatura no interior das amostras deve ter uma pequena variação.

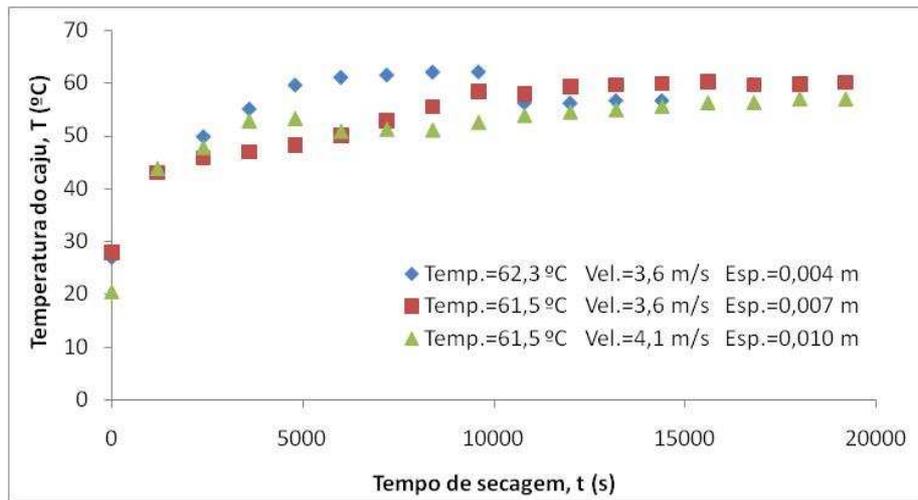


Figura 3.52. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a velocidade média do ar de 3,8 m/s e temperatura média do ar de 61,8 °C.

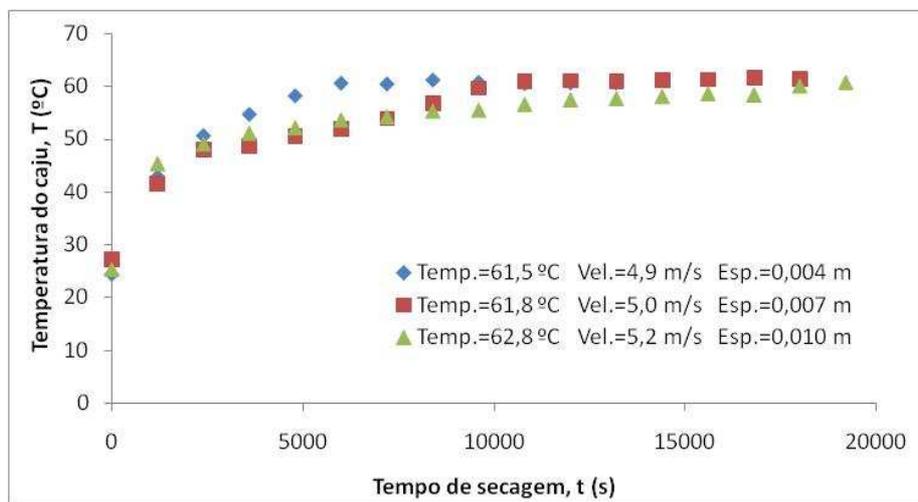


Figura 3.53. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a velocidade média do ar de 5,0 m/s e temperatura média do ar de 62,0 °C.

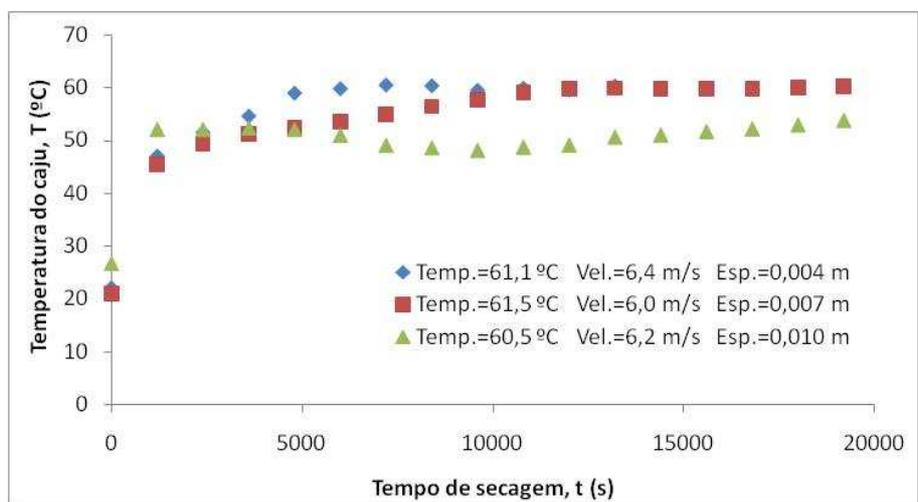


Figura 3.54. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a velocidade média do ar de 6,2 m/s e temperatura média do ar de 61,0 °C.

As Figuras 3.55 a 3.57 apresentam a evolução da temperatura no interior das amostras cujas velocidades médias do ar de secagem são: 3,7, 5,1 e 6,1 m/s e as temperaturas médias do ar de secagem são: 71,1, 71,1 e 71,2 °C, respectivamente.

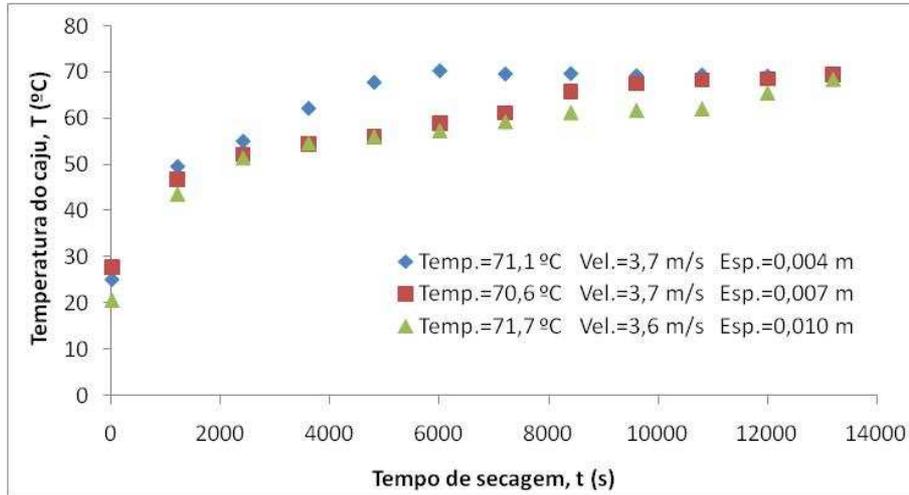


Figura 3.55. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a velocidade média do ar de 3,7 m/s e temperatura média do ar de 71,1 °C.

De forma semelhante às apresentadas acima, as Figuras 3.55, 3.56 e 3.57 que apresentam a evolução da temperatura no interior das amostras cujas velocidades médias do ar de secagem variaram de 3,6 a 3,7, 5,0 a 5,2 e 5,7 a 6,5 m/s respectivamente, e as temperaturas do ar de secagem ficaram em um patamar na ordem de 71 °C.

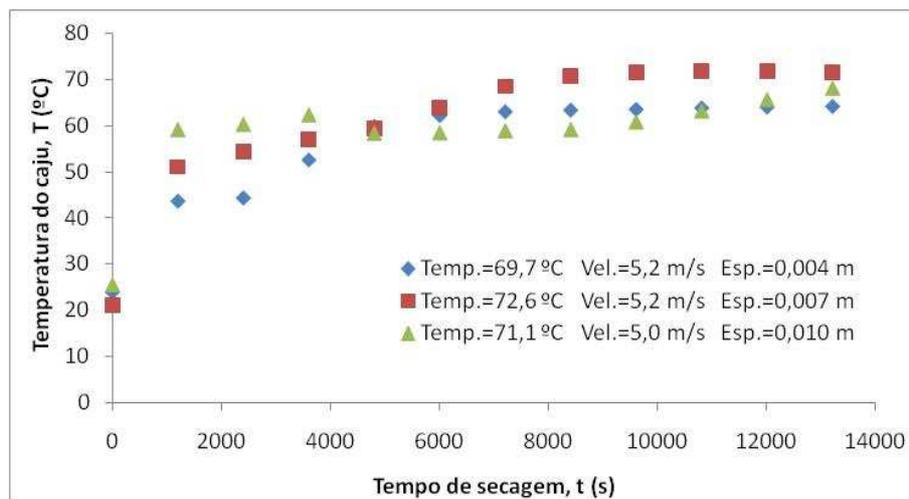


Figura 3.56. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a velocidade média do ar de 5,1 m/s e temperatura média do ar de 71,1 °C.

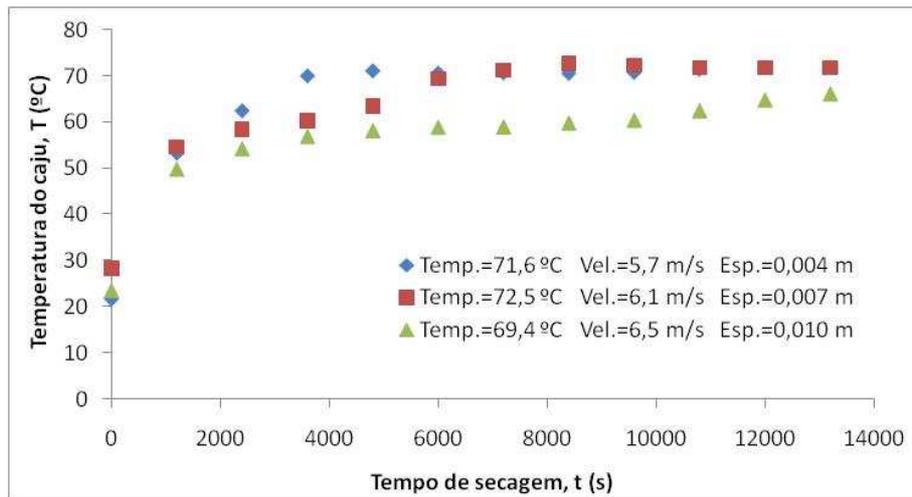


Figura 3.57. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a velocidade média do ar de 6,1 m/s e temperatura média do ar de 71,2 °C.

As Figuras 3.58 a 3.60 apresentam a evolução da temperatura no interior das amostras cujas velocidades médias do ar de secagem são: 3,7, 5,0 e 6,3 m/s e as temperaturas médias do ar de secagem são: 80,7, 81,6 e 80,7 °C, respectivamente.

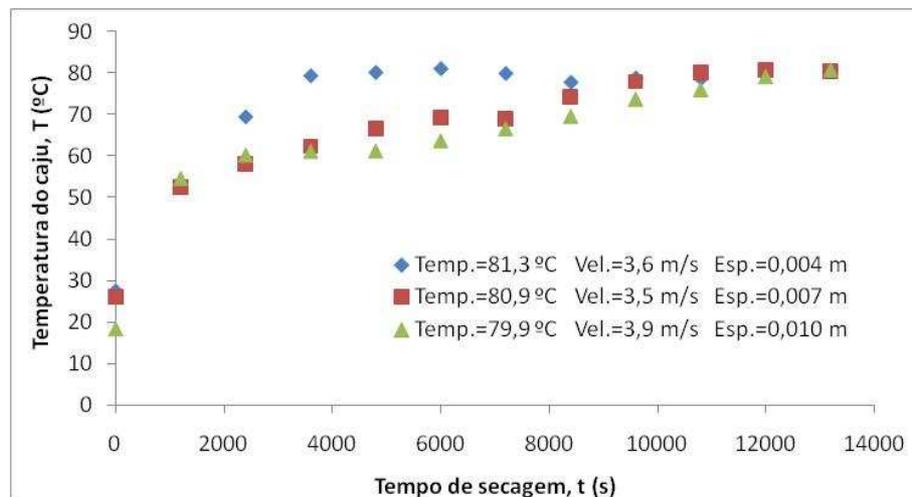


Figura 3.58. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a velocidade média do ar de 3,7 m/s e temperatura média do ar de 80,7 °C.

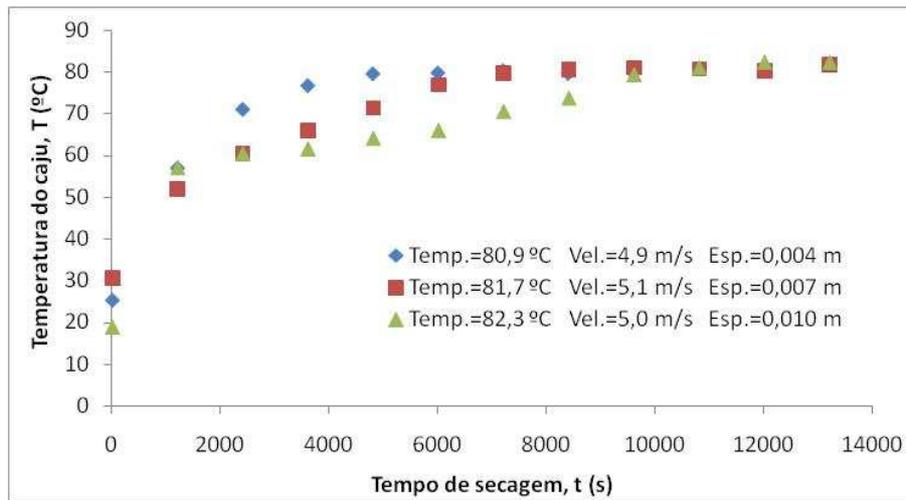


Figura 3.59. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a velocidade média do ar de 5,0 m/s e temperatura média do ar de 81,6 °C.

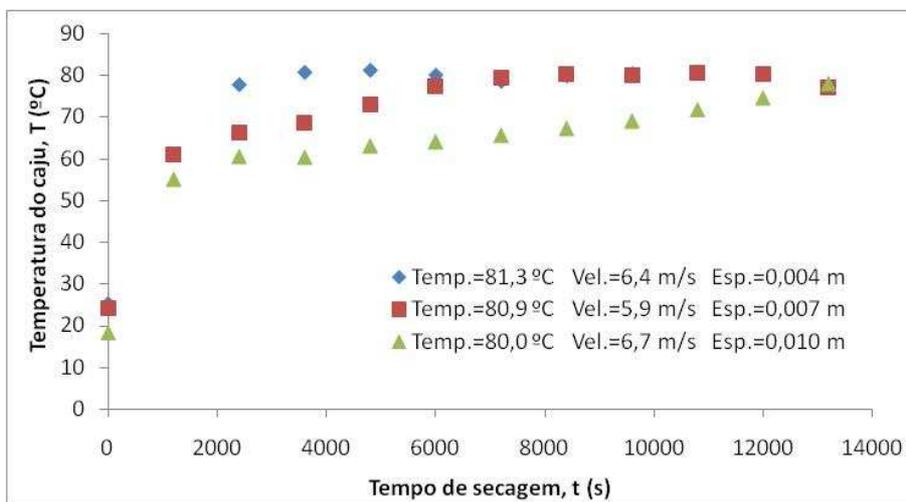


Figura 3.60. Evolução da temperatura do caju nas varias espessuras, para a velocidade média do ar de 6,3 m/s e temperatura média do ar de 80,7 °C.

Conclui-se que a variação da temperatura no interior da amostra está bem relacionada com a variação da temperatura do ar de secagem. Como observado anteriormente, pela inconstância do posicionamento dos termopares, principalmente naquelas amostras com espessuras menores, devido ao encolhimento delas os termopares se moviam dentro das amostras. Desta forma não se pôde ter resultados conclusivo a respeito da evolução da temperatura no interior das fatias de caju.

e) Nas Figuras 3.61 a 3.69, são apresentadas curvas da velocidade de secagem em função do conteúdo de umidade, para diversas condições experimentais e que mostram seu comportamento quando se varia a temperatura do ar em um processo de secagem de fatias de caju.

Estas figuras foram obtidas a partir das Tabelas 3.4 a 3.6, que nenhuma delas apresenta período de secagem com taxa constante. Em todas elas, a secagem aconteceu com taxa variável, conforme dito anteriormente, esse é o comportamento esperado para produtos biológicos.

As Figuras 3.61 a 3.63 apresentam curvas da taxa de secagem em função do conteúdo de umidade da amostra para espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m respectivamente, em condições onde as médias das velocidades do ar variaram entre 5,6 a 6,7 m/s. Em cada figura apresentada, o parâmetro que variou foi a temperatura, como mostrado a seguir.

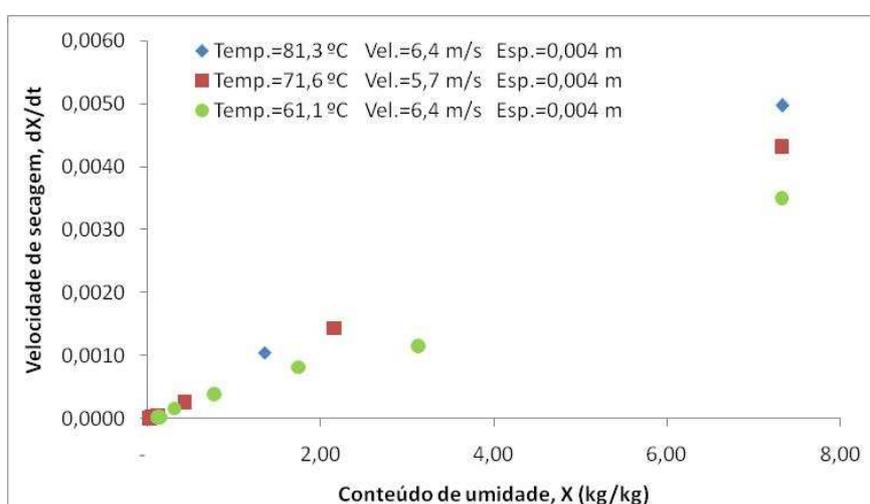


Figura 3.61. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 5,7 e 6,4 m/s e espessura de 0,004m.

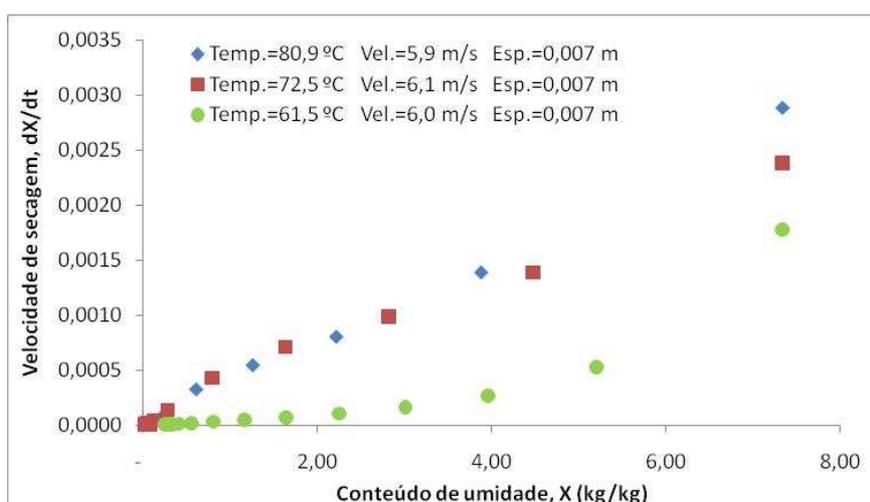


Figura 3.62. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 5,9 e 6,1 m/s e espessura de 0,007 m.

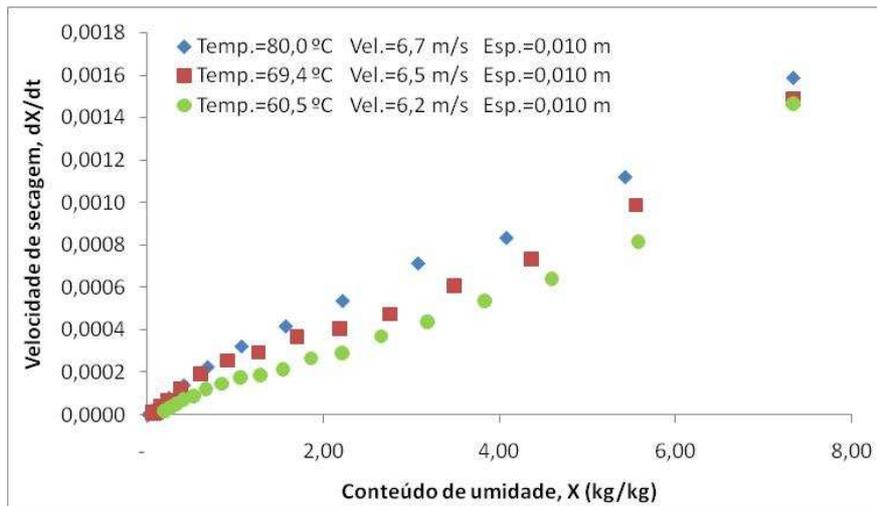


Figura 3.63. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 6,2 e 6,7 m/s e espessura de 0,010 m.

As Figuras 3.64 a 3.66 apresentam curvas da taxa de secagem em função do conteúdo de umidade da amostra para espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m respectivamente, em condições onde as médias das velocidades do ar variaram entre 4,9 a 5,2 m/s. Em cada figura apresentada, o parâmetro que variou foi a temperatura do ar, como demonstrado a seguir.

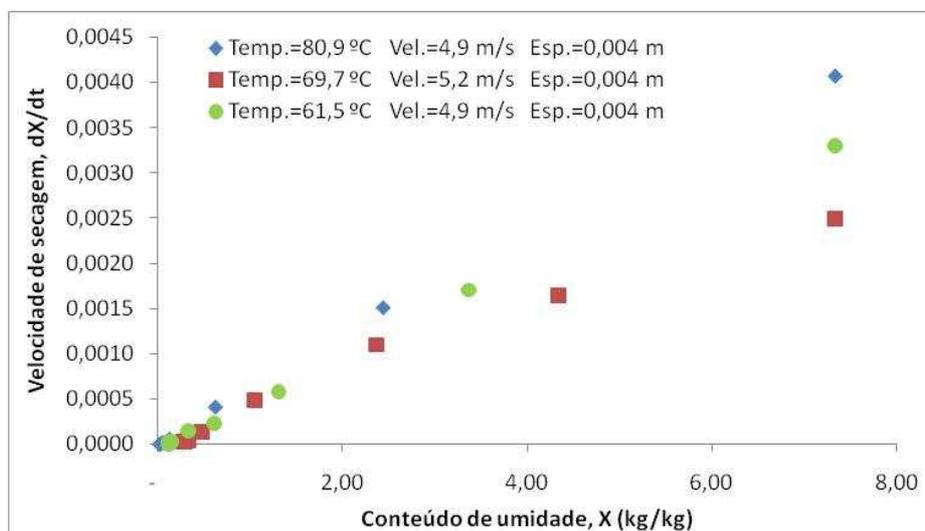


Figura 3.64. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 4,9 e 5,2 m/s e espessura de 0,004 m.

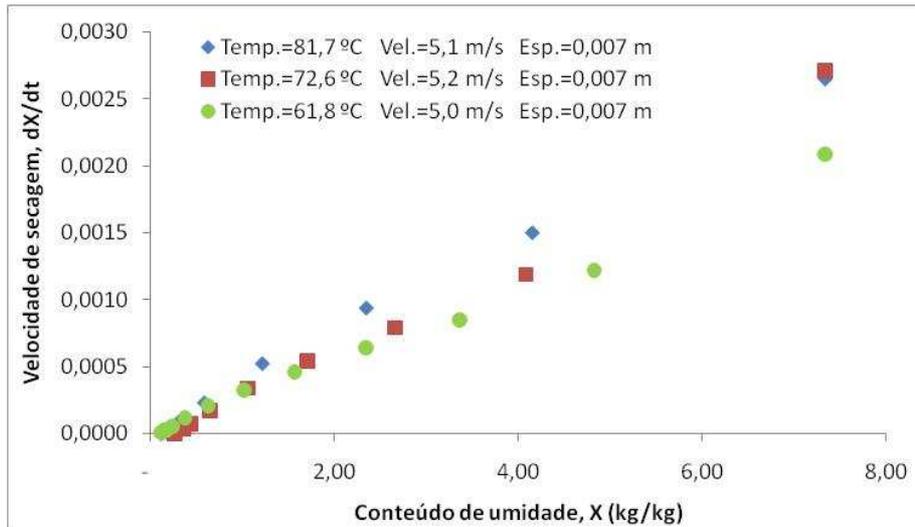


Figura 3.65. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 5,0 e 5,2 m/s e espessura de 0,007 m.

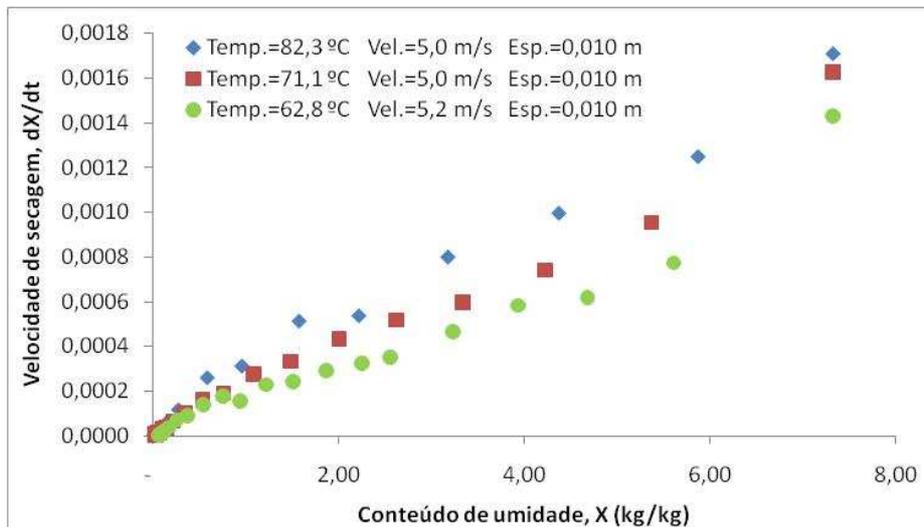


Figura 3.66. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 5,0 e 5,2 m/s e espessura de 0,010 m.

As Figuras 3.67 a 3.69 apresentam curvas da taxa de secagem em função do conteúdo de umidade da amostra para espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m respectivamente, em condições onde as médias das velocidades do ar das três curvas apresentadas, variaram entre 3,5 a 4,1 m/s. Em cada figura apresentada, o parâmetro que variou foi a temperatura, como mostram a seguir.

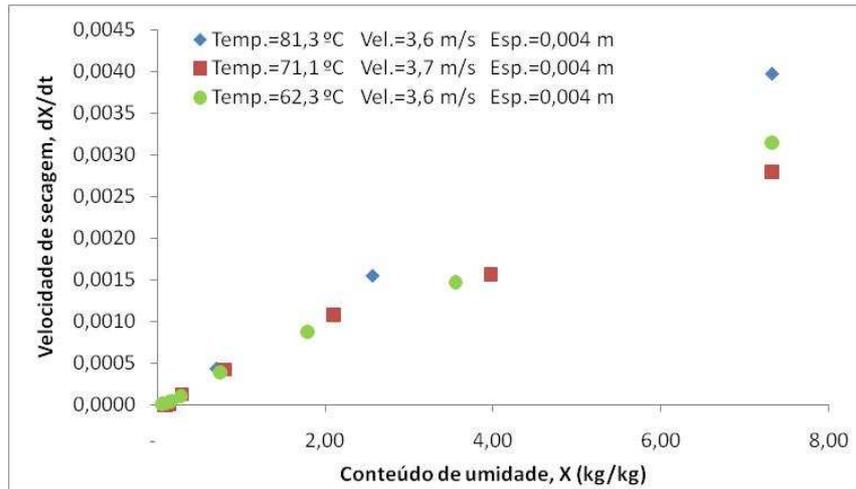


Figura 3.67. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 3,6 e 3,7 m/s e espessura de 0,004 m.

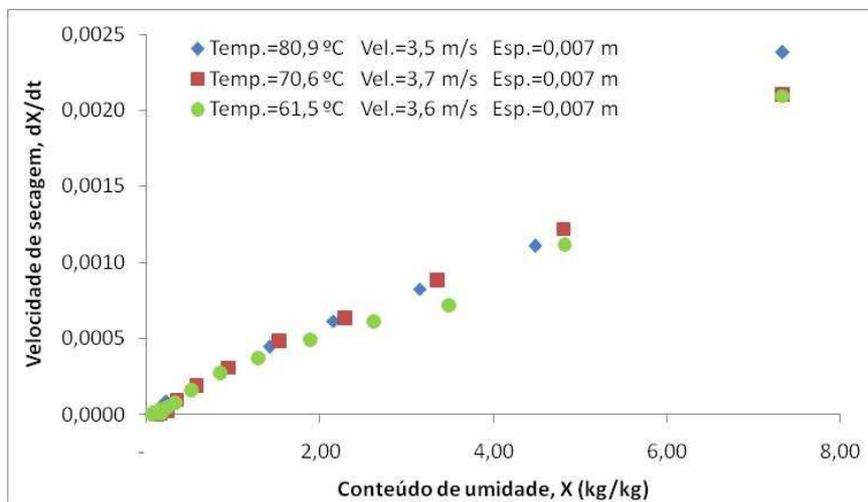


Figura 3.68. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 3,5 e 3,7 m/s e espessura de 0,007 m.

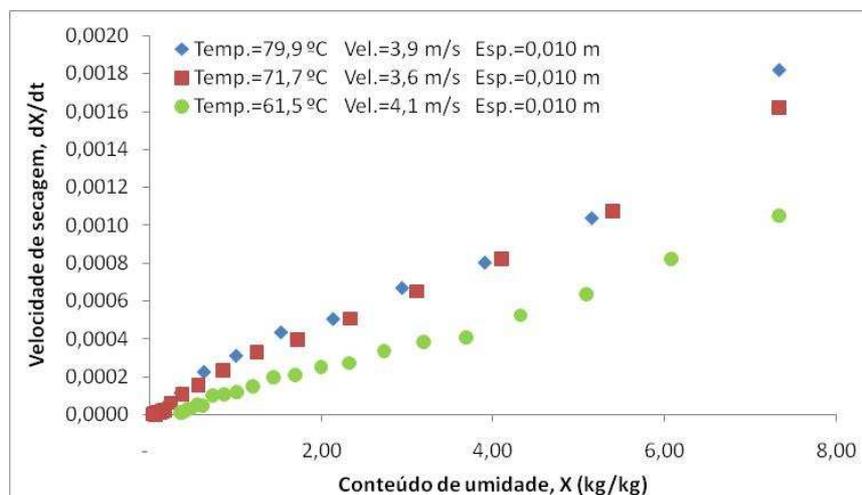


Figura 3.69. Variação da taxa de secagem para velocidades do ar entre 3,6 e 4,1 m/s e espessura de 0,010 m.

3.5. Determinação das propriedades termofísicas

3.5.1. Densidade

Segundo MISRA e YOUNG (1980) o encolhimento de produtos agrícolas durante a secagem é um fenômeno físico que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade e pode ter um efeito significativo na difusividade mássica e, portanto, na taxa de remoção de umidade. Porém eles verificaram que considerar o encolhimento nos modelos de secagem é difícil devido a não se ter informações sobre o coeficiente de encolhimento nem da relação funcional entre encolhimento e difusividade mássica e, ainda, verificaram que o encolhimento é função de uma retração livre, relacionada com a perda de água e também elástica, a qual é provocada pelas células adjacentes.

O encolhimento do material, no processo de secagem, apresenta modificações nas condições de contorno usadas para resolução da segunda Lei de Fick, por isso é de grande importância quantificar esse fenômeno ao se analisar a cinética de secagem (PARK, 1987). De acordo com MURR (1992) a forma como a água permanece unida ao material interfere com maior ou menor grau na secagem desse material. Daí a importância de se conhecer a relação de equilíbrio entre sólido e água. A remoção de umidade é limitada por fatores como o encolhimento do material, que, segundo KILPATRICK et al. (1955) e SUZUKI et al. (1976) é função apenas do teor de umidade. Na prática, este fenômeno depende das condições de secagem. SUAREZ e VIOLLAZ (1991) observaram o encolhimento em batatas fatiadas com diferentes conteúdos de umidade e diferentes densidades do material. A variação da área superficial com o tempo foi medida, inicialmente, considerando o grau de encolhimento da amostra. Foi encontrado que, para tempos de secagem, relativamente pequenos, o modelo de Fick, com encolhimento, representa bem os dados experimentais com o coeficiente de difusão independente do teor de umidade. No entanto, em termos do modelo difusional, os dados experimentais predizem uma grande dependência do coeficiente de difusão com o teor de umidade.

SUZUKI et al. (1976) estudaram o encolhimento de cenoura, batata, batata doce e rabanete, utilizando a equação de KILPATRICK et al. (1955) e mostraram que, durante os primeiros estágios de secagem, o volume de encolhimento de vegetais e batata é igual ao volume de água eliminada por evaporação, mas para os estágios finais o volume de encolhimento é menor que o volume de água removida. Eles então apresentaram três modelos de secagem cujas fórmulas relacionam as mudanças na área

de superfície e o teor de umidade: o modelo de secagem Uniforme 1, o qual é função do teor de umidade inicial da amostra em cada ponto de secagem. Uniforme 2, função do teor de umidade e densidade inicial do produto e o modelo de secagem central, baseado na suposição de que durante o processo de secagem, se forma uma camada seca na superfície do material submetido à secagem e o centro do material permanece com um teor de umidade mais elevado.



Figura 3.70. Densímetro e óleo vegetal

Após cada secagem, as amostras foram submetidas a outro ensaio para a obtenção da densidade do material seco, utilizando-se um densímetro para sólidos (também chamado de picnômetro). Foi necessária a confecção de um picnômetro que coubessem as amostras de caju, conforme a Figura 3.70, como também o desenvolvimento de procedimentos operacionais, dentro dos padrões para análise de densidade, que possam dar confiabilidade aos resultados.

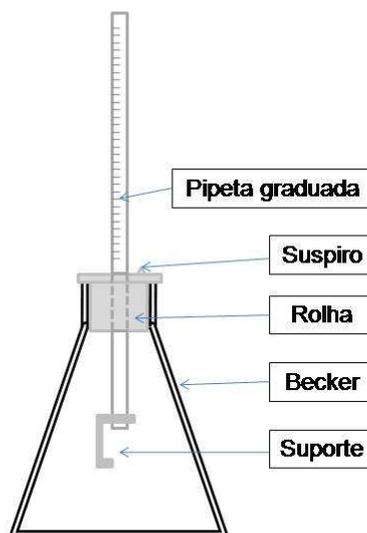


Figura 3.71. Detalhamento das partes do densímetro.

Neste trabalho, o fluido utilizado foi o óleo vegetal, que por características físicas, não podem ser absorvidos pelas amostras secas de caju, devido a sua baixa solubilidade na água. O princípio da análise é obter a massa da amostra e dividi-la pela variação do volume de óleo no picnômetro.

O picnômetro construído é composto por cinco partes: Becker, rolha, pipeta graduada, suspiro e suporte, conforme Figura 3.71.

Todas as amostras de caju que foram secadas na bancada experimental, para cada condição, foram cortadas ao meio (Figura 3.72) e ensaiadas no picnômetro (Figura 3.73), a fim de se observar a repetibilidade dos resultados.



Figura 3.72. Amostras secas de caju.

Com os dados obtidos, calculou-se a densidade através do quociente do peso da amostra pela variação de volume registrado na proveta. Os valores médios encontrados para a densidade do caju foi de $912,95 \text{ kg/m}^3$ in-natura, e $1127,83 \text{ kg/m}^3$ quando secos no secador. Valores próximos ao encontrado para o caju, segundo MATTOS (2007) que obteve como resultados $1053 \pm 0,28 \text{ kg/m}^3$.



Figura 3.73. Medições para obter a densidade.

3.5.2. Difusividade e Energia de ativação

Os autores SAHIN e DINCER (2002) apresentaram um método gráfico simples para determinar a difusividade mássica e o coeficiente de transferência de massa para produtos sólidos a partir de dados experimentais. O trabalho mostra a validação do método e como essa metodologia pode ser utilizada para aplicações práticas. Já os autores RATTI e MUJUMDAR (1997) desenvolveram um código numérico baseado no método de diferenças finitas para simular e prever o desempenho de um secador solar tipo leito fixo sob condições de temperatura do ar na entrada variando com o tempo. Todos os parâmetros envolvidos no modelo foram obtidos de dados experimentais sobre secadores solares. Resultados de ensaios numéricos realizados com o modelo apresentam uma boa concordância com resultados experimentais sobre secagem de pedaços de cenouras com formatos cilíndricos.

Segundo KEEY (1978), numa rápida inspeção na Figura 3.74, verifica-se que em função do estágio da secagem, os valores da função difusividade passam por máximo e mínimo, tendo um ponto de inflexão na região de adsorção multimolecular.

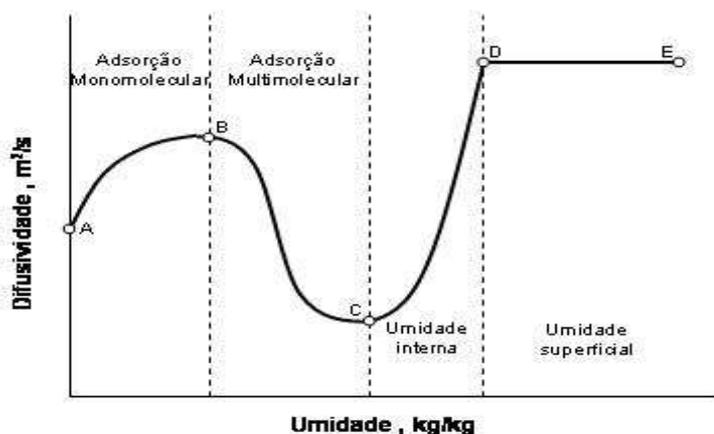


Figura 3.74. Variação da difusividade vs. Conteúdo de umidade.

Para o estudo da difusividade, considerou-se a geometria das amostras de caju como uma placa plana infinita para obtenção dos valores de difusividade efetiva estimada para o ajuste linear das curvas e a razão de umidade $[(X-X_e) / (X_o-X_e)]$ obtida experimentalmente, empregando-se apenas o primeiro termo da equação.

O cálculo da difusividade efetiva foi obtido mediante a equação de difusão para sistema de coordenadas retangulares (CRANK, 1975), conforme Equação 3.2. Considerou-se uma distribuição de umidade inicial, uniforme e sem a presença de

qualquer resistência térmica e a solução analítica da lei de Fick para uma placa plana infinita, foi estudada na forma de séries infinitas.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Def \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Def \frac{\partial Y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Def \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \quad (3.2)$$

onde o coeficiente de difusão é um coeficiente que representa a difusividade efetiva e engloba os efeitos de todos os fenômenos podendo intervir sobre a migração da água e seu valor é sempre obtido através de ajustes de curvas com os dados experimentais.

Assumindo a forma geométrica de uma placa infinita, onde a transferência interna de umidade durante a secagem é apenas em uma direção, a Equação 3.2 se reduz a:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(Def \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad (3.3)$$

Quando o coeficiente de difusão *Def*, é considerado constante, o conteúdo de umidade inicial X_o é distribuído uniformemente no interior do produto desprezando as resistências externas à transferência de massa. O teor de umidade na superfície da amostra permanece constante durante o processo e seu valor corresponde ao termo de umidade de equilíbrio X_e do produto.

Equação 3.3, pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = Def \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (3.4)$$

Com as seguintes condições de contorno:

$$X=X_o \quad \text{em} \quad t=0 \quad 0 < y < L \quad (3.5)$$

$$X=X_e \quad \text{em} \quad y=L \quad t>0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial X}{\partial y} = 0 \quad \text{em} \quad y=0 \quad t>0 \quad (3.7)$$

Considerando uma distribuição de umidade inicial uniforme e em ausência de qualquer resistência térmica a solução analítica da lei de Fick para uma placa plana infinita é dada na forma de séries infinitas (CRANK, 1975).

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right] \quad (3.8)$$

onde, X é o conteúdo de umidade médio (g), X_e é o conteúdo de umidade de equilíbrio (g), X_0 é o conteúdo de umidade inicial (g), D_{ef} é a difusividade efetiva (m^2/h), e L é a semi-espessura média.

Com o intuito de se encontrar valores de difusividade efetiva, considerando o encolhimento do material, foi aplicado o método de regressão linear, tendo sido utilizada valores da meia espessura inicial das amostras e também a meia espessura média, obtida pela média aritmética das medidas iniciais e finais das amostras com base em estudos realizado por GOUVEIA (1999) para a secagem de fatias de gengibre.

Tabela 3.7. Calculo de L, semi-espessura das amostras.

COND	Espes Inicial	Espes Final	Espes Media	Semi-Espes 4 mm	Semi-Espes 7 mm	Semi-Espes 10 mm
1	4,00	0,60	2,30	1,15		
2	4,00	1,11	2,56	1,28		
3	4,00	1,10	2,55	1,28		
4	10,00	3,18	6,59			3,30
5	10,00	2,92	6,46			3,23
6	10,00	3,74	6,87			3,44
7	7,00	2,65	4,83		2,41	
8	7,00	1,36	4,18		2,09	
9	7,00	1,81	4,41		2,20	
10	4,00	1,45	2,73	1,36		
11	4,00	1,10	2,55	1,28		
12	4,00	1,06	2,53	1,27		
13	10,00	3,33	6,67			3,33
14	10,00	3,60	6,80			3,40
15	10,00	3,17	6,59			3,29
16	7,00	2,38	4,69		2,35	
17	7,00	1,55	4,28		2,14	
18	7,00	2,02	4,51		2,26	
19	4,00	1,13	2,57	1,28		
20	4,00	0,86	2,43	1,22		
21	4,00	0,98	2,49	1,25		
22	10,00	3,01	6,51			3,25
23	10,00	2,93	6,47			3,23
24	10,00	3,90	6,95			3,48
25	7,00	2,98	4,99		2,50	
26	7,00	1,97	4,49		2,24	
27	7,00	1,85	4,43		2,21	
			MEDIA	1,28	2,21	3,29

Conforme os dados obtidos nos experimentos, de conteúdo de umidade, área, espessura e densidade das amostras, utilizou-se para a obtenção dos resultados a seguir:

Inicialmente foram obtidas as espessuras médias de cada amostra, conforme Tabela 3.7, cujo valor é a média entre a espessura inicial e final da amostra. Também se observa na Tabela 3.7, que as três últimas colunas da direita contém os valores da semi-espessura, que é a metade da média de cada amostra, e ao fim da tabela, observa-se essas médias.

A energia de ativação foi determinada pela linearização da equação de Arrhenius, a qual relaciona a dependência da difusividade efetiva em função da temperatura, conforme a Equação 3.9.

$$D_{ef} = D_o \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (3.9)$$

O modelo difusional de Fick, aplicado aos dados experimentais mostrou que o coeficiente de correlação ficou em torno de 0,9905, confirmando a validade do modelo. O critério de convergência utilizado foi a repetibilidade até a terceira casa decimal no valor ajustado do coeficiente de difusão encontrado, que apresentou valores variando entre 7,43 a $24,75 \times 10^{-10}$ m²/s, cujos valores estão dentro da ordem de magnitude encontrado na literatura para outros produtos agrícolas, como também para o caju como citado por ARAGÃO (2007), que apresentou resultados que variaram de 6,33 a $23,1 \times 10^{-10}$ m²/s.

Com relação ao efeito da temperatura do ar de secagem, foi testada a aplicabilidade da equação de Arrhenius, Equação 3.9, que aplicada aos valores dos coeficientes de difusão efetiva do caju, encontrou-se uma energia de ativação de 24,86 kJ/mol, apresentando valores abaixo do informado por ARAGÃO (2007), que obteve 35,3 kJ/mol. Já em outras literaturas manteve-se na faixa, como o GOUVEIA (1999) que estudando o gengibre encontrou valores para a energia de ativação que variaram entre 21,9 e 39,9 kJ/mol, e MASSA e LEMAGEUR (1980) encontraram uma energia de ativação de 21,6 kJ/mol para fatias de cebola.

SUAREZ e VIOLLAZ (1991) observaram o encolhimento em batatas fatiadas com diferentes conteúdos de umidade e diferentes densidades do material. A variação da área superficial com o tempo foi medida, inicialmente, considerando o grau de encolhimento da amostra. Foi encontrado que, para tempos de secagem, relativamente

pequenos, o modelo de Fick, com encolhimento, representa bem os dados experimentais com o coeficiente de difusão independente do teor de umidade. No entanto, em termos do modelo difusional, os dados experimentais predizem uma grande dependência do coeficiente de difusão com o teor de umidade.

Nos valores calculados para a difusividade, citado anteriormente, a semi-espessura considerada foi a inicial de cada amostra, na qual se presume que não houve encolhimento. Neste trabalho, para amenizar os efeitos do encolhimento nos resultados, utilizou-se a média da semi-espessura, conforme Tabela 3.7. Desta forma a difusividade efetiva apresentou valores mais altos, variando entre 0,43 a $2,69 \times 10^{-9}$ m²/s, conforme Tabela 3.8, e mostrando que o encolhimento tem influencia na difusividade efetiva do material. A partir destes valores, foi obtida uma correlação da difusividade com a temperatura e velocidade do ar de secagem, conforme se segue:

$$D_{eff} = -1,46787 \times 10^{-9} + 0,03687 \times 10^{-9} T + 0,09997 \times 10^{-9} V \quad (3.10)$$

Tabela 3.8. Difusividade média experimental.

CONDIÇÃO EXPERIMENTAL	DIFUSIVIDADE EFETIVA MÉDIA
Temp.=81,3 °C Vel.=6,4 m/s Esp.=0,004 m	2,29E-09
Temp.=71,6 °C Vel.=5,7 m/s Esp.=0,004 m	1,81E-09
Temp.=61,1 °C Vel.=6,4 m/s Esp.=0,004 m	7,70E-10
Temp.=80,9 °C Vel.=4,9 m/s Esp.=0,004 m	1,20E-09
Temp.=69,7 °C Vel.=5,2 m/s Esp.=0,004 m	4,30E-10
Temp.=61,5 °C Vel.=4,9 m/s Esp.=0,004 m	1,23E-09
Temp.=81,3 °C Vel.=3,6 m/s Esp.=0,004 m	1,33E-09
Temp.=71,1 °C Vel.=3,7 m/s Esp.=0,004 m	6,10E-10
Temp.=62,3 °C Vel.=3,6 m/s Esp.=0,004 m	1,54E-09
Temp.=80,9 °C Vel.=5,9 m/s Esp.=0,007 m	2,46E-09
Temp.=72,5 °C Vel.=6,1 m/s Esp.=0,007 m	1,83E-09
Temp.=61,5 °C Vel.=6,0 m/s Esp.=0,007 m	7,80E-10
Temp.=81,7 °C Vel.=5,1 m/s Esp.=0,007 m	2,33E-09
Temp.=72,6 °C Vel.=5,2 m/s Esp.=0,007 m	2,03E-09
Temp.=61,8 °C Vel.=5,0 m/s Esp.=0,007 m	1,50E-09
Temp.=80,9 °C Vel.=3,5 m/s Esp.=0,007 m	1,33E-09
Temp.=70,6 °C Vel.=3,7 m/s Esp.=0,007 m	1,41E-09
Temp.=61,5 °C Vel.=3,6 m/s Esp.=0,007 m	1,53E-09
Temp.=80,0 °C Vel.=6,7 m/s Esp.=0,010 m	2,37E-09
Temp.=69,4 °C Vel.=6,5 m/s Esp.=0,010 m	2,08E-09
Temp.=60,5 °C Vel.=6,2 m/s Esp.=0,010 m	1,75E-09
Temp.=82,3 °C Vel.=5,0 m/s Esp.=0,010 m	2,10E-09
Temp.=71,1 °C Vel.=5,0 m/s Esp.=0,010 m	2,21E-09
Temp.=62,8 °C Vel.=5,2 m/s Esp.=0,010 m	1,58E-09
Temp.=79,9 °C Vel.=3,9 m/s Esp.=0,010 m	2,54E-09
Temp.=71,7 °C Vel.=3,6 m/s Esp.=0,010 m	2,69E-09
Temp.=61,5 °C Vel.=4,1 m/s Esp.=0,010 m	1,04E-09

3.6. Encolhimento

Segundo GOUVEIA (1999), o encolhimento de materiais biológicos não é perfeitamente homogêneo. No estágio inicial de secagem, as partículas permanecem com a sua geometria original, na qual vão se deformando com o decorrer do processo e a partir daí é possível a obtenção da área diretamente através de um planímetro.



Figura 3.75. Instrumento para planimetria do diâmetro da amostra

Para este trabalho utilizou-se dois sistemas de acompanhamento do encolhimento de fatias de caju, a fim de conhecer seu comportamento durante o processo de secagem. O primeiro foi o acompanhamento do encolhimento do diâmetro, como mostra a Figura 3.75 cujas amostras eram fotografadas na mesma frequência em que eram pesadas, e o outro sistema foi utilizado para o acompanhamento do encolhimento da espessura, Figura 3.76, que era medido no início e no final de cada secagem.



Figura 3.76. Instrumento para planimetria da espessura da amostra

Para o estudo do encolhimento do diâmetro, confeccionou-se uma estrutura em alumínio com um fundo em acrílico com escalas milimétricas em três sentidos, conforme mostra a Figura 3.77. E para o estudo do encolhimento da espessura foi montado um aparato com a utilização de um micrometro, cuja mola de sua catraca foi substituída por uma de menor intensidade, a fim de diminuir os efeitos do esmagamento da amostra no momento da leitura.



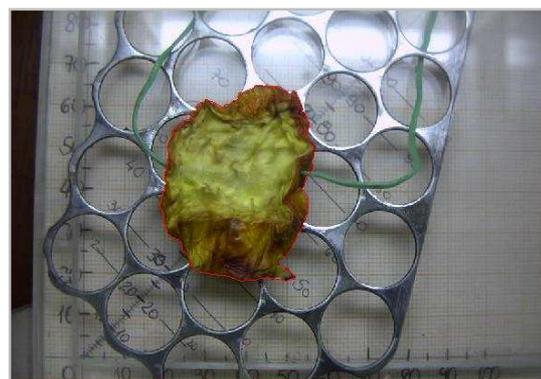
Figura 3.77. Detalhe do planímetro.

As fotos eram obtidas conjuntamente com os demais parâmetros medidos. Então estas fotos foram manipuladas no software AUTOCAD para obter as áreas (detalhes do contorno em vermelho), conforme Figuras 3.78 e 3.79, início e fim da secagem, respectivamente.



NOME DO ARQUIVO
PDRM0001
ÁREA mm²
3582.3075

Figura 3.78. Calculo da área da amostra no início da secagem



NOME DO ARQUIVO
PDRM0032
ÁREA mm²
1505.1167

Figura 3.79. Calculo da área da amostra no fim da secagem

Foi feito um estudo da relação entre o encolhimento da área, diâmetro da fatia de caju, e a perda de umidade, através da adimensionalização das áreas, dividindo-se a área a cada tempo, pela área inicial. Observou-se que uma curva polinomial de segunda ordem se ajustou muito bem, conforme a Figura 3.80.

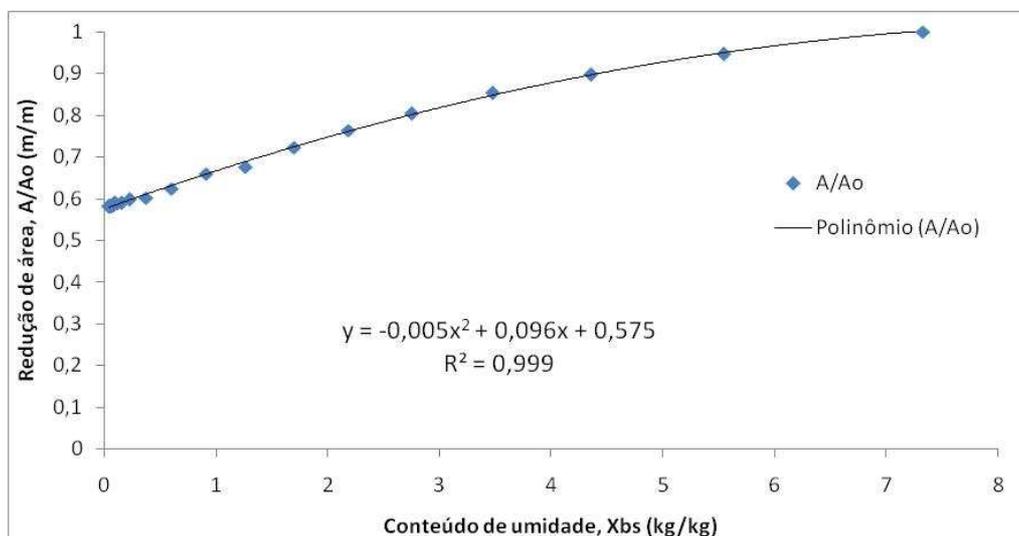


Figura 3.80. Comparativo do encolhimento e da perda de umidade da amostra.

Com os dados de encolhimento da área e os modelos de SUZUKI et al. (1976) foi possível correlacionar os valores experimentais através de regressão não linear de forma a se obter os valores dos coeficientes de encolhimento n , para os modelos apresentados por eles.

Os valores experimentais de densidade inicial (ρ_o), densidade de equilíbrio (ρ_e), conteúdo de umidade (X), conteúdo de umidade de equilíbrio (X_e) e encolhimento (A/A_o), obtidos através de fotografias tiradas durante a secagem (planimetria), foi possível obter através de regressão não linear os valores do coeficiente de encolhimento (n), mediante os modelos seguir.

Modelo uniforme 1: Neste modelo, o encolhimento foi considerado igual ao volume de água perdida por evaporação durante todo o processo de secagem e a mudança na área superficial, devido ao encolhimento, sendo expressa na seguinte equação para materiais de superfície cúbica e esférica:

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{V}{V_o}\right)^n \quad (3.11)$$

Como o volume da amostra que foi submetida à secagem, é igual a soma do volume da água perdida e o volume no ponto de equilíbrio, a equação se converte a:

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{V_e + (\rho - \rho_e) / \rho_{H_2O}}{V_e + (\rho_o - \rho_e) / \rho_{H_2O}} \right)^n \quad (3.12)$$

Considerando a densidade da água 1,0 g/cm³, tem-se que:

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{\rho + \rho_e \left(\frac{1}{\rho_e} - 1 \right)}{\rho_o + \rho_e \left(\frac{1}{\rho_e} - 1 \right)} \right)^n \quad (3.13)$$

Rearranjando-se a Equação 3.13, tem-se o modelo Uniforme 1:

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{X+a}{X_o+a} \right)^n \quad (3.14)$$

sendo,

$$a = X_e \left(\frac{1}{\rho_e - 1} \right) + \frac{1}{\rho_e} \quad (3.15)$$

onde n é o coeficiente de encolhimento.

Modelo uniforme 2: Este modelo é função do conteúdo de umidade e densidades iniciais do produto, sendo expresso pela seguinte equação;

$$\frac{A}{A_o} = (bX + c)^n \quad (3.16)$$

sendo,

$$b = \frac{\rho_o}{(X_o + 1)} \quad (3.17)$$

$$c = 1 + b - \rho_o \quad (3.18)$$

Na Equação 3.14, os parâmetros do numerador e denominador são os mesmos e dependem somente do conteúdo de umidade de equilíbrio e da densidade no ponto de

equilíbrio. Se a Equação 3.16 for escolhida para valores experimentais, a mudança na área superficial pode ser calculada pela substituição dos valores iniciais do conteúdo de umidade e densidade do material, os quais são facilmente medidos.

Modelo central: Este modelo baseia-se na suposição de que durante o processo de secagem se forma uma camada seca na superfície do material submetido a secagem e o centro do material permanece com um teor de umidade mais elevado. Se a densidade do material no seu ponto central é igual a sua densidade no ponto de equilíbrio de secagem, a área superficial para o conteúdo médio de umidade pode ser expressa pela equação;

$$\frac{A}{A_0} = (kX + p)^n \quad (3.19)$$

Sendo,

$$k = \frac{(p-\mu)}{(X_0-X_e)} \quad (3.20)$$

$$p = \frac{(\mu X_0 - X_e)}{(X_0 - X_e)} \quad (3.21)$$

$$\mu = \frac{(X_0+1)\rho_0}{(X_0+1)\rho_e} \quad (3.22)$$

A Equação 3.19 representa o encolhimento quando este é proporcional ao volume de água perdida durante a secagem.

A ferramenta utilizada para os ajustes foi o programa computacional STATISTICA. Os critérios usados para escolha do melhor ajuste foram o coeficiente de determinação (r^2) entre as respostas observadas e os valores previstos pelo modelo ajustado (BARROS NETO et al., 1995) e o módulo do desvio relativo médio (P), definido como a média da porcentagem de diferença relativa entre valores experimentais e preditos (LOMAURO et al., 1985).

Na secagem de alimentos, a transferência de massa ocorre por difusão interna e a transferência de calor é controlada externamente (CAPRISTE et al., 1988). O encolhimento durante a secagem pode mudar com a resistência à transferência de umidade. Uma baixa velocidade do ar, predominando em uma superfície de resistência, mostra que os perfis de umidade nas amostras são relativamente invariáveis e as tensões internas são mínimas, portanto, alimentos com encolhimento uniforme.

Em ajuste de curvas, utilizando uma comparação dos três modelos sugeridos por Suzuki apresentados nas Equações 3.14, 3.16 e 3.19, e uma equação polinomial de

segunda ordem obtida diretamente dos resultados experimentais, representado pela Equação 3.23. Pode-se observar que os três modelos se ajustaram satisfatoriamente e o modelo Central não se ajustou aos dados experimentais. Apesar do modelo de secagem Uniforme 1 ter apresentado os valores de r^2 mais elevado, os demais modelos, Uniforme 2 e Observado experimentalmente também podem representar satisfatoriamente o encolhimento de fatias de caju, como demonstra a Tabela 3.9.

$$\frac{A}{A_0} = a(X_{bs}^2) + b(X_{bs}) + c \quad (3.23)$$

Tabela 3.9. Comparativo dos modelos de encolhimento

		4 mm			7 mm			10 mm		
		r2	RMSE	x2	r2	RMSE	x2	r2	RMSE	x2
Uniforme I	$A/A_0 = ((x+1.1178)/8.4478)^n$	0,9767	0,0278	0,0009	0,9748	0,0294	0,0011	0,8997	0,0547	0,0034
Uniforme II	$A/A_0 = (1.1096 * x + 0.1966)^n$	0,9255	0,0659	0,1858	0,8804	0,0671	0,2341	0,7674	0,0820	0,1997
Central	$A/A_0 = (-0.000068 * x + 0.8318)^n$	0,0073	0,0194	0,0354	0,0210	0,0284	0,0379	0,0087	0,0181	0,0338
Observado Exp.	$A/A_0 = a * (x^2) + b * x + c$	0,9493	0,0415	0,0018	0,9504	0,0429	0,0019	0,8795	0,0603	0,0041

Tabela 3.10. Coeficientes utilizados para prever encolhimento do diâmetro da amostra.

Espessura inicial de 0,004 m		
a = -0,000000106942210 + 0,000000000153765 * T + 0,000000015410868 * V		
b = 0,294576169706096 - 0,000562868653174 * T - 0,003294553370640 * V		
c = -0,600189864457442 + 0,002719788747121 * T + 0,016955578209317 * V		
r^2	RMSE	x^2
0,949326	0,041494	0,001844

Espessura inicial de 0,007 m		
a = -0,000000012005033 + 0,000000000034177 * T + 0,000000000096293 * V		
b = 0,284935192823602 - 0,000515334285116 * T - 0,002466975460829 * V		
c = 0,116053287487561 + 0,000374236721963 * T + 0,026970989628548 * V		
r^2	RMSE	x^2
0,950412	0,04291	0,001946

Espessura inicial de 0,010 m		
a = 0,000000259055044 - 0,000000000692896 * T - 0,000000001969336 * V		
b = 0,091053900282621 + 0,000020514061862 * T - 0,001951694585186 * V		
c = 0,185761157218744 + 0,000446418769361 * T + 0,018087343538229 * V		
r^2	RMSE	x^2
0,879539	0,060282	0,004149

Mediante os experimentos, foi possível concluir que o encolhimento do caju não é perfeitamente homogêneo, nem pelo diâmetro e nem pela espessura. Neste trabalho se utilizou a equação polinomial de segunda ordem para descrever o encolhimento do diâmetro das fatias de caju, cujos coeficientes foram obtidos através dos ajustes de curvas com os dados experimentais do conteúdo de umidade X_{bs} . Estes coeficientes estão em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e da velocidade do ar de secagem (m/s), para cada espessura ensaiada, 0,004, 0,007 e 0,010 m, como mostrado na Tabela 3.10.

Para o estudo do encolhimento da espessura da fatia de caju, não foi apropriado utilizar a mesma relação utilizada para o encolhimento do diâmetro, devido a existência de apenas dois pontos experimentais, isto é, a espessura inicial e a final de cada amostra, mostrando uma equação linear, cujos coeficientes foram obtidos através dos ajustes de curvas com os dados experimentais do conteúdo de umidade X_{bs} .

$$e = a X_{bs} + b \quad (3.24)$$

Os coeficientes obtidos estão em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e da velocidade do ar de secagem (m/s), para cada espessura ensaiada, 0,004, 0,007 e 0,010 m, como mostrado na Tabela 3.11.

Tabela 3.11. Coeficientes utilizados para prever o encolhimento da espessura.

Espessura inicial de 0,004 m		
a = 0,452020006772219 - 0,000168173322410 * T + 0,003161418679030 * V		
b = 0,685186618860964 + 0,001233271029792 * T - 0,023183737041160 * V		
r^2	RMSE	x^2
0,989597	0,159955	0,025848

Espessura inicial de 0,007 m		
a = 1,939075790764553 - 0,003657244030946 * T + 0,003187559193369 * V		
b = -7,219889160006525 + 0,026819789644301 * T - 0,023375434142153 * V		
r^2	RMSE	x^2
0,991577	0,245542	0,060719

Espessura inicial de 0,010 m		
a = 0,192452974542488 + 0,002200339542008 * T - 0,003626302574185 * V		
b = 8,588678184290904 - 0,016135823300074 * T + 0,026592885556248 * V		
r^2	RMSE	x^2
0,997103	0,193485	0,037606

4. MODELOS EMPÍRICOS DE SECAGEM

Na maioria das pesquisas e estudos da engenharia é necessário o estudo de experimentos e a coleta de dados para seu desenvolvimento. Estes estudos precisam de tratamentos matemáticos, usando ajustes de curvas, que possam simular e prever o comportamento físico destes fenômenos em estudos, para quaisquer condições possíveis. Entre os modelos numéricos para ajustes de curvas mais conhecidos tem-se as regressões lineares e não-lineares mediante os quadrados mínimos.

Estes métodos tratam de interpretar comportamentos físicos mediante equações matemáticas comuns; polinômios, logarítmicas e outros, considerando erros e resíduos que podem estimar qual a melhor equação. Para ajudar nesta interpretação, a estatística é parte essencial na validação destas equações e modelos, já que esta ciência permite estimar a probabilidade de exatidão dos resultados (DEVORE, 2006).

Procedimentos experimentais frequentemente geram uma série de dados a respeito do fenômeno que está sendo observado. Para tentar explicá-los, modelos matemáticos são construídos a partir dos fundamentos que regem esse fenômeno. Para a comprovação efetiva desses modelos, resultados experimentais são confrontados com resultados teóricos seguindo uma série de procedimentos de forma a assegurar confiabilidade dos mesmos.

Uma das formas de se comparar dados experimentais a modelos matemáticos é ajustando esses dados através de métodos numéricos a um determinado modelo e avaliando seu comportamento. Isto é, verificando se o modelo se comporta de forma semelhante ao experimento. Porém, em se tratando de resultados científicos, a simples avaliação qualitativa não é suficiente para se chegar a conclusões. Assim, deve-se nesse momento recorrer a métodos estatísticos que podem quantifiquem essa avaliação.

Dentre os métodos numéricos utilizados para o tratamento de dados experimentais está o ajuste de curvas. Esse método é aplicado quando se tem uma série de dados finitos e se quer uma função na qual se possa obter dados intermediários. Em estudos de engenharia normalmente o dados levantados contém uma série de incertezas e alguns métodos utilizados para determinar pontos intermediários podem não levar a resultados satisfatórios.

Quando isso ocorre deve-se procurar um método que minimize as discrepâncias entre os dados e a curva. Uma das técnicas que levam em conta este fator é a regressão por mínimos quadrados.

A técnica dos mínimos quadrados busca minimizar o somatório dos quadrados dos resíduos entre os dados medidos (experimentais) e os dados calculados pelos modelos sugeridos por diversos autores. A regressão utilizando a técnica dos mínimos quadrados pode ser tanto linear quanto não-linear dependendo do modelo que se está utilizando.

Equações para fatias finas de frutas são usadas para estimar o tempo de secagem delas e também para generalizar as curvas de secagem. Vários autores têm proposto numerosos modelos matemáticos para secagem em fatias fina nos diversos produtos agrícolas. Por exemplo, para maçãs, MENGES e ERTEKIN (2006) e AKPINAR (2006); para damascos, TOGRUL e PEHLIVAN (2002); para figos, XANTHOPOULOS et al. (2007); para pimentão, AKPINAR e BICER (2008), e para batatas e abóboras, AKPINAR (2006).

XANTHOPOULOS et al. (2007), TOGRUL e PEHLIVAN (2002) e AKPINAR e BICER(2008), usaram modelos específicos, encontrados na literatura, para simular o comportamento de secagem de frutas usando diferentes métodos de secagem como o uso de fonte solar, bombas de calor e outros, para poderem levantar modelos gerais que simulem o comportamento da taxa de umidade para qualquer tipo de condição e procedimento. Para todos os artigos o modelo logarítmico foi que apresentou um melhor comportamento segundo os parâmetros estatísticos, anteriormente nomeados, simulando a perda de umidade destas frutas para qualquer condição de temperatura, velocidade e umidade absoluta.

Para a resolução dos procedimentos numéricos podem ser utilizadas ferramentas computacionais, como o MATLAB e o STATISTICA, para realizem as regressões respectivas, lineares e não lineares segundo o modelo a estudar. Além deste, pode-se utilizar para construção de gráficos e tabelas, o Microsoft Excel.

Deve-se procurar um método que minimize as discrepâncias entre os dados experimentais e os previstos pelos modelos. Uma das técnicas que levam em conta este fator é a regressão por mínimos quadrados. Esta técnica busca minimizar o somatório dos quadrados dos resíduos entre os dados medidos (experimentais) e os dados calculados por alguns tipos de modelos. A regressão utilizando a técnica dos mínimos quadrados pode ser tanto linear quanto não-linear dependendo do modelo que se está utilizando. O método dos mínimos quadrados possibilita o cálculo do parâmetro chamado coeficiente de determinação, que é uma relação entre as discrepâncias do

modelo com os dados experimentais, e as discrepâncias entre os dados e o valor médio desses dados.

A determinação final do material durante a secagem foi realizada por perda de massa, pesando-se o material a cada 20 minutos em uma balança localizada do lado externo ao secador. Este procedimento foi repetido até que o material atingisse um peso constante, indicando desta forma a umidade final. A partir destes dados, foi calculado o teor de umidade, que é a razão direta entre a massa de água presente no material e a massa de matéria seca, cujo valor de umidade para o caju é de 88%, conforme TACO (2006). Por fim, estes valores foram adimensionalizados através da Equação (4.1), como prevê a maioria dos trabalhos achados na literatura.

$$XR = \frac{(X - X_e)}{(X_o - X_e)} \quad (4.1)$$

onde, X é a umidade para cada instante de tempo, X_e é a umidade de equilíbrio, e o X_o é a umidade inicial.

Segundo ARAGÃO (2007), o estudo da curva de sorção, que relaciona a atividade de água com o teor de umidade de equilíbrio do produto, fornece informações relevantes para adequação dos parâmetros de secagem. A determinação da atividade de água é uma das medidas mais importantes no processamento e na análise dos materiais biológicos, devido a sua importância no que diz respeito à qualidade e estabilidade do produto. Também neste trabalho, o autor descreve que obteve a isoterma de sorção para o caju e utilizou estes dados para ajustar modelos encontrados na literatura. O autor observou que o modelo do GAB, segundo a Equação 4.2, foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, em relação aos demais modelos, e apresentou os coeficientes do modelo GAB em função da temperatura, conforme as Equações 4.3 e 4.4.

$$X_e = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (4.2)$$

onde X_e é a umidade de equilíbrio, X_m é a umidade na monocamada que para o caju seu valor é de $0,15 \pm 0,01$ kg/kg, conforme ARAGÃO (2007), a_w é atividade de água, C é uma constante relacionada com o calor de sorção da monocamada, e K é uma constante relacionada com o calor total de sorção.

$$C = 0,1232 \exp \left(\frac{964,103}{T} \right) \quad (4.3)$$

$$K = 0,4770 \exp \left(\frac{225,683}{T} \right) \quad (4.4)$$

A atividade da água define-se como a relação existente entre a pressão de vapor de uma solução ou de um alimento (P) com relação à pressão de vapor da água pura (P_o) à mesma temperatura. A a_w de um alimento e a umidade relativa do ambiente no qual se encontra tendem sempre a equilibrar-se, e por isso, é comum expressar-se como umidade relativa de equilíbrio - UR_{eq} (%), conforme a Equação 4.5.

$$a_w = \frac{UR_{eq}}{100} \quad (4.5)$$

Para cada temperatura e umidade relativa do ar de secagem chegou-se aos valores das umidades de equilíbrio de cada experimento, conforme mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Umidade de equilíbrio para cada condição experimental.

Temp.	UR	Xe	Temp.	UR	Xe	Temp.	UR	Xe
61,11	10,67	0,03	71,62	7,14	0,02	81,26	4,20	0,01
60,45	11,36	0,03	69,42	7,25	0,02	79,97	4,71	0,01
61,48	10,79	0,03	72,50	6,62	0,02	80,94	4,76	0,01
61,45	9,75	0,03	69,72	7,66	0,02	80,89	4,39	0,01
62,76	8,82	0,03	71,05	6,74	0,02	82,26	4,31	0,01
61,77	11,33	0,03	72,55	6,11	0,02	81,71	4,63	0,01
62,29	10,52	0,03	71,07	7,23	0,02	81,27	4,49	0,01
61,51	10,39	0,03	71,69	6,71	0,02	79,90	4,39	0,01
61,46	10,74	0,03	70,61	7,51	0,02	80,88	4,39	0,01

Os 11 modelos apresentados na Tabela 4.2, foram individualmente ajustados aos dados experimentais do conteúdo de umidade adimensional. Outros autores utilizaram estes modelos, a fim de verificar o que representasse melhor o processo de secagem de produtos agrícolas, como por exemplo: MOHAMMADI et al.(2009), secou kiwi; MENGES e ERTEKIN (2006), secaram maçãs; TOGRUL e PEHLIVAN (2003), secaram damascos; XANTHOPOULOS et al.(2007), secaram figos; ALPICAR e BICER (2008), secaram pimentão, e AKPINAR (2006), secou batatas e abóboras.

Tabela 4.2 – Modelos matemáticos aplicados em curvas de secagem.

Nome do Modelo	Expressão	Referencias	Eq.
Page	$XR = \exp(-kt^n)$	Park et al. (2002)	(4.6)
Newton	$XR = \exp(-kt)$	Mujundar. (1987)	(4.7)
Henderson & Pabis	$XR = a \exp(-kt)$	Zhang and Litchfield (1991)	(4.8)
Logarithmic	$XR = a \exp(-kt) + c$	Yaldiz and Ertekin (2001)	(4.9)
Wang & Singh	$XR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh (1978)	(4.10)
Midilli et al.	$XR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al. (2002)	(4.11)
Two-term	$XR = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1t)$	Henderson et al.(1974)	(4.12)
Werma et al.	$XR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	Werma et al. (1985)	(4.13)
Simplified Fick's diffus. Equat.	$XR = a \exp(-c(t/L^2))$	Diamante and Munro (1991)	(4.14)
Modified page equations II	$XR = \exp(-k(t/L^2)^n)$	Diamante and Munro (1991)	(4.15)
Modified Henderson & Pabis	$XR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Togrul and Pehlivan (2003)	(4.16)

Para a avaliação quantitativa da relação entre os dados obtidos das curvas ajustadas e os dados experimentais, é necessário o uso de parâmetros estatísticos tais como:

O coeficiente de determinação (r^2), o qual indica que tão exatos são os valores simulados dos reais em função da linha reta, isto é, a proximidade de todos os valores terem o mesmo valor para cada condição no tempo, temperatura e velocidade do ar. Apesar disto, nem sempre se pode afirmar que para valores de (r^2) próximos de uma unidade, representam um bom ajuste, já que é possível obter valores elevados de (r^2) quando a relação entre os dados reais e simulados não representam um comportamento linear.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (XR_{pred,i} - XR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{XR}_{pred} - XR_{pred,i})^2} \quad (4.17)$$

onde, XR_{pred} é o conteúdo de unidade adimensional predito, e XR_{exp} é o conteúdo de unidade adimensional do experimento.

O Quadrado reduzido (χ^2) é outro parâmetro que compara as variações entre resultados experimentais e preditos. Este parâmetro permite determinar realmente se é possível representar um conjunto de valores como distribuição normal, e verificar se este conjunto encontra-se dentro dos valores de probabilidade que permitem definir o mesmo.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (XR_{\text{exp},i} - XR_{\text{pred},i})^2}{N - n} \quad (4.18)$$

onde N é o numero de observações e n é o numero de coeficientes.

O erro médio quadrado (*RMSE*), é a variabilidade média da distância entre o valor predito e o observado. Este índice dá-nos a ideia da diferença existente entre a matriz de variância e covariância da amostra e a matriz do modelo obtido, partindo do pressuposto que o modelo é adequado. Os valores superiores a 0,10 evidenciam um ajuste fraco (BROWNE e CUDECK, 1993), quando oscilam entre 0,08 e 0,10 refletem um ajuste medíocre, entre 0,08 e 0,06 um ajuste razoável e quando são inferiores a 0,06 indicam um bom ajuste. Quando o modelo é perfeito o *RMSE* é igual a zero, neste sentido, quanto mais próximo de 0 (zero) for o seu valor, maior é a proximidade entre a matriz de variâncias e covariâncias estimada e a matriz dos dados, dando desta forma maior segurança em não rejeitar o modelo obtido.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (XR_{\text{pred},i} - XR_{\text{exp},i})^2 \right]^{1/2} \quad (4.19)$$

Foram realizadas regressões não lineares para obter os coeficientes dos modelos nas diferentes condições de operação e regressões lineares para o ajuste total dos resultados, ou seja, a geração de modelos em função das condições de temperatura e velocidade de operação.

Os dados do conteúdo de umidade utilizados para investigação de cada modelo foram separados conforme as espessuras iniciais, 0,004, 0,007 e 0,010 m, para as diversas temperaturas e velocidades como comentadas acima. Os 11 modelos foram comparados em conformidade com os seus resultados estatísticos, como r^2 , *RMSE*, e χ^2 , mostrados na Tabela 4.3.

Pode-se observar que o modelo que apresentou o pior resultado foi o Wang & Singh, cujos valores do coeficiente de determinação (r^2) foram $5,60 \times 10^{-1}$, $8,51 \times 10^{-1}$, $9,40 \times 10^{-1}$ para as espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010m, respectivamente. Além disso, BROWNE e CUDECK, (1993), afirmam que quando os valores de *RMSE* são superiores a 0,10 evidenciam um ajuste fraco, portanto pode-se concluir que este modelo não representa bem a secagem de caju em fatias para as condições experimentais.

Tabela 4.3. Resultados estatísticos dos modelos matemáticos aplicados nas curvas médias de secagem.

	0,004 m			0,007 m			0,010 m		
	r2	RMSE	χ^2	r2	RMSE	χ^2	r2	RMSE	χ^2
Page	9,973E-01	1,652E-02	2,802E-04	9,815E-01	3,916E-02	1,551E-03	9,945E-01	2,017E-02	4,123E-04
Newton	9,970E-01	1,715E-02	2,989E-04	9,959E-01	1,823E-02	3,518E-04	9,953E-01	1,851E-02	3,808E-04
Henderson & Pabis	9,971E-01	1,710E-02	3,007E-04	9,960E-01	1,803E-02	3,429E-04	9,955E-01	1,807E-02	3,679E-04
Logarithmic	9,972E-01	1,676E-02	2,857E-04	9,958E-01	1,871E-02	3,529E-04	9,960E-01	1,724E-02	2,996E-04
Wang & Singh	5,600E-01	2,781E-01	8,350E-02	8,509E-01	1,275E-01	1,934E-02	9,399E-01	7,892E-02	8,230E-03
Midilli	9,970E-01	1,744E-02	3,172E-04	9,799E-01	4,070E-02	1,703E-03	9,942E-01	2,051E-02	4,476E-04
Two-term	9,969E-01	1,754E-02	3,262E-04	9,960E-01	1,805E-02	3,490E-04	9,955E-01	1,808E-02	3,696E-04
Werma et al.	9,970E-01	1,713E-02	3,063E-04	9,966E-01	1,655E-02	3,085E-04	9,958E-01	1,740E-02	3,619E-04
Simplified Fick's diff. eq.	9,971E-01	1,710E-02	3,007E-04	9,960E-01	1,803E-02	3,429E-04	9,955E-01	1,807E-02	3,679E-04
Modified page eq. II	9,975E-01	1,577E-02	2,573E-04	9,945E-01	2,101E-02	4,801E-04	9,958E-01	1,743E-02	3,586E-04
Modif. Henderson & Pabis	9,972E-01	1,669E-02	2,976E-04	9,008E-01	9,108E-02	9,539E-03	9,950E-01	1,892E-02	4,073E-04

Dos resultados obtidos, pode-se observar que os valores do coeficiente de determinação (r^2) e o (χ^2) estão bem próximos entre os demais modelos, e os valores do RMSE estão abaixo de 0,06 que conforme BROWNE e CUDECK (1993), indica um bom ajuste destes modelos. O critério utilizado para se avaliar o melhor modelo, foi a procura daquele que tivesse o menor *RMSE* e χ^2 , desta forma os modelos Modified Page equation II, Werma et al., e Logarithmic, mostraram-se levemente melhores em relação aos demais, para as espessuras iniciais de 0,004, 0,007 e 0,010m, respectivamente. Portanto, pode-se concluir que todos os modelos apresentados, com exceção do modelo de Wang & Singh, representam bem a secagem de caju em fatias.

Para levar em conta o efeito das variáveis de secagem sobre os coeficientes dos modelos de Modified Page equation II, Werma et al., e Logarithmic, conforme as Equações 4.15, 4.13 e 4.9 da Tabela 4.2 respectivamente, estes coeficientes foram correlacionados com a temperatura e velocidade do ar de secagem para cada condição de ensaio, nas especificadas espessuras das amostras, através da análise de regressão múltipla. Baseado nestas análises as correlações e os coeficientes foram os seguintes, conforme a Tabela 4.4.

Substituindo os valores das temperaturas e velocidades do ar nas equações da Tabela 4.4, obtiveram-se os valores dos coeficientes de cada modelo, que foram substituídas nas próprias equações, resultando ao final os valores de *XR* para cada tempo. Os valores de *XR* dos modelos foram comparados aos do experimento e graficados conforme figuras abaixo, salientando os modelos que melhor se apresentaram para cada espessura utilizada.

Tabela 4.4. Correlações dos coeficientes dos modelos com a temperatura e velocidade.

	0,004 m	0,007 m	0,010 m
Modelo Modified Page Equation II			
k	$-0,1424 + 0,0019*T + 0,0188*V$	$-0,2109 + 0,0032*T + 0,0217*V$	$-0,1649 + 0,0034*T + 0,0136*V$
n	$0,9242 + 0,0020*T - 0,0178*V$	$1,1349 - 0,0010*T - 0,0167*V$	$0,9990 + 0,0008*T - 0,0151*V$
Modelo Werma et al.			
a	$0,1123 - 0,0030*T + 0,0266*V$	$-0,1581 + 0,0004*T + 0,0322*V$	$0,1499 - 0,0026*T + 0,0105*V$
k	$-0,4110 + 0,0059*T + 0,1750*V$	$0,4285 - 0,0014*T + 0,0039*V$	$3,6975 - 0,0111*T - 0,4174*V$
g	$-0,1032 + 0,0016*T + 0,0076*V$	$-0,0239 + 0,0005*T + 0,0022*V$	$-0,0163 + 0,0003*T + 0,0006*V$
Modelo Logarithmic			
a	$1,0062 + 0,0002*T - 0,0041*V$	$1,0962 - 0,0008*T - 0,0056*V$	$1,0372 + 0,0007*T - 0,0165*V$
k	$-0,0962 + 0,0014*T + 0,0087*V$	$-0,0322 + 0,0005*T + 0,0031*V$	$-0,0146 + 0,0003*T + 0,0006*V$
c	$-0,0020 - 0,0001*T + 0,0025*V$	$-0,0556 + 0,0005*T + 0,0021*V$	$-0,0321 + 0,0001*T + 0,0027*V$

As Figuras 4.1 a 4.3 mostram a comparação dos três modelos selecionados, considerando a temperatura de secagem 80 °C, a velocidade 4 m/s, e as espessuras são 0,004, 0,007 e 0,010 m respectivamente. Pode-se ver que os três modelos apresentam uma boa concordância com os dados experimentais. O modelo Modified Page equation II considera explicitamente em sua equação a espessura da amostra. Como este material apresenta encolhimento durante a secagem, foi necessária a utilização de valores médios da espessura durante o estudo estatístico. Então o termo L da equação é um valor variável e que consideraram os valores iniciais e fixos da espessura, e isto acarretou uma diferença bastante significativa entre os modelos, com isto, fica clara a inadequação deste modelo à amostra que sofre encolhimento. Por esta razão, resolveu-se desconsiderar o modelo Modified Page equation II no presente estudo.

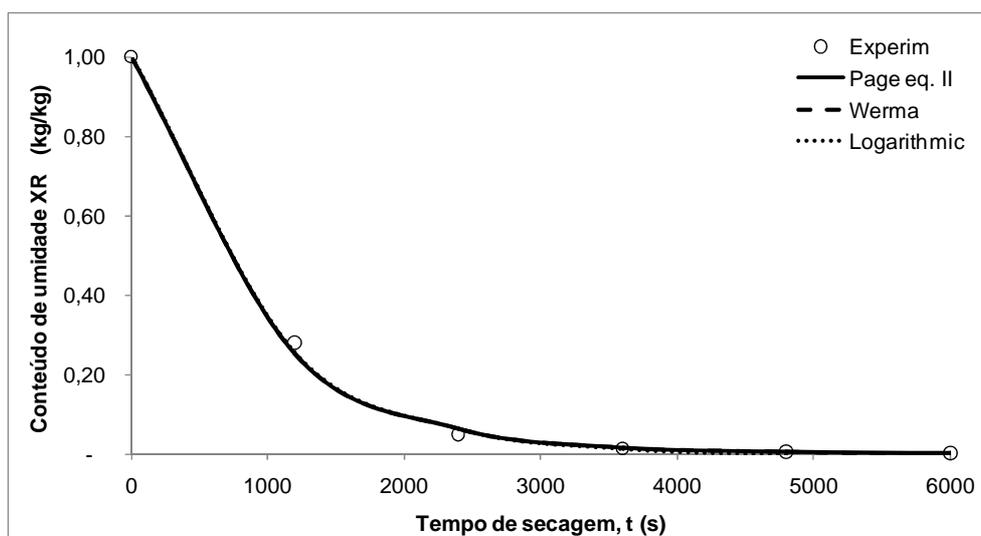


Figura 4.1- Comparação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para 0,004 m de espessura.

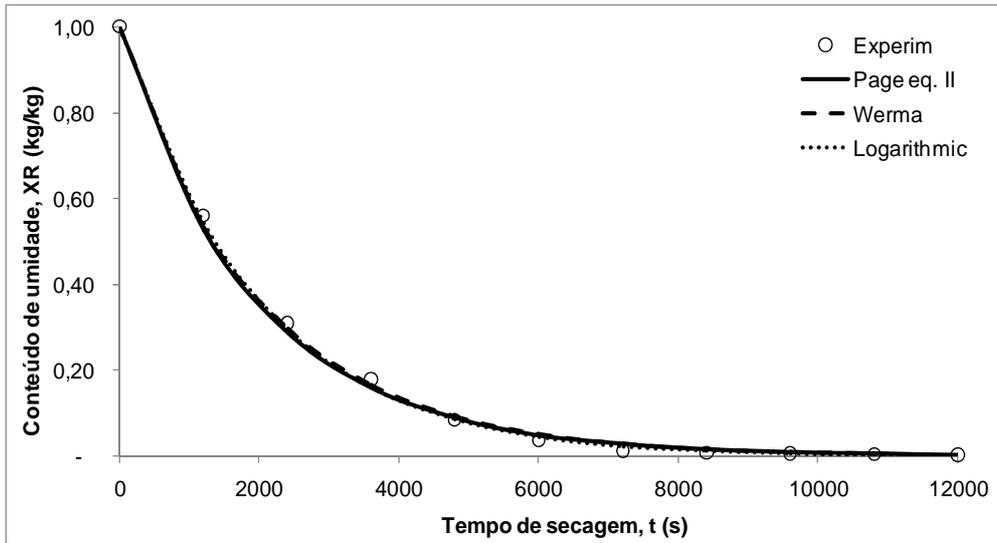


Figura 4.2- Comparação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para 0,007 m de espessura.

O modelo Modified Page equation II, foi descartado, pois em sua equação é necessário informar o valor médio da semi-espessura L para cada espessura utilizada e não tendo como quantificar no momento, dificultando com isso a correlação deste modelo com os dados experimentais, e cuja aplicação se dá mais adequadamente em materiais que não encolhem.

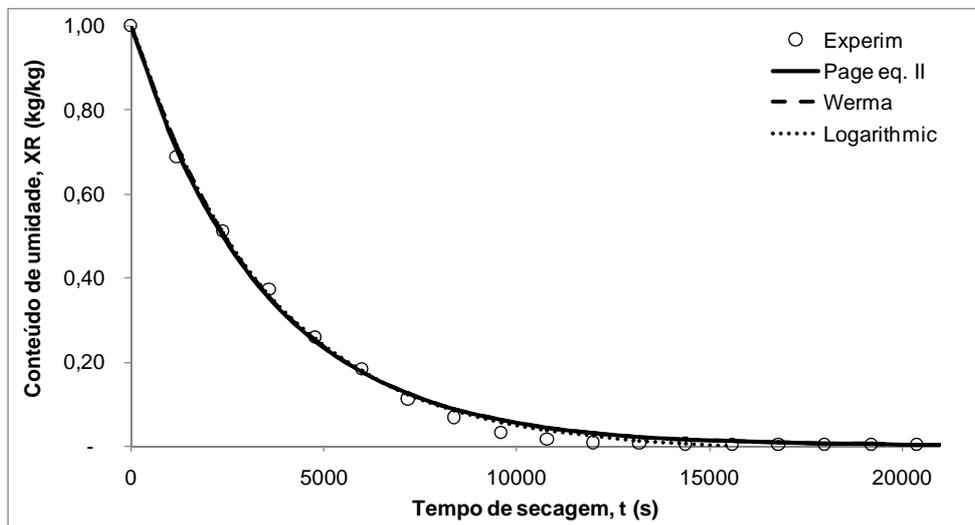


Figura 4.3- Comparação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para 0,010 m de espessura.

Nas Figuras de 4.4 a 4.10 são apresentados gráficos comparativos dos modelos escolhidos, Werma e Logarítmic, comparados com os dados experimentais, para temperaturas de 60, 70 e 80°C e velocidades de 3, 4 e 5 m/s de referência, e para as espessuras de 0,007 e 0,010 m dos respectivos modelos.

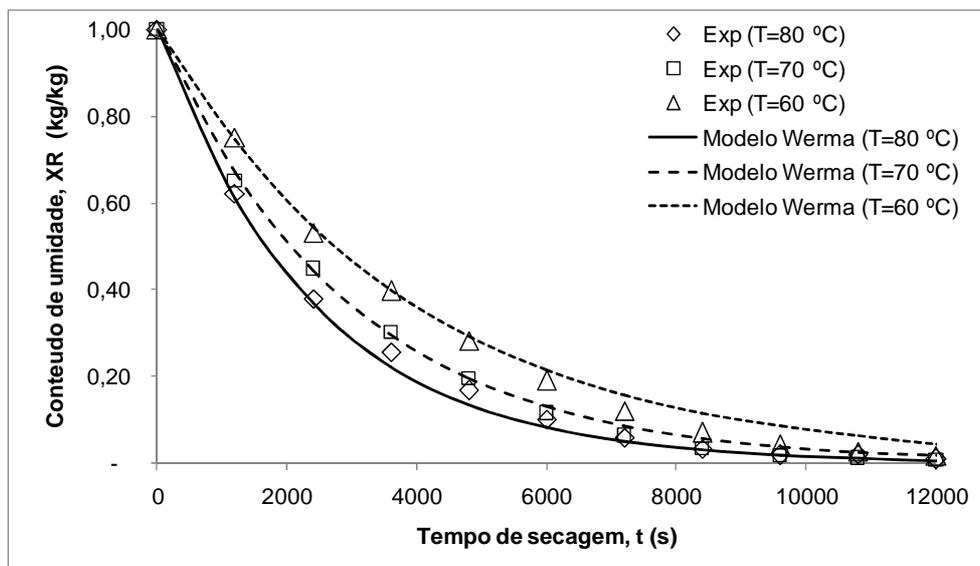


Figura 4.4- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 3 m/s e espessura de 0,007m.

As Figuras 4.4 a 4.6, apresentam as variações da umidade (XR) utilizando-se os valores experimentais e os obtidos utilizando-se o modelo Werma et al. no decorrer da secagem de fatias de caju com espessura de 0,007 m e velocidades de 3, 4 e 5 m/s, respectivamente.

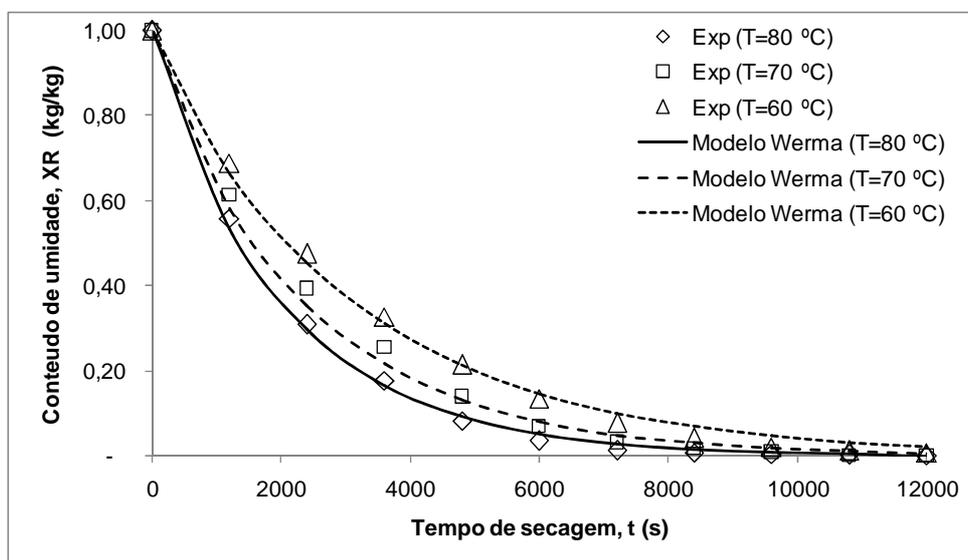


Figura 4.5- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 4 m/s e espessura de 0,007m.

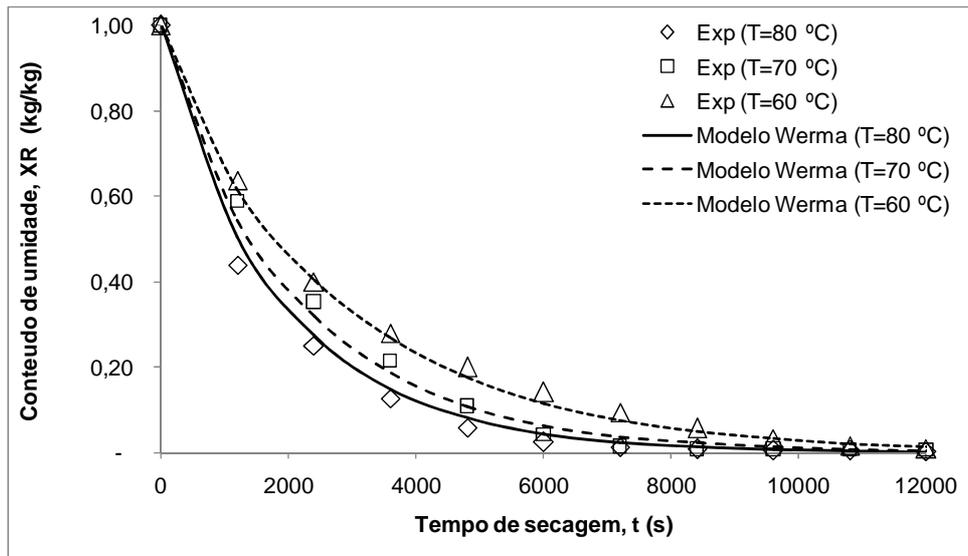


Figura 4.6- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 5 m/s e espessura de 0,007m.

As Figuras 4.7 a 4.9 apresentam as variações da umidade (XR) utilizando-se os valores experimentais e os obtidos utilizando-se o modelo Logarithmic no decorrer da secagem de fatias de caju com espessura de 0,010 m e velocidades de 3, 4 e 5 m/s, respectivamente.

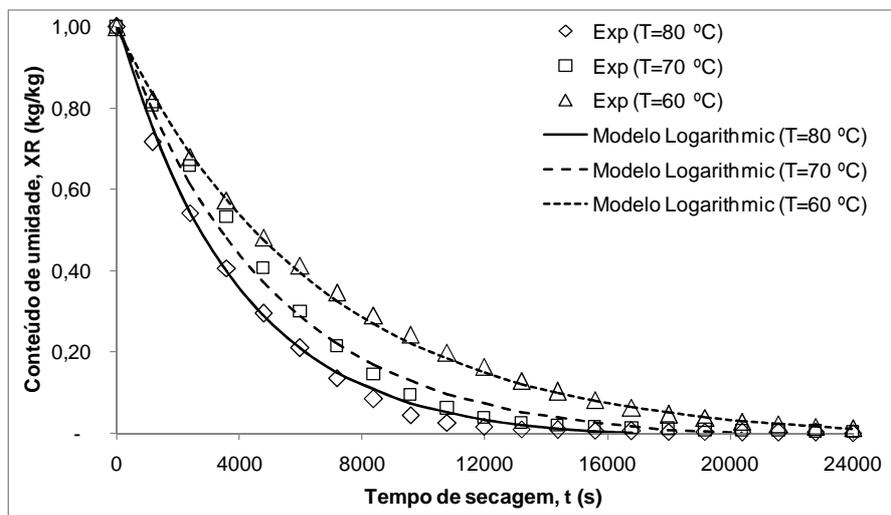


Figura 4.7- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 3 m/s e espessura de 0,010 m.

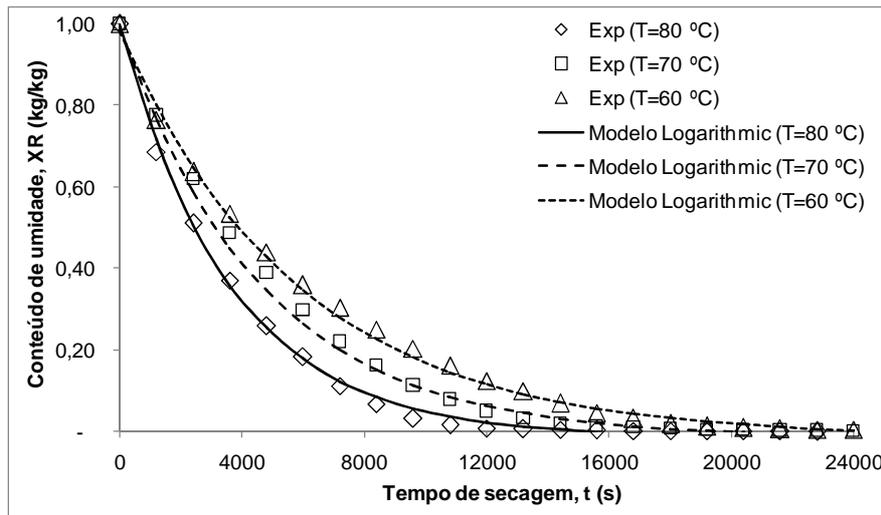


Figura 4.8- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 4 m/s e espessura de 0,010 m.

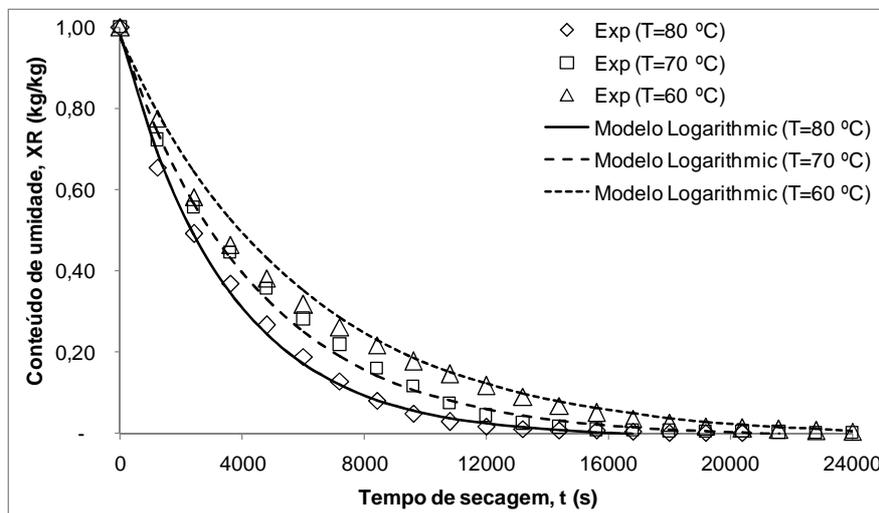


Figura 4.9- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para velocidade de 5 m/s e espessura de 0,010 m.

Na Figura 4.9, para uma velocidade fixa de 5 m/s, variou-se a temperatura e na Figura 4.10, para uma temperatura fixa de 80 °C variou-se a velocidade, tomando como exemplo o modelo Logarithmic, para a espessura de 0,010 m. Observou-se nos resultados obtidos, mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10, que a temperatura tem uma forte influencia no processo de secagem, e que a velocidade do ar não exerce muita influencia neste processo. Também pode-se observar nas Figuras 4.4 a 4.9, que quanto maior é a espessura da amostra, maior é o tempo de secagem.

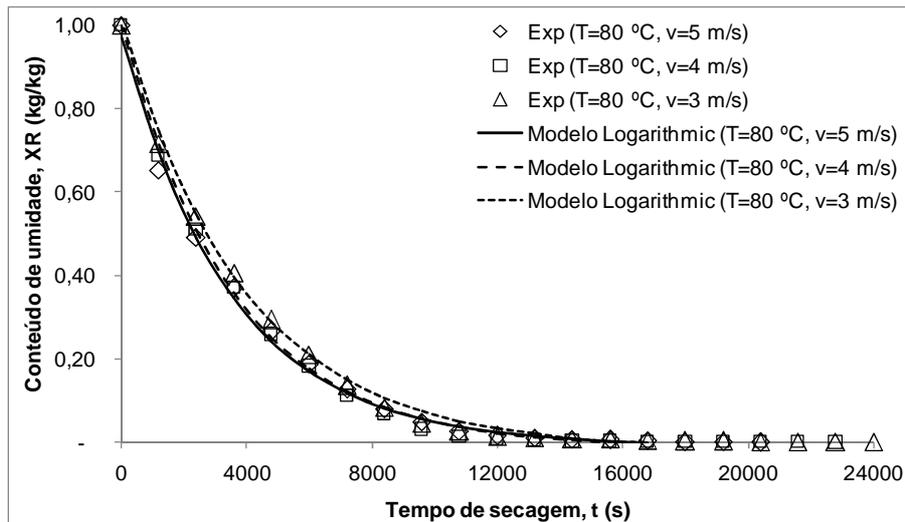


Figura 4.10- Variação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para temperatura de 80 °C e espessura de 10 mm.

No processo de secagem do caju, vale destacar que esta fruta contém um teor de umidade de aproximadamente 88%, e que as amostras apresentaram encolhimentos significativos médios da ordem de 46%, 38% e 36% para as espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m respectivamente. Esse encolhimento causou uma variação da velocidade do ar no plano da amostra. Para se analisar o porquê da não influência da velocidade do ar no processo de secagem, avaliou-se o coeficiente de convecção, utilizando-se correlações para Nusselt médio para esse tipo de escoamento. Sabendo que o aumento de velocidade deve provocar aumento do coeficiente de convecção e conseqüentemente aumento da transferência de calor para o interior da amostra, e baseado na analogia entre transferência de calor e de massa deveria haver um aumento nas taxas de umidade retirada.

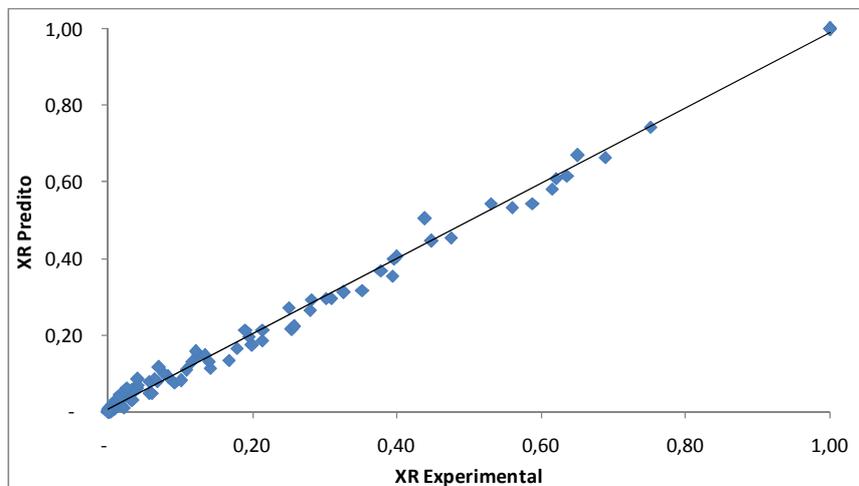


Figura 4.11- Comparação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para o modelo Werma et al. e espessura de 0,007 m.

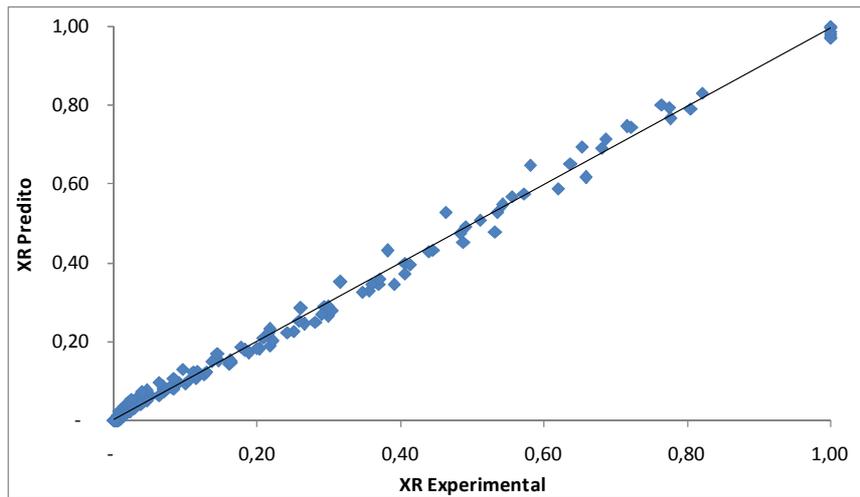


Figura 4.12- Comparação dos resultados de XR, experimentais e preditos, para o modelo Logarithmic e espessura de 0,010 m.

O comportamento dos modelos foi avaliado comparando o conteúdo de umidade prevista calculado nas condições experimentais de secagem, com o conteúdo de umidade observado. O desempenho dos modelos em diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem estão representados nas Figuras 4.11 e 4.12, referentes aos modelos Werma et al., e Logarithmic, nas espessuras de 0,007 e 0,010 m, respectivamente. Os valores geralmente devem estar em torno da linha reta, mostrando a adequação dos modelos para descrever o comportamento da secagem de fatias de caju entre estas espessuras.

5. MODELOS NUMÉRICOS DE SECAGEM

Na Figura 5.1 está apresentado um esquema ilustrado como ocorre o fluxo de ar de secagem sobre a fatia de caju. Quando o ar passa pela fatia, durante determinado intervalo de tempo, certa quantidade de água do produto é evaporada para o ar, tanto pela face superior quanto a face inferior. Neste intervalo, a temperatura do ar diminui, em consequência da transferência de calor sensível do ar para o aquecimento do caju, e do calor latente fornecido para evaporação parcial da água do produto. A quantidade de água perdida pelo produto é calculada através das equações fundamentais da transferência de calor e massa aqui representada de uma forma geral pela equação diferencial de transporte, Equação 5.1, cuja resolução será realizada através do método de volumes finitos com discretização implícita.

$$\frac{\partial(\lambda\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \vec{V}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\phi \nabla \phi) + S^\phi \quad (5.1)$$

onde, ϕ é a variável de interesse correspondente à equação da energia ou equação de concentração, λ e Γ são os coeficientes de transporte das respectivas equações, \vec{V} é o vetor velocidade do meio e S^ϕ é o termo fonte. O primeiro termo da esquerda da equação de transporte representa a variação temporal da grandeza ϕ , enquanto que o segundo termo corresponde ao transporte convectivo dessa mesma grandeza. Por sua vez, o primeiro termo da direita representa o transporte difusivo da grandeza ϕ e o último termo é o termo fonte da equação que pode acomodar a geração ou absorção interna por unidade de volume.

Para desenvolver o modelo foram feitas as seguintes considerações à secagem de uma fatia de produto;

- a) O material é considerado como um disco plano de espessura total b , conforme Figura 5.1, com temperatura inicial T_o e conteúdo de umidade inicial X_o , uniformes;
- b) Os dois lados do material (superior e inferior), conforme Figura 5.1, estão expostos a um fluxo de ar com temperatura T_a e umidade relativa UR , constantes. Os lados direito e esquerdo são considerados como isolados, pois o material possui casca e o fluxo de calor e massa nesta região é considerado desprezível.

- c) A estrutura material é considerada homogênea;
- d) As propriedades termofísicas são consideradas variando no tempo à medida que o conteúdo de umidade da amostra diminui.

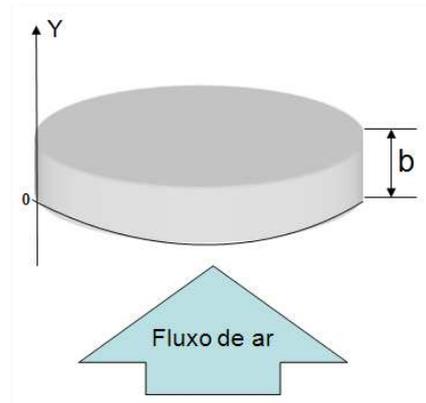


Figura 5.1. Fatia de caju a ser modelada.

- e) O transporte de umidade ocorre por difusão unidimensional na direção y ;
- f) A direção do fluxo de massa é do interior para a interface “ar-material”, e do fluxo de calor é o inverso, da interface para o centro; conforme Figura 5.2;
- g) Considera-se que no início da secagem o teor de umidade é uniforme;
- h) A evaporação da umidade ocorre nas interfaces, superior e inferior;
- i) Não ocorre reação química durante o processo de secagem;
- j) A redução do volume do material (encolhimento) é muito próximo à perda do volume de água (SUZUKI et al., 1976) e é levado em consideração no modelo.

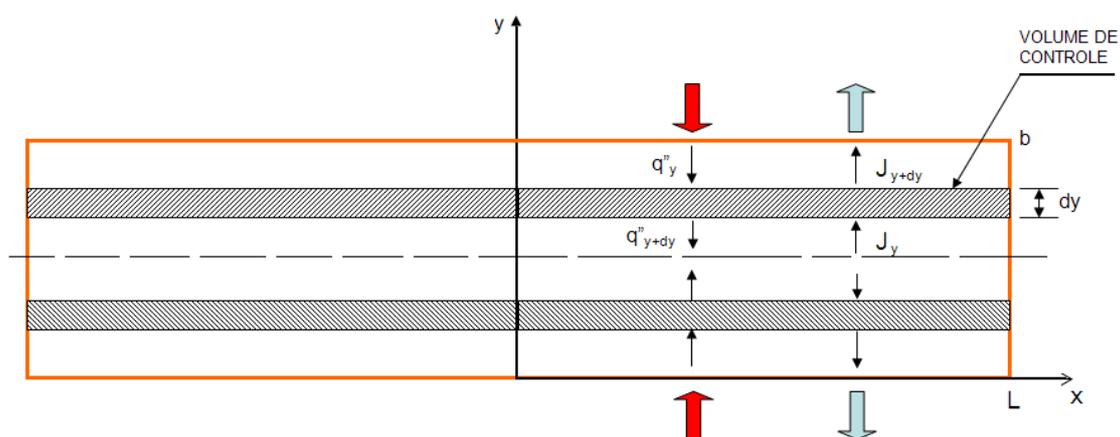


Figura 5.2. Volume de controle da amostra a ser modelada.

5.1. Equação do transporte de massa

Considerando a Equação 5.1, genérica, e admitindo-se as hipóteses acima descritas, tem-se a equação da difusão de massa unidimensional com $\lambda = 1$, $\phi = X$, $\Gamma^\phi = D_{eff}$, $\vec{V} = 0$ e sem termo fonte:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (5.2)$$

As condições de contorno para o presente problema são dadas pelas relações que seguem;

Na superfície externa inferior da amostra ($y = 0$) a massa é transportada por convecção para o ambiente externo de acordo com um coeficiente de transferência de massa médio.

$$D_{eff} \frac{\partial X}{\partial y} = h_m (X - X_e) \quad (5.3)$$

onde, X_e corresponde a umidade de equilíbrio.

Na superfície superior da amostra ($y = b$) também ocorre transferência de massa para o meio externo de acordo com o coeficiente de transferência de massa correspondente.

$$-D_{eff} \frac{\partial X}{\partial y} = h_m (X - X_e) \quad (5.4)$$

No instante inicial imediatamente antes do início da secagem a amostra se encontra com uma umidade uniforme e igual à umidade inicial da amostra;

$$\text{Em } t = 0, X(y,0) = X_o \quad (5.5)$$

O coeficiente de transferência de massa é um parâmetro que pode ser obtido de correlações encontradas na literatura para as condições de escoamento e características geométricas envolvidas. Por outro lado, na ausência de correlações e na disponibilidade de dados experimentais, o coeficiente de transferência de massa pode ser estimado, pelo menos na ordem de grandeza, a partir desses dados experimentais.

Sabe-se que a taxa de perda de umidade através da superfície da amostra pode ser calculada a partir da relação que segue;

$$\dot{m}_a = h_m A \rho_s (\bar{X} - X_e) \quad (5.6)$$

Considerando que a amostra é suficientemente fina, de modo a satisfazer as condições do número de Biot de massa ($Bi_m = h_m b_o / D_{eff}$), onde b_o é a espessura da amostra, achou-se um valor menor que 0,01. Desta forma pode-se avaliar a perda de umidade da amostra através de uma análise concentrada.

$$\dot{m}_a = m_s \frac{d}{dt} \left(\frac{m_a}{m_s} \right) = \rho_s A b \frac{d\bar{X}}{dt} \quad (5.7)$$

Igualando as equações 5.6 e 5.7 tem-se uma equação para avaliação da perda de umidade média da amostra via análise concentrada como segue com $K = h_m / b$;

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = K (\bar{X} - X_e) \quad (5.8)$$

Considerando uma condição inicial igual a $\bar{X} = X_o$ em $t = 0$ e resolvendo a equação diferencial 5.8 tem-se;

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = e^{-Kt} \quad (5.9)$$

Ajustando a Equação 5.9 aos dados experimentais através de correlação múltipla, pode-se obter o valor da constante K em função dos parâmetros de secagem estudados em função da temperatura e velocidade do ar de secagem. Como esta

constante está correlacionada com o coeficiente de transferência de massa, então tem-se dessa forma uma estimativa desse parâmetro no processo de secagem e então usando-os nas simulações numéricas. As equações a seguir representam o valor de K para cada espessura analisada experimentalmente.

Para 0,004 m

$$K = 0,007461 + 0,000022 T + 0,000115 V \quad (5.10)$$

Para 0,007 m

$$K = 0,002528 + 0,000008 T + 0,000031 V \quad (5.11)$$

Para 0,010 m

$$K = 0,001432 + 0,0000048 T + 0,0000019 V \quad (5.12)$$

5.2. Equação do transporte de energia

De modo idêntico, considerando a equação de transporte 5.1, com $\lambda = \rho c_p$, $\phi = T$, $\Gamma^\phi = k_{eff}$, $\vec{V} = 0$ e sem termo fonte, será obtida a equação de difusão de calor com os componentes convectivos de transporte de energia.

Então a equação da energia pode ser escrita da seguinte forma;

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5.13)$$

As condições de contorno e condição inicial para esta equação são definidas como segue;

$$\text{Em } t = 0, T(y,0) = T_o$$

$$\text{Em } y = 0,$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T_\infty - T) - \frac{h_{fg} \dot{m}_a}{A} \quad (5.14)$$

$$\text{Em } y = b,$$

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T_\infty - T) - \frac{h_{fg} \dot{m}_a}{A} \quad (5.15)$$

Nas Equações 5.14 e 5.15, h_{fg} representa o calor latente de vaporização, A é a área superficial em contacto com o ambiente externo e \dot{m}_a é a massa evaporada em cada instante de tempo e transferida para o ar que escoo ao redor da amostra. Esta taxa de evaporação é calculada a partir dos resultados da resolução da equação da difusão de massa, condicionando desta forma a solução da equação da energia à resolução anterior da equação de difusão de massa.

O valor do calor latente foi obtido a cada passo de tempo em função da temperatura superficial da amostra segundo a Equação 5.16 com a temperatura em Kelvin o calor latente de vaporização em kJ/kg.

$$h_{fg} = 3161,36 - 2,406T \quad (5.16)$$

O coeficiente de transferência de calor h é calculado a partir de uma correlação obtida na literatura para escoamento perpendicular a uma placa plana definida pela Equação 5.17, válida para uma faixa de Reynolds de 4000 a 15000, com Pr sendo o número de Prandtl e Re o número de Reynolds.

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0,228Re^{0,731} Pr^{0,333} \quad (5.17)$$

O número de Reynolds, Equação 5.18, é definido em função do diâmetro da amostra d e da velocidade média do escoamento ao redor da fatia de caju, V . O termo ν nessa equação representa a viscosidade cinemática do ar.

$$Re \equiv \frac{Vd}{\nu} \quad (5.18)$$

5.3. Discretização das equações de transporte

A seguir serão apresentadas as formas discretizadas das equações de difusão de massa e energia tratadas através do método de volumes finitos com esquema implícito de discretização conforme nomenclatura da Figura 5.3.

Considerando inicialmente a equação da difusão de massa pela Equação 5.2,

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2}$$

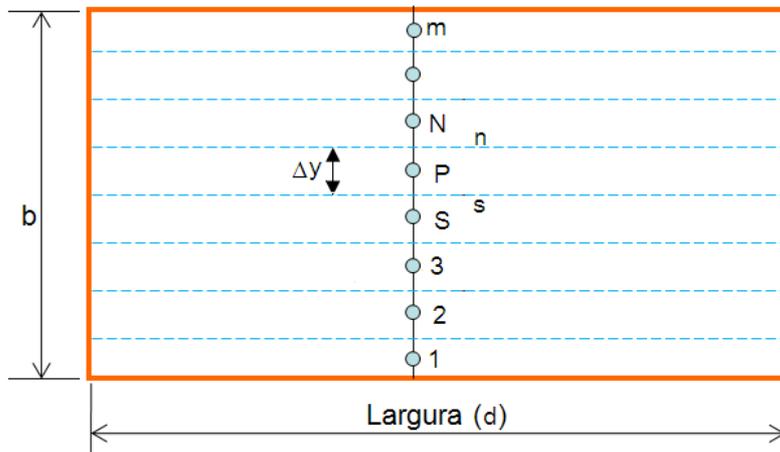


Figura 5.3. Representação da malha com o posicionamento dos nós.

Integrando a mesma no volume de controle diferencial mostrado na Figura 5.3 para o ponto P , tem-se,

$$\int_t^t \int_s^s \frac{\partial X}{\partial t} d_y d_t = \int_t^t \int_s^s D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} d_y d_t \quad (5.19)$$

$$(X_P - X_P^t) \Delta y = D_{eff} \left[\left. \frac{\partial X}{\partial y} \right|_n - \left. \frac{\partial X}{\partial y} \right|_s \right] \Delta t \quad (5.20)$$

$$(X_P - X_P^t) \Delta y = D_{eff} \left[\frac{(X_N - X_P)}{\Delta y} - \frac{(X_P - X_S)}{\Delta y} \right] \Delta t \quad (5.21)$$

Finalmente, após um adequado arranjo dos termos da Equação 5.21, tem-se a Equação 5.22, válida para todos os volumes internos do domínio de “2” até “m-1”;

$$\left(-\frac{D_{eff} \Delta t}{\Delta y^2}\right) X_N + \left(1 + \frac{2D_{eff} \Delta t}{\Delta y^2}\right) X_P + \left(-\frac{D_{eff} \Delta t}{\Delta y^2}\right) X_S = X_P^t \quad (5.22)$$

Os volumes de fronteira devem incorporar as condições de contorno gerando equações discretas modificadas em relação à Equação 5.22. Partindo da Equação 5.20 e considerando a nomenclatura da Figura 5.4, tem-se para a fronteira superior;

$$(X_P - X_P^t) \Delta y = D_{eff} \left[\frac{(X_n - X_P)}{\Delta y/2} - \frac{(X_P - X_S)}{\Delta y} \right] \Delta t \quad (5.23)$$



Figura 5.4 Representação da malha para o volume de fronteira superior e inferior.

Da condição de contorno do problema, a Equação 5.4, tem-se a Equação 5.24,

$$\begin{aligned} -D_{eff} \frac{\partial X}{\partial y} &= h_m (X - X_e) \\ -D_{eff} \left(\frac{X_n - X_P}{\Delta y/2} \right) &= h_m (X_n - X_e) \end{aligned} \quad (5.24)$$

Substituindo a Equação 5.24 na Equação 5.23, e escrevendo adequadamente, foi obtida uma equação discreta para o volume de fronteira superior.

$$\left(1 + \frac{3D_{eff} \Delta t}{\Delta y^2} - \frac{2D_{eff} \Delta t}{\Delta y^2 \left(1 + \frac{h_m \Delta y}{2D_{eff}} \right)} \right) X_P + \left(-\frac{D_{eff} \Delta t}{\Delta y^2} \right) X_S = X_P^t + \frac{h_m \Delta t X_e}{\Delta y \left(1 + \frac{h_m \Delta y}{2D_{eff}} \right)} \quad (5.25)$$

Da mesma forma para a fronteira inferior, tem-se,

$$(X_P - X_P^t)\Delta y = D_{eff} \left[\frac{(X_N - X_P)}{\Delta y} - \frac{(X_P - X_S)}{\Delta y/2} \right] \Delta t \quad (5.26)$$

Da outra condição de contorno do problema, Equação 5.3, que resulta na Equação 5.27.

$$D_{eff} \frac{\partial X}{\partial y} = h_m (X - X_e)$$

$$D_{eff} \left(\frac{X_P - X_S}{\Delta y/2} \right) = h_m (X_S - X_e) \quad (5.27)$$

Substituindo a Equação 5.27 na Equação 5.26 e escrevendo adequadamente foi encontrada uma equação discreta para o volume de fronteira inferior;

$$\left(-\frac{D_{eff} \Delta t}{\Delta y^2} \right) X_N + \left(1 + \frac{3D_{eff} \Delta t}{\Delta y^2} - \frac{2D_{eff} \Delta t}{\Delta y^2 \left(1 + \frac{h_m \Delta y}{2D_{eff}} \right)} \right) X_P = X_P^t + \frac{h_m \Delta t X_e}{\Delta y \left(1 + \frac{h_m \Delta y}{2D_{eff}} \right)} \quad (5.28)$$

A equação da difusão de calor pode ser discretizada seguindo o mesmo procedimento mostrado para a equação da difusão de massa. Integrando a Equação 5.13 no volume de controle elementar da Figura 5.3,

$$\int_{t_s}^n \int_s^n \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} dt dy = \int_{t_s}^n \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dt dy \quad (5.29)$$

$$([\rho c_p T]_P - [\rho c_p T]_P^t) \Delta y = k_{eff} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_n - \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_s \right] \Delta t \quad (5.30)$$

$$([\rho c_p T]_P - [\rho c_p T]_P^t) \Delta y = k_{eff} \left[\frac{T_N - T_P}{\Delta y} - \frac{T_P - T_S}{\Delta y} \right] \Delta t \quad (5.31)$$

$$\left(\frac{-\alpha\Delta t}{\Delta y^2}\right)T_N + \left(1 + \frac{2\alpha\Delta t}{\Delta y^2}\right)T_P + \left(\frac{-\alpha\Delta t}{\Delta y^2}\right)T_S = T_P^t \quad (5.32)$$

A Equação 5.32 vale para todos os volumes internos do domínio. A equação para os volumes de fronteira é discretizada utilizando as condições de contorno junto com a equação da difusão aplicada de forma particular aos volumes de fronteira. A equação da difusão de calor escrita para o volume da fronteira superior tomando como referência a Figura 5.4 é;

$$\left([\rho c_p T]_p - [\rho c_p T]_p^t\right)\Delta y = k_{eff} \left[\frac{T_n - T_P}{\Delta y/2} - \frac{T_P - T_S}{\Delta y}\right]\Delta t \quad (5.33)$$

A condição de contorno para essa fronteira, Equação 5.15, obtêm-se a Equação 5.34;

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T_\infty - T) - \frac{h_{fg}\dot{m}_a}{A}$$

$$k_{eff} \frac{T_n - T_P}{\Delta y/2} = h(T_\infty - T_n) - \frac{h_{fg}\dot{m}_a}{A} \quad (5.34)$$

Determinando a temperatura na fronteira (T_n) da Equação 5.34, e substituindo junto com a Equação 5.4, na Equação 5.33, obtêm-se uma equação para o volume na fronteira superior.

$$\left(1 + \frac{3\alpha\Delta t}{\Delta y^2} - \frac{2\alpha\Delta t}{\Delta y^2 \left(1 + \frac{h\Delta y}{2k_{eff}}\right)}\right)T_P + \left(\frac{-\alpha\Delta t}{\Delta y^2}\right)T_S = T_P^t + \frac{h\alpha\Delta t T_\infty}{k_{eff}\Delta y \left(1 + \frac{h\Delta y}{2k_{eff}}\right)} - \frac{\alpha\Delta t h_{fg}\dot{m}_a}{\Delta y k_{eff} A \left(1 + \frac{h\Delta y}{2k_{eff}}\right)} \quad (5.35)$$

Aplicando um processo similar ao volume de fronteira inferior, tem-se;

$$\left([\rho c_p T]_p - [\rho c_p T]_p^t \right) \Delta y = k_{eff} \left[\frac{T_N - T_p}{\Delta y} - \frac{T_p - T_s}{\Delta y/2} \right] \Delta t \quad (5.36)$$

A condição de contorno para esta fronteira é dada pela Equação 5.14, que discretizada se transforma na Equação 5.37;

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T_\infty - T) - \frac{h_{fg} \dot{m}_a}{A}$$

$$k_{eff} \frac{T_p - T_s}{\Delta y/2} = h(T_\infty - T_s) - \frac{h_{fg} \dot{m}_a}{A} \quad (5.37)$$

Assim, obtendo a temperatura T_s da Equação 5.37 e substituindo na Equação 5.36 junto com a Equação 5.3, é encontrada a equação discreta para o volume da fronteira inferior.

$$\left(\frac{-\alpha \Delta t}{\Delta y^2} \right) T_N + \left(1 + \frac{3\alpha \Delta t}{\Delta y^2} - \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta y^2 \left(1 + \frac{h\Delta y}{2k_{eff}} \right)} \right) T_p = T_p^t + \frac{h\alpha \Delta t T_\infty}{k_{eff} \Delta y \left(1 + \frac{h\Delta y}{2k_{eff}} \right)} \quad (5.38)$$

$$- \frac{\alpha \Delta t h_{fg} \dot{m}_a}{\Delta y k_{eff} A \left(1 + \frac{h\Delta y}{2k_{eff}} \right)} - \frac{c_p^t \Delta t}{\rho c_p \Delta y} (T_n^t J_n^t - T_s^t J_s^t)$$

Nas Equações 5.35 e 5.38, o termo A representa a área da seção de transferência de calor e massa e este termo é calculado a cada iteração no tempo devido ao encolhimento do material.

As equações aqui apresentadas conformam o modelo de secagem de uma fatia de caju. Utilizou-se o MATLAB como ferramenta para a implementação computacional do modelo de acordo com os passos do fluxograma apresentado na Figura 5.5.

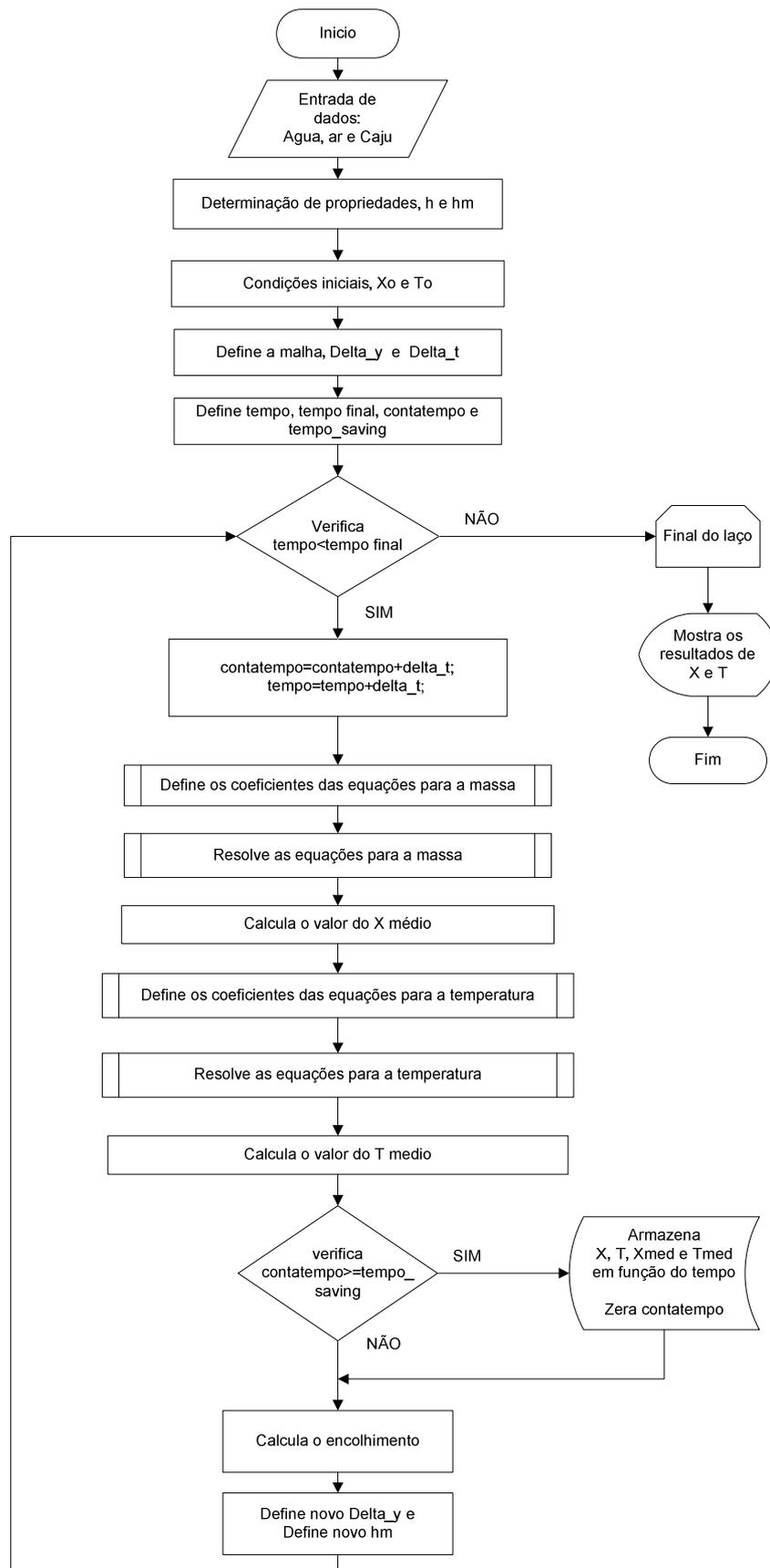


Figura 5.5. Fluxograma da implementação computacional do modelo matemático que descreve a secagem de caju em fatias.

5.4. Validação e teste de malha do modelo computacional

Uma etapa importante na construção de um modelo computacional é a validação do mesmo e a determinação do tamanho da malha computacional, escolhida de modo que não cause influência nos resultados numéricos.

Primeiro foi realizado a validação do código computacional simulando um caso simplificado de modo a comparar os resultados obtidos com uma solução analítica existente. Nessa mesma comparação foram realizados testes de simetria que é outra forma complementar de avaliar a qualidade da simulação.

O exemplo escolhido é uma solução analítica de um problema de difusão de massa unidimensional transiente em placa plana infinita de espessura fixa não deformável. As condições de contorno desse problema são de condição de concentração imposta na parede e constante. Esse problema está definido e resolvido em CRANK(1975).

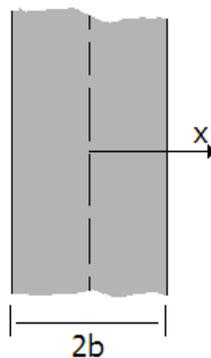


Figura 5.6 Esquema placa plana infinita, problema teste.

A equação diferencial do problema é dada pela Equação 5.39 e as condições de contorno e inicial na Equação 5.40.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5.39)$$

Em,

$$x = \pm b, \quad C(x = \pm b, t) = C_1 \quad (5.40)$$

$$t = 0, \quad C(x, t = 0) = C_0$$

A solução dessa equação obtida por separação de variáveis é apresentada na forma de uma série infinita.

$$\frac{C - C_o}{C_1 - C_o} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left\{-D(2n+1)^2 \frac{\pi^2 t}{(2b)^2}\right\} \cos\left(\frac{(2n+1)\pi x}{2b}\right) \quad (5.41)$$

A simulação numérica foi realizada utilizando o programa desenvolvido cujas condições de contorno do modelo são convectivas. Para isso, a condição de concentração imposta na parede foi simulada considerando um valor para o coeficiente de massa suficientemente grande de modo a obter a condição da solução analítica de forma assintótica.

No teste de validação foi utilizada uma espessura da placa de 0,2 m, uma concentração inicial de 7 kg/kg e uma concentração imposta na parede de 0,2 kg/kg. A solução analítica foi implementada no próprio código numérico e foram testadas várias condições de números de termos da série, considerando como condição adequada o número de termos que não causava mais alterações com erro relativo de 10^{-6} . Resultados com os primeiros 10 termos da série satisfizeram essa condição. Foram realizados vários ensaios numéricos para diferentes valores de h_m até alcançar a condição de concentração imposta na parede. Isto foi conseguido com $h_m = 0,1$ como mostram as Figuras 5.7 e 5.8. Na Figura 5.8 pode ser observado que os resultados numéricos apresentam uma boa concordância com os resultados analíticos indicando que o programa fornece resultados consistentes.

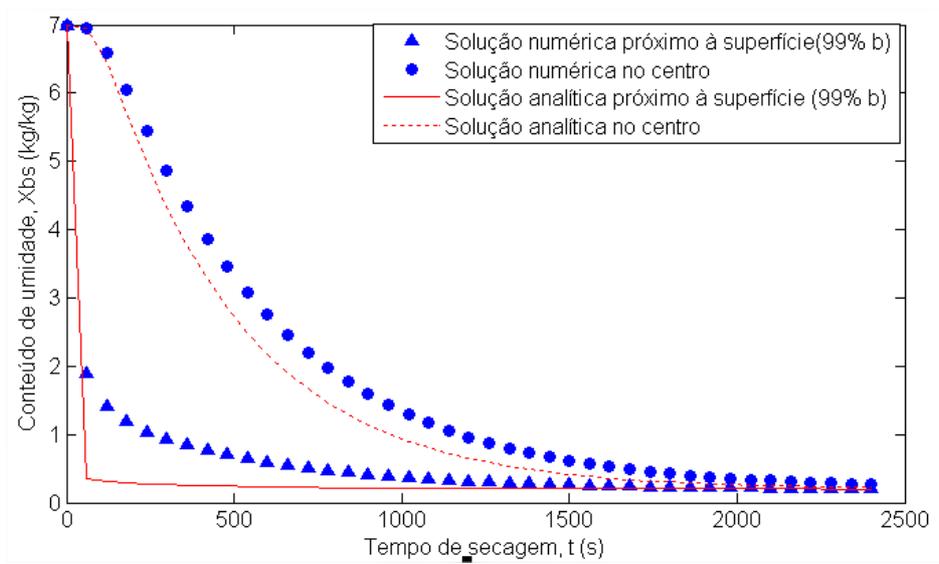


Figura 5.7 Comparação de resultados numéricos e analíticos para $h_m = 0,001$

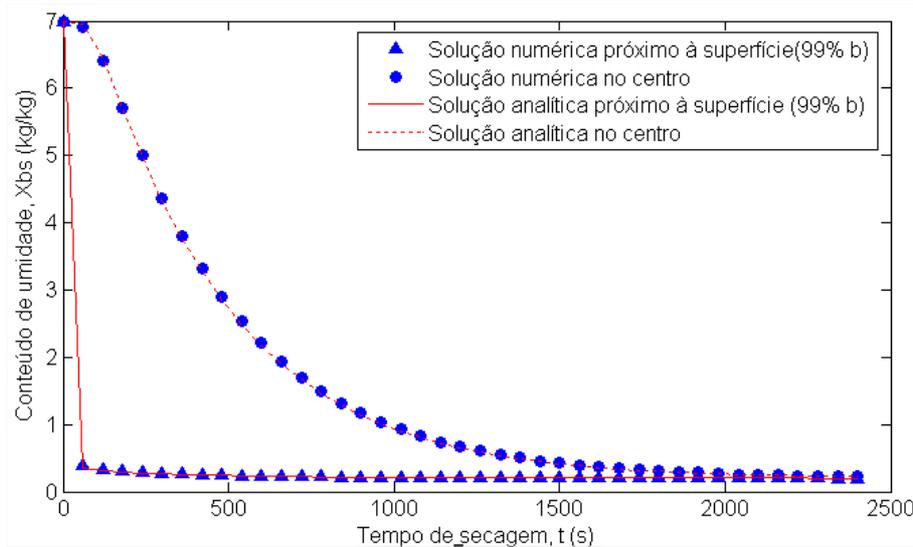


Figura 5.8 Comparação de resultados numéricos e analíticos para $h_m = 0,1$

Foi realizado também um teste de simetria para verificar a qualidade de resultados gerados com o programa computacional. O teste foi feito considerando um domínio de 99 volumes para as mesmas condições de geometria e condições iniciais do teste de validação. A condição de contorno foi de convecção com $h_m = 0,001$ e concentração de equilíbrio de 0,2 kg/kg em ambas as superfícies livres.

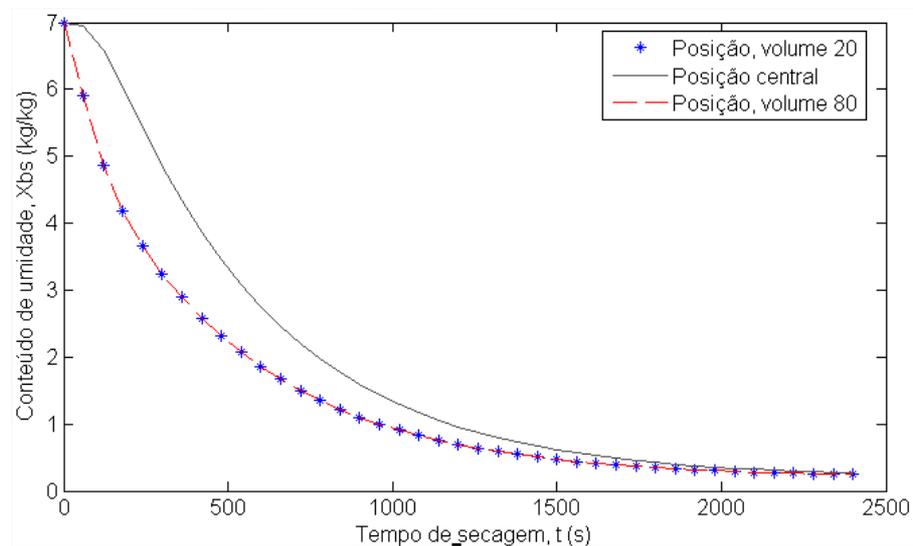


Figura 5.9 Teste de simetria para $h_m = 0,001$

A Figura 5.9 mostra os resultados para três posições diferentes na placa (malha com 99 volumes), sendo as posições dos volumes 20 e 80 simétricos um em relação ao outro. Os resultados indicam que a simetria do problema é verificada. Da mesma forma

a Figura 5.10 mostra os resultados obtidos para um caso teste onde as condições de contorno não foram simétricas e que foram geradas considerando $h_m = 0,1$ em $x = -b$ (condição de concentração imposta na parede) e $h_m = 0,001$ em $x = +b$. Estes resultados mostram que o programa é capaz de lidar com condições de contorno não simétricas.

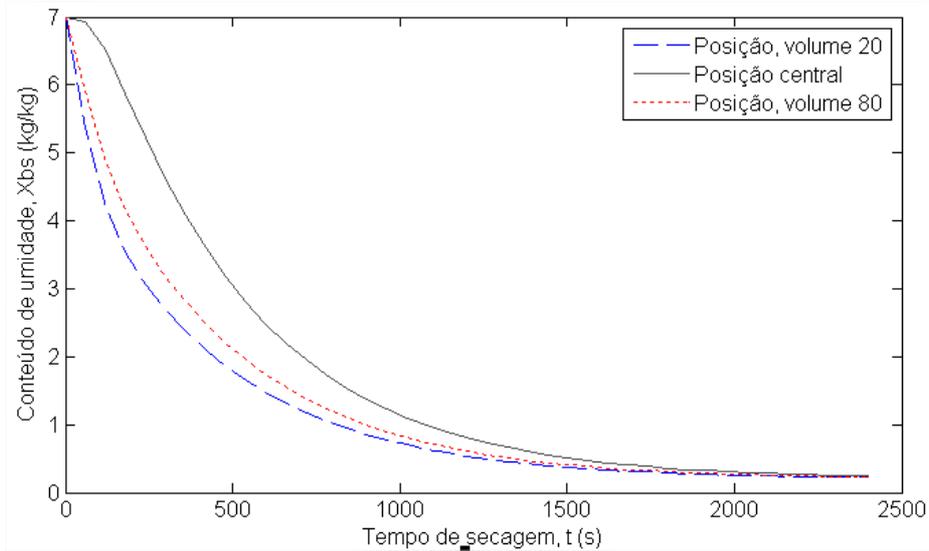


Figura 5.10 Teste numérico para condições de contorno não simétricas.

Uma comparação de resultados numéricos com dados experimentais obtidos para amostras de caju de espessura fina é mostrada com base na perda de umidade e temperatura em função do tempo de secagem. Os resultados numéricos foram gerados com o programa desenvolvido para as mesmas condições dos dados experimentais. Durante o processo de secagem a amostra encolhe devido à perda de água e este encolhimento ocorre tanto na espessura quanto no diâmetro da amostra. Ambas as características são levadas em consideração na simulação numérica através de um modelo de encolhimento desenvolvido a partir dos dados experimentais do presente trabalho. As correlações de variação da espessura e diâmetro foram implementadas no código computacional e os valores atualizados a cada iteração durante a simulação.

Nos casos analisados o coeficiente de transferência de massa utilizado foi determinado de um modelo descrito pelas Equações 5.10 a 5.12 e considerado aqui como um valor médio. Já o coeficiente de transferência de calor foi determinado de correlações encontradas na literatura para escoamento transversal sobre uma placa plana, Equação 5.17. Sabe-se que o escoamento ao redor de corpos envolve a separação do escoamento devido a gradientes adversos de pressão e isto deve influenciar a

transferência de calor ao ponto de se ter valores de número de Nusselt diferentes na parte frontal e traseira da placa em relação à direção do escoamento. Nada foi encontrado na literatura a respeito da magnitude dessa diferença para a geometria em estudo, entretanto, para escoamento cruzado sobre um cilindro os resultados indicam que essa diferença depende do número de Reynolds como mostrado na Figura 5.11. Na falta de informações mais confiáveis a respeito da ordem de grandeza da diferença entre a transferência de calor na região frontal e posterior da placa será utilizado aqui as informações extraídas da Figura 5.11 considerando o caso do menor valor de Reynolds, o que corresponde a um valor de coeficiente convectivo na parte traseira do cilindro da ordem de 75% do seu valor frontal. A faixa do número de Reynolds nos dados experimentais da secagem de caju foi da ordem de 8000 a 14000, menor do que o menor valor de Reynolds apresentado na Figura 5.11.

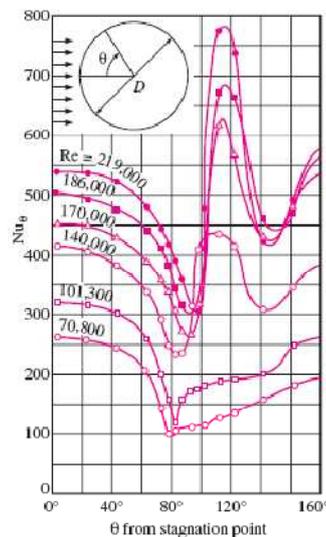


Figura 5.11 Variação do coeficiente de transferência local ao longo da superfície do cilindro. Conforme ÇENGEL (2009)

As Figuras 5.12 a 5.20 mostram os resultados comparativos entre as soluções numéricas e os dados experimentais, para a umidade e temperatura no interior da amostra, cujos valores apresentados são médios. Verifica-se que para este caso há uma boa concordância entre os resultados para a variação do conteúdo de umidade e existem algumas discrepâncias nos resultados para o caso da temperatura.

As Figuras 5.12 a 5.14 apresentam casos com diferentes temperaturas do ar de secagem, 81,7, 72,6 e 61,8 °C respectivamente, e com mesmas velocidades do ar de secagem e espessura inicial das amostras.

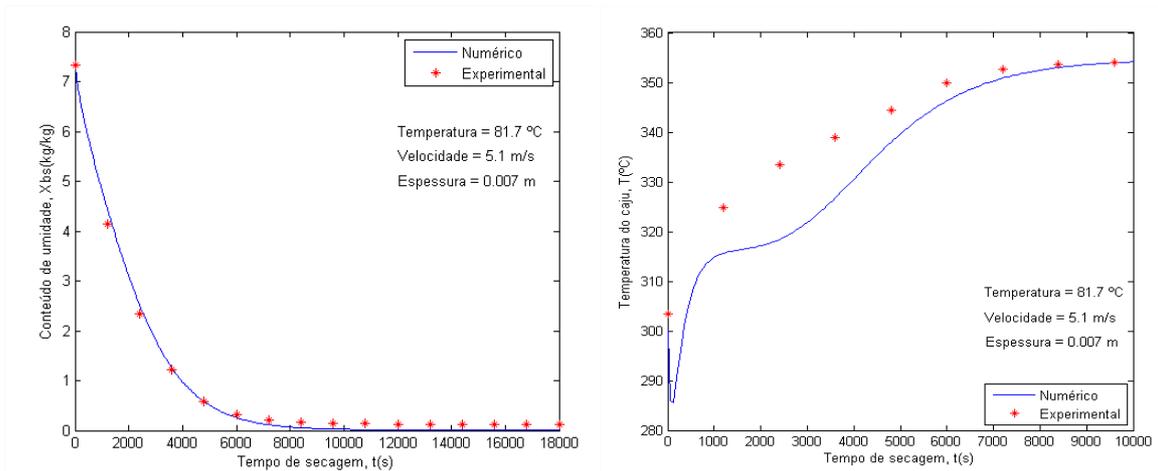


Figura 5.12 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para temperatura de 81,7 °C.

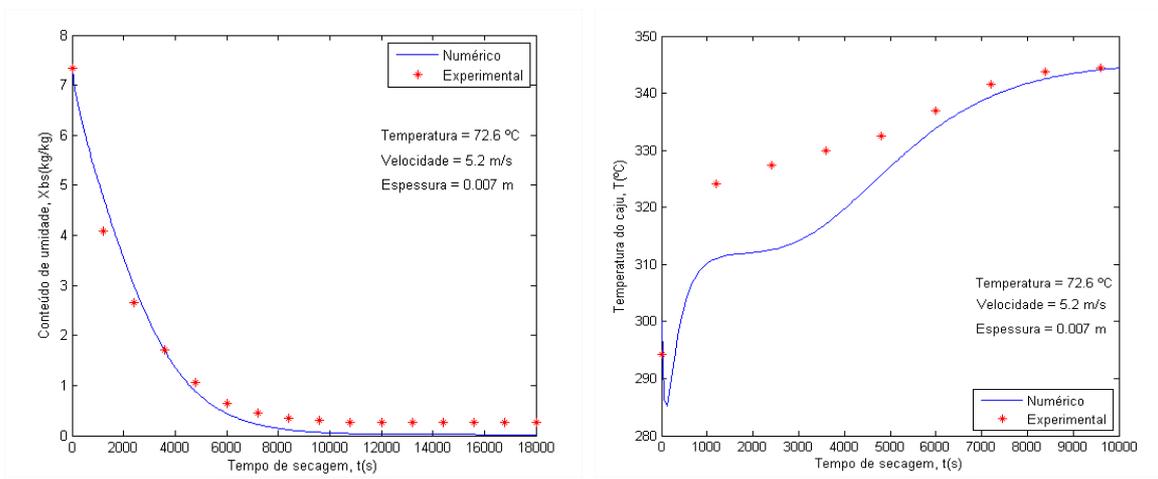


Figura 5.13 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para temperatura de 72,6 °C.

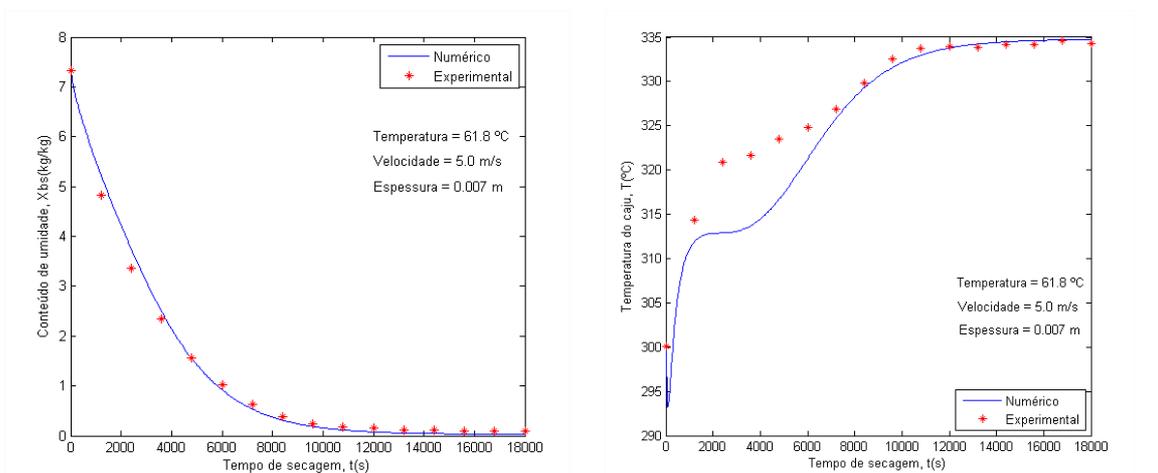


Figura 5.14 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para temperatura de 61,8 °C.

As Figuras 5.15 a 5.17 apresentam casos com diferentes velocidades do ar de secagem, 6,7, 5,0 e 3,9 m/s respectivamente, e com mesmas temperaturas do ar de secagem e espessura inicial das amostras.

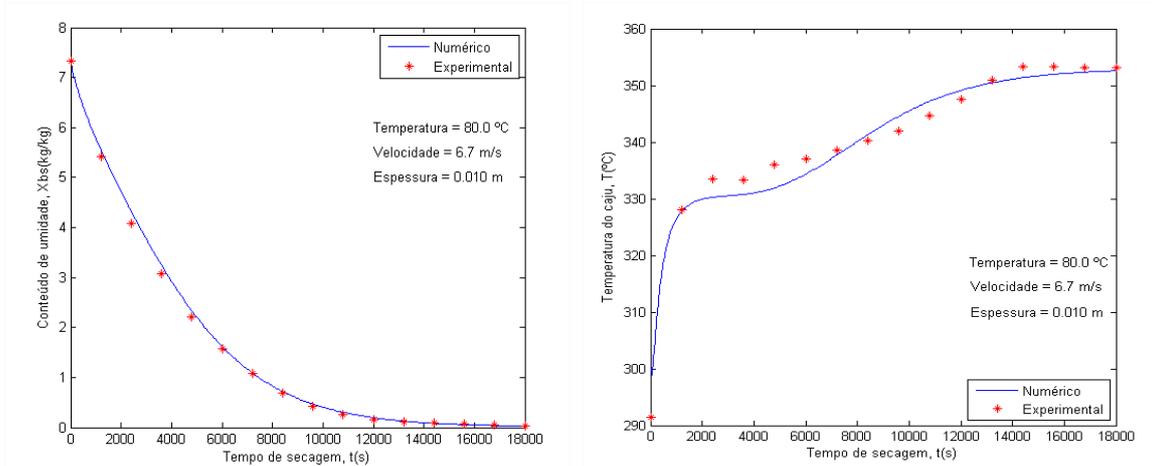


Figura 5.15 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para velocidade de 6,7 m/s.

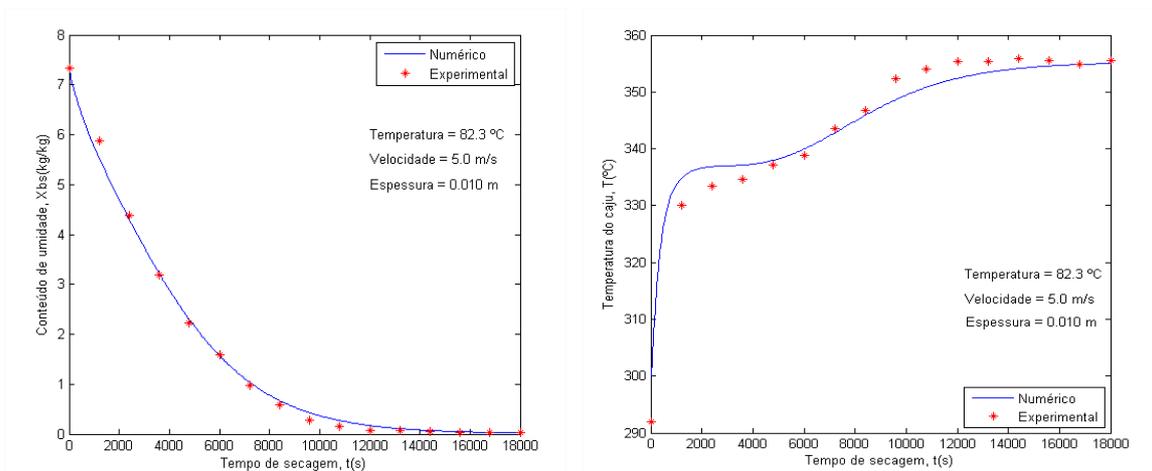


Figura 5.16 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para velocidade de 5,0 m/s.

As Figuras 5.18 a 5.20 apresentam casos com diferentes espessuras iniciais das amostras, 0,004, 0,007 e 0,010 m respectivamente, e com mesmas temperaturas e velocidades do ar de secagem.

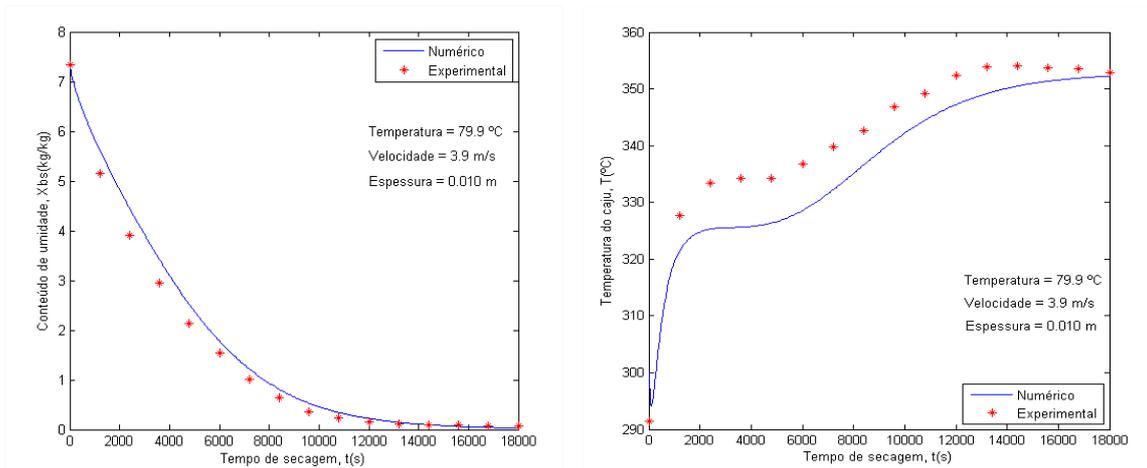


Figura 5.17 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para velocidade de 3,9 m/s.

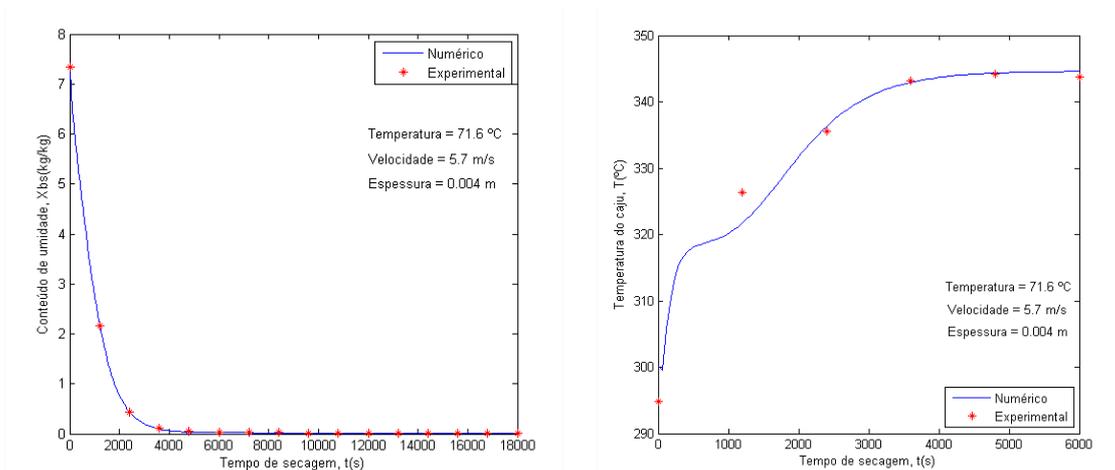


Figura 5.18 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para amostras com espessura inicial de 0,004 m.

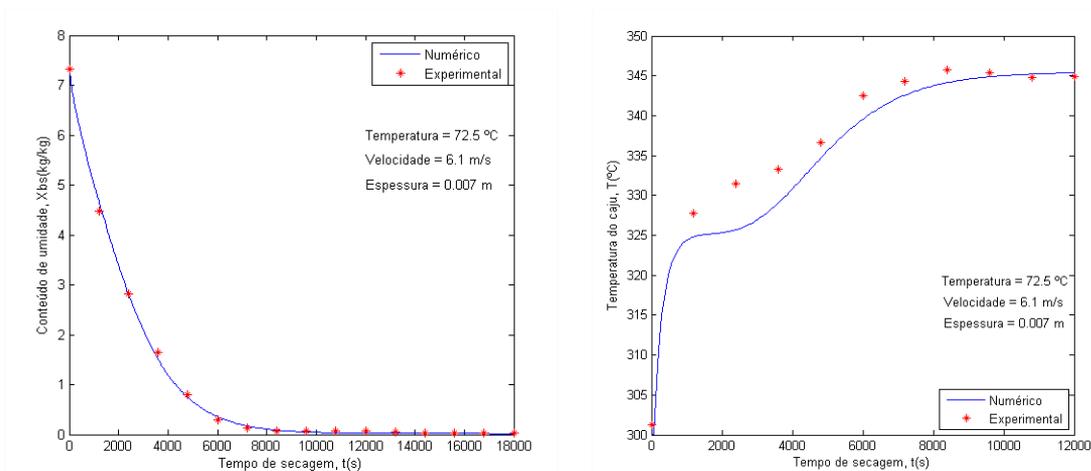


Figura 5.19 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para amostras com espessura inicial de 0,007 m.

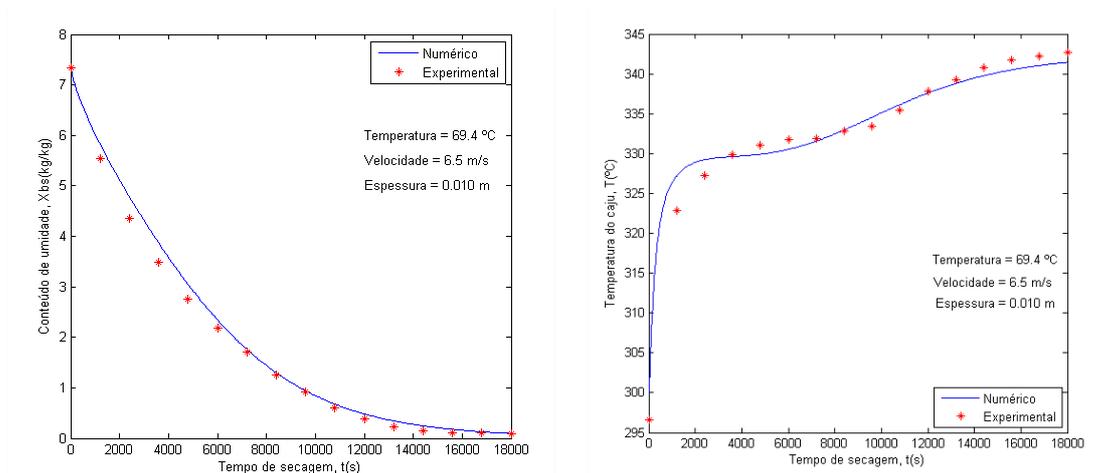


Figura 5.20 Comparação de resultados numéricos e experimentais em função do tempo de secagem para amostras com espessura inicial de 0,010 m.

Da análise apresentada e da comparação com os resultados experimentais concluí-se que o modelo proposto apresenta condições de simular de forma coerente a secagem de fatias finas de caju. Notou-se durante os testes de comparação com os resultados experimentais a necessidade de aprimorar o modelo de encolhimento de maneira a obter de forma mais direta, sem depender de informações experimentais, caso o modelo venha ser utilizado para simular a secagem de outro tipo de frutas.

No que diz respeito à temperatura no interior do caju, embora o modelo não tenha apresentado bons resultados, mesmo assim se observou uma tendência bem correlacionada aos dados experimentais. É importante salientar que alguns erros experimentais como interferências das condições externas e erros de medidas da temperatura no interior do caju, causados pelo deslocamento dos termopares quando o material encolhe, podem ter contribuído para os desvios entre os valores experimentais e calculados na simulação. Na literatura, é possível se encontrar relatos mencionando dificuldades preditivas do modelo para determinação da temperatura das amostras, conforme RATTI e MUJUNDAR (1977) e MACHADO (2009).

Como o programa demonstrou ser confiável para descrever a perda de umidade das amostras, foram feitas análises paramétricas para observar o comportamento do tempo de secagem, quando se extrapola os valores da temperatura, aos que foram utilizados experimentalmente.

A Figura 5.21 simula o comportamento do tempo de secagem em função das perdas de umidade, quando se varia a temperatura do ar entre 55 e 85 °C, com incremento de 5 °C, e com 4 m/s de velocidade do ar e 0,004 m de espessura. Dá para se

observar que o modelo numérico consegue simular o comportamento da perda de umidade para temperaturas que extrapolam às utilizadas nos experimentos.

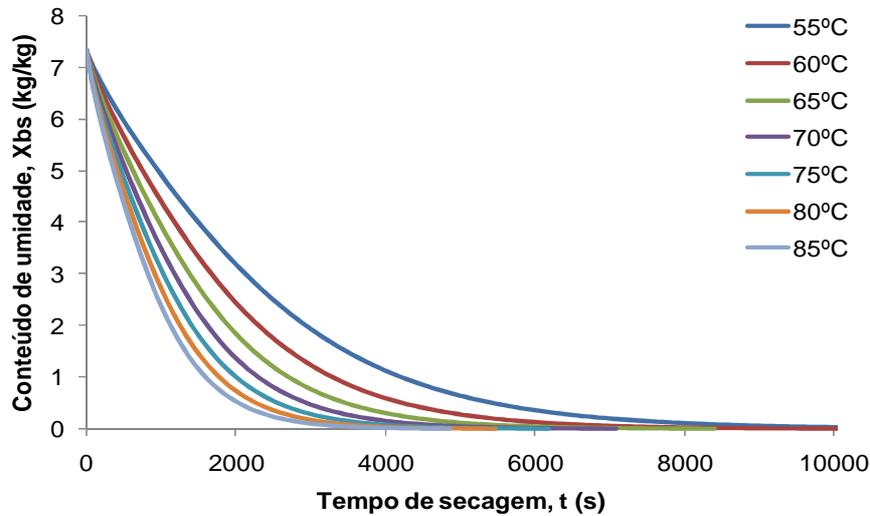


Figura 5.21 Simulação do comportamento da perda de umidade para diversas temperaturas.

Analisando-se as outras condições de secagem, para outras velocidades do ar e a espessuras da amostra, observou-se que as curvas apresentaram perfis similares aos da Figura 5.21. Dos resultados de simulações deste tipo pode ser obtido o tempo de secagem para diferentes condições operacionais. Isto foi feito e apresentado nas figuras que seguem.

As Figuras 5.22 a 5.24 mostram o comportamento do tempo de secagem nas espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m respectivamente, para temperaturas do ar de secagem entre 55 e 85 °C, e velocidade do ar de secagem entre 3 e 7 m/s.

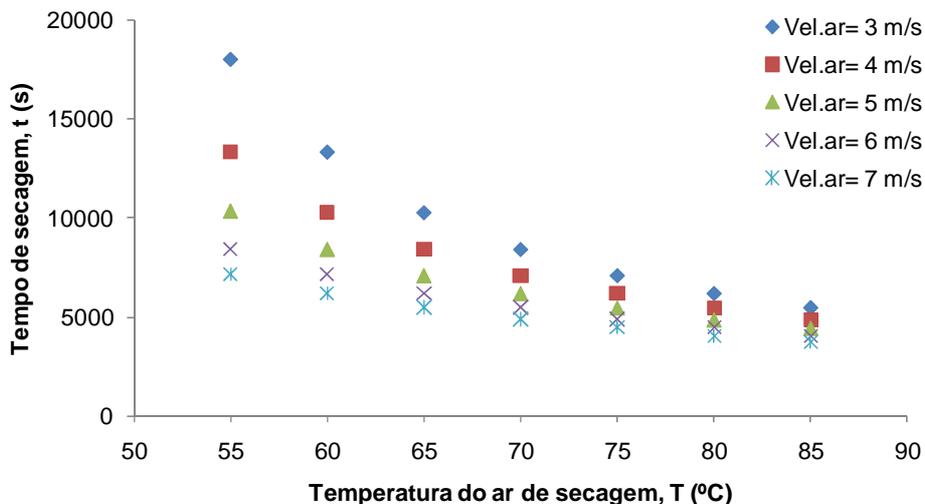


Figura 5.22 Simulação do comportamento do tempo de secagem para diversas temperaturas e velocidades do ar de secagem para 0,004 m de espessura.

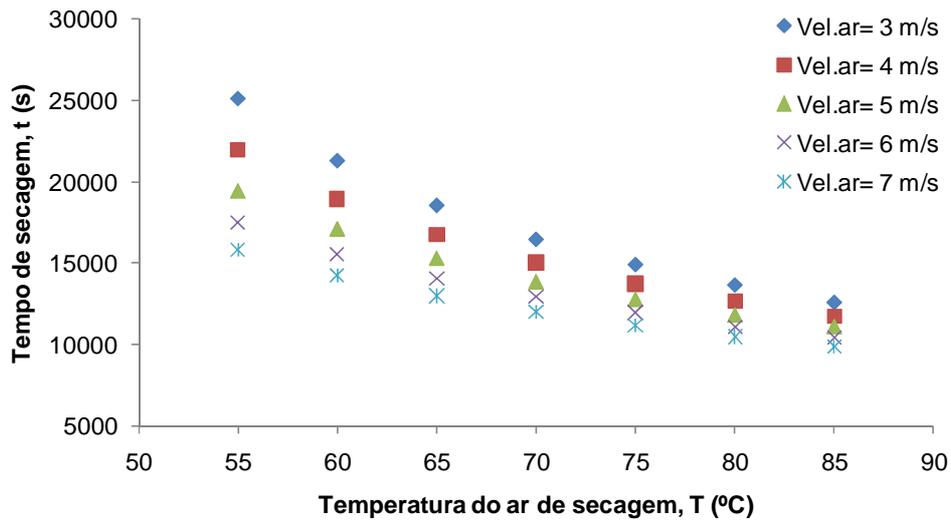


Figura 5.23 Simulação do comportamento do tempo de secagem para diversas temperaturas e velocidades do ar de secagem para 0,007 m de espessura.

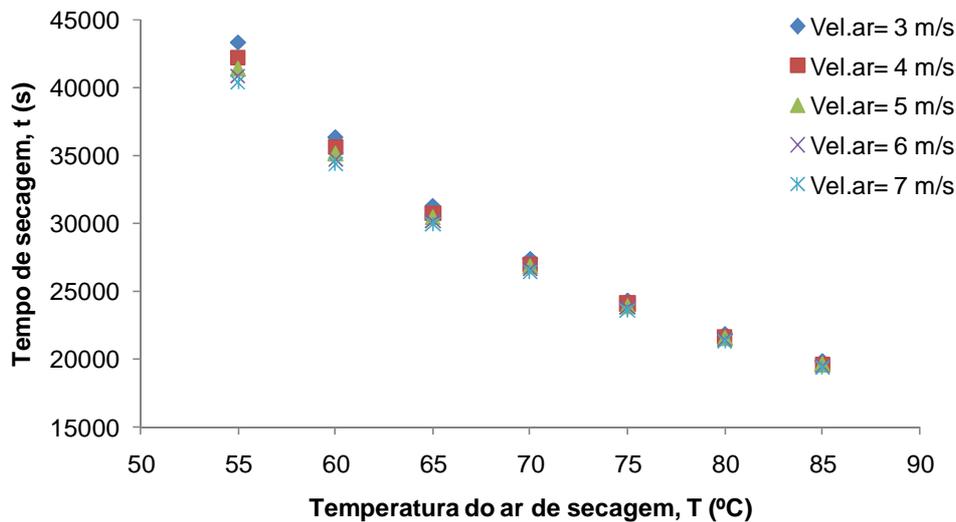


Figura 5.24 Simulação do comportamento do tempo de secagem para diversas temperaturas e velocidades do ar de secagem para 0,010 m de espessura.

Com o modelo numérico, pôde-se prever o tempo final de secagem, como mostrado nas Figuras 5.22 a 5.24, e pode-se observar que nas Figuras 5.22 e 5.23, espessuras de 0,004 e 0,007 respectivamente, que para temperaturas mais elevadas, os tempos finais de secagem ficaram bem próximos, independentes da velocidade do ar de secagem. E a Figura 5.24, cuja espessura foi de 0,010 m, e na faixa de temperatura simulada, mostrou que os tempos finais de secagem ficaram bem próximos, independentes da velocidade do ar de secagem.

6. CONCLUSÕES

A construção da bancada experimental foi de grande importância, por se tratar de uma ferramenta que possibilitou a obtenção de informações sobre a transferência de calor e massa em fatias de caju. A bancada permitiu o estudo da cinética de secagem, com a elaboração de curvas de secagem e da taxa de secagem, para diversas temperaturas, velocidades do ar e espessuras das fatias.

Os experimentos foram feitos variando-se a temperatura do ar entre 60 e 80 °C, as velocidades médias do ar de secagem entre 3 e 7 m/s, para as espessuras de 0,004, 0,007 e 0,010 m. Com eles, pode-se verificar que quanto maior a temperatura e a velocidade do ar, maior é a taxa de secagem, e que a variação da temperatura tem maior influência do que a variação da velocidade do ar, na taxa de secagem. Também mostrou que quanto mais espessa a amostra, menor é a sua velocidade de secagem.

Os dados gerados nos experimentos foram utilizados para a busca do melhor modelo de ajuste para curvas de secagem, dentre os modelos existentes na literatura, através do uso de uma regressão multilinear, e dentre eles foram escolhidos os modelos Werma et al. e Logarithmic, por apresentarem o maior coeficiente de determinação e os menores valores do erro médio quadrado e do qui-quadrado.

Os dados experimentais também foram importantes na obtenção dos valores da difusividade efetiva de massa, e na simulação numérica da secagem de fatias de caju, através da curva da taxa de secagem, utilizada na condição de contorno das superfícies externas. Durante os experimentos foram feitos estudos da taxa de encolhimento das fatias, que também foi incorporada ao modelo matemático.

O modelo matemático unidimensional, para secagem, baseado nas equações de balanço, desenvolvido neste trabalho foi discretizado em volumes finitos e implementado em MATLAB, e foi validado através da comparação com solução analítica, com o qual mostrou excelente concordância. O modelo também foi capaz de acompanhar a evolução da umidade e dar confiabilidade nos resultados da simulação numérica, dentro das faixas ensaiadas. No que diz respeito à temperatura no interior do caju, embora o modelo não tenha apresentado bons resultados, mesmo assim se observou uma tendência bem correlacionada aos dados experimentais.

A simulação da secagem das fatias do caju possibilitou a obtenção das propriedades termofísicas e a difusividade de massa, para as diversas condições experimentais.

Podem-se citar outras contribuições que foram desenvolvidas durante a execução deste trabalho, como a criação de um fatiador de caju, que serviu para garantir a uniformidade e paralelismo no corte das amostras; a construção de um planilhímetro utilizada para o estudo do encolhimento (diâmetro) das amostras durante o processo de secagem; a criação de um medidor de espessura, que também permitiu o estudo do encolhimento(espessura) e a elaboração de um picnômetro e procedimentos laboratoriais para medição da densidade do caju em várias etapas de secagem.

7. TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, pode-se citar:

- a. Efetuar outros experimentos, dentro de metodologias do planejamento experimental e parâmetros com maior controle.
- b. Construir um modelo para simulação de secagem de frutas, num secador tipo bandejas incluindo o modelo numérico desenvolvido neste trabalho.
- c. Pesquisar a importância de outros mecanismos, que não os puramente difusivos, no transporte de massa no interior do caju e incluir no modelo numérico.
- d. Obter mais informações das forças internas do caju, provenientes das suas fibras.
- e. Elaborar mecanismos, para se obter a temperatura do interior do caju experimentalmente.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, F.A.P.; SOUZA, A.C.R.; 2004; “Cajuína: Como Produzir com Qualidade”; EMBRAPA, Documentos 95, ISSN 1677-1915.
- AKPINAR, E.K.; 2006; “Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetable and fruits”, *Journal of food engineering*, 73, 75-84.
- AKPINAR, E.K.; BICER, Y; 2008; “Mathematical modeling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun”, *Energy Conversion & management*, 49, 1367-1375.
- ARAGÃO, R.F.; 2007; “Secagem de fatias de caju (*Anacardium occidentale* L.) em secador de bandejas”; Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de processos; UFCG-Campina Grande-PB.
- AZOUBEL, P.M.; 2002; “Influência de pré-tratamentos na obtenção de produtos secos do caju (*Anacardium occidentale* L.)”; Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos; UNICAMP-Campinas-SP.
- BALABAN, M.; 1989; “Effect of volume change in foods on the temperature and moisture content predictions of simultaneous heat and moisture transfer models”; *Journal of Food Process Engineering*; 12, 67-88.
- BARROS NETO, B. de; SCARMÍNIO, I. S. e BRUNS, R.E.; 1995; “Planejamento e otimização de experimentos”; Editora da UNICAMP-Campinas, 299.
- BERTHET, D.; BAKHOUYA, A.; BOUZON, J.; VERGNAUD, J. M.; 1992; “Drying of polymers. Modeling with diffusion-evaporation and shrinkage”; *Proceedings of the 8th IDS; part A*, 364-373.
- BRANDÃO, M.C.C., MAIA, G.A., LIMA, D.P., PARENTE, E.J.S., CAMPELLO, C.C., NASSU R.T., FEITOSA T., SOUSA, P.H.M.; 2003; “Physical and chemical, microbiological and sensorial analysis of cashew apples submitted to osmotic-solar dehydration”; *Revista Ciência Agronômica*, 34, 2, 139-145.
- BRAUN A.J.E., BANSAL, P.K., GROLLA, E.A.; 2002; “Energy and science analysis of air cycle heat pump dryers”, *International Journal of Refrigeration*; 25, 954–965.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W.; 1992; “Drying and storage of grains and oilseeds”, Westport: The AVI Publishing Company, 450.

- BROWNE, M.W. & CUDECK, R.; 1993; “Alternative ways of assessing model fit. In: Bollen”, K.A. & Long, J.S. (Eds.) Testing Structural Equation Models; Beverly Hills, CA; 136-162.
- CAJUNOR: Site Consultado em jan/2009: [http://www.cajunor.com.br/aplicações do caju](http://www.cajunor.com.br/aplicações%20do%20caju).
- CAMPOS, A.R.N., SANTANA, R.A.C., DANTAS, J.P., OLIVEIRA, L.S.C., SILVA, F.L.H.; 2005; “Enriquecimento protéico do bagaço do pedúnculo de caju por cultivo semi-sólido”; Revista de Biologia e Ciências da Terra, 5,2,1519-5228.
- CÁNOVAS, G.V.B., MERCADO, H.V.; 1996; “Dehydration of foods”; Chapman & hall-International Thomson Publishing; 330.
- CAPRISTE, G.H., WHITAKER, S. E ROTSTEIN, E.; 1988; “Drying of cellular material”; Chemistry Engineering Science, 43,11.
- CHIRIFE, J.; 1981; “Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods”; In: MUJUNDAR. A. S. (ed.) Advances in drying. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 73-102.
- CRANK, J.; 1975, “The mathematics of Diffusion”, Claredon Press Oxford, 414.
- DEVORE, J.L.; 2006; “Probabilidade e estatística:para engenharia e ciências”; Ed. Thomson, 6ª ed.
- DIAMENTE, L.M., MUNRO, P.A.; 1991; “Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices”; International Journal of Food Science and Technology, 26, 99.
- EL-SEBAIL, A.A., ABOUL-ENEIN, S., RAMADAN, M.R.I., EL-GOHARY, H.G.; 2002a; “Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer, Energy Conversion and Management“, 43, 2251–2266.
- EL-SEBAIL, A.A., ABOUL-ENEIN, S., RAMADAN, M.R.I., EL-GOHARY, H.G.; 2002b; “Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables, Energy”, 27, 845–859.
- EMBRAPA: Site Consultado em jan/2009: <http://caju.cnpat.embrapa.br/pif/>
- FILGUEIRAS, H.A.C; ALVES, R.E., MOSCA, J.L., MENEZES, J.B.; 1999; “Cashew apple for fresh consumption: research on harvest and post-harvest technology in Brazil”; Acta Horticulturae Wageningen, 485, 155-160.
- FOUST, A.S.; 1982; “Princípios de operações unitárias”, Rio de Janeiro, 401-434.
- FUSCO, A.J.; AVANZA, J.R.; AGUERRE, R.J.; GABITTO, J.F; 1991; “Difusional model for drying with volume change”, Drying Technology, 9, 2, 397-417.

- GALVÃO, A.M.P.; 2006; “Aproveitamento da fibra de caju (*Anacardium occidentale* L.) na formulação de um produto tipo hambúrguer”; Dissertação de mestrado em Tecnologia de Alimentos, UFCE-Ceará.
- GLOUANNEC, P., LECHARPENTIER, D., NOEL, H.; 2002; “Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material”, *Applied Thermal Engineering*, 22, 1689-1703.
- GOUVEIA, J.P.G., MOURA, R.S.F., ALMEIDA, F.A.C., OLIVEIRA, A.M.V., SILVA, M.M.; 2002; “Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental”; *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6, 3, 471-474.
- GOUVEIA J.P.G.; 1999; “Avaliação da cinética de secagem de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) em um secador de leito fixo”; Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de alimentos- FEA-Campinas.
- HENDERSON, S.M.; 1974; “Progress in developing the thin layer drying equation”; *Trans ASAE*: 1167-72.
- IBGE, Site Consultado em fev/2011,
http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201102.pdf.
- JANKOWSKY, I.P., DUGATTI, M.A.; 2001; “Operational conditions of conventional kiln drying at wooden industries in tietê-SP”; *Scientia Forestalis*, 59, 101-103.
- JÚNIOR, J.A.D.; BEZERRA, F.C., 2002; “Qualidade de pedúnculo de cajueiro anão-precose cultivado sob irrigação e submetido a diferentes sistemas de condução e espaçamento”; *Revista Brasileira de Fruticultura*, 1,24, 258-262.
- KATEKAWA, M.E.; 2006; “Análise teórico-experimental do encolhimento: estudo da secagem de banana”; Tese de Doutorado; Departamento de Engenharia Química- UNICAMP- Campinas-SP.
- KEEY, R.B.; 1972; “Drying: principles and practice”, Pergamon Press-Oxford.
- KEEY, R.B.; 1978; “Introduction to Industrial Drying Operations”, Pergamon Press.
- KILPATRICK, P.W.; LOWE, E. e ARSDEL, W.B.; 1995; “Tunnel dehydrators for fruits and vegetables”, *Advances In food research*; New York, Academic Press, 6, 360.
- LABUSA, T.P.; 1980; “The effect of water activity on reaction kinetics of food deterioration”; *Food Technology*; 34, 4, 34-40.

- LABUZA, T.P., TANNEMBAUM, S.R., KAREL, M.; 1972; “Water content and stability of low and intermediate moisture”; *Moisture Food Technology*. 24, 543.
- LEITE, L.A.S.; PESSOA, P.F.A.P.; 2004; “Cultivo do cajueiro no Nordeste brasileiro: o agronegócio caju”; 12º AGRINORDESTE, Olinda-PE, -Site Consultado em jan/2009: www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo_583.pdf
- LEON, M.A., KUMAR, S., BHATTACHARYA, S.C.; 2002; “A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*”, 6, 367–393.
- LIMA, A.S.; FIGUEIREDO, R.W.; MAIA, G.A.; LIMA, J.R.; NETO, M.A.S.; SOUZA, C.R.; 2004; “Estudo da estabilidade de melões desidratados obtidos por desidratação osmótica seguida de secagem convencional.” *Revista Brasileira de Fruticultura*. Jaboticabal, SP, 26, 1, 107-109.
- LOMAURO, C.J.; BAKSHI, A.S. e LABUZA, T.P.; 1985; “Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part 1: Fruit, vegetable and meat products”. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technologies*, 18, 112-22.
- MAIA, G.A., MONTEIROR, J.C.S., GUIMARÃES, A.C.L.; 2001; “Estudo da Estabilidade Físico-Química e Química do Suco de Caju com Alto Teor de Polpa”; *Ciênc. Tecnol. Alimentos*; Campinas, 21, 1, 43-46.
- MAY B.K., PERRÉ P., 2002; “The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs”; *Journal of Food Engineering*, 54, 33. 271-282.
- MAYOR, L.; SERENO, A.M.; 2004; “Modeling shrinkage during convective drying of food materials: a review”; *Journal of Food Engineering*, 61, 3, 373-386.
- MACHADO, A.V.; 2009; “Estudo da secagem do pedúnculo do caju em sistemas convencionais e solar: modelagem e simulação do processo”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Química; UFRN-Natal-RN.
- MARQUES, L.F.; 2006; “Processamento do pedúnculo do caju em avançado estágio de maturação: Desidratação osmótica e secagem para elaboração de passas de caju”; Dissertação de mestrado, Dept. Eng. Agrícola, UFCG- Grande-PB.
- MATTOS, J.S.; 2009; “Banco de dados de propriedades termofísicas de produtos hortícolas”; Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Química; UFRN-Natal-RN.

- MAZZA, G., LEMAGUER, M.; 1980; “Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations”; *Journal of Food Technology*, Oxford, 15, 2, 181-194.
- MENGES, H.O.; ERTEKIN, C.; 2006; “Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples”; *Journal of food engineering*, 77, 119-125.
- MICHALEWICZ, J.S., DUTRA, J.C.C., HENRIQUEZ, J.R., SILVA, R.G.; 2008; “Estudo experimental de um secador solar para frutas com secagem direta e indireta”; V Congresso Nacional De Eng. Mecânica, Salvador-BA, 357.
- MICHALEWICZ, J.S.; 2003; “Estudo paramétrico da secagem de placas de gesso: desenvolvimento de um protótipo em escala laboratorial”, *Dissertação de Mestrado*, Departamento Engenharia Mecânica; UFPE-Recife-Pernambuco.
- MIDILLI, A., KUCUK, H., YAPAR, Z.; 2002; “A new model for single layer drying”; *Dry Technology*; 20, 7, 1503-13.
- MISRA, R.N.; YOUNG, J.H. ; 1980; “Numerical solution of simultaneous diffusion and shrinkage during soybean drying”; *Trans. of the ASAE*, 23, 5, 1277-1282.
- MOHAMMADI, A., RAFIEE, S., KEYHANI, A., DJOMEH, Z.E; 2009; “Moisture content modeling of sliced kiwifruit during drying”; *Pakistan Journal OS Nutrition*; 8, 1, 78-82.
- MOREIRA, R.G.; 2002; “Unit operation in food processing”, chapter 7, available in baen.tamu.edu/users/moreira /bsen474.html.
- MOURA, R.S.F.; 2001; “Estudo da cinética de secagem de caju (*Anacardium occidentale* L.) em um secador de leito fixo”; *Dissertação Mestrado*; UFCG Campina Grande-PB.
- MULET, A., BERNA, A., AND ROSSEL O.C.; 1989; “Drying of carrots. I. Drying models”; *Drying Technology*, 7, 537-557.
- MÜHLBAUER, W., ESPER, MULLER, 1993; “Solar energy in agriculture”. ISES Solar World Congress, Budapest, Aug. 23–27.
- MURR, F.E.X.; 1992; “Estudo comparativo dos fenômenos de secagem de batata (*Solanum tuberosum*. L. Cultivar Bintie)”; *Tese de Doutorado*; Departamento de Engenharia de Alimentos- FEA-Campinas-SP.
- MUJUMDAR, A.S.; 1987; “Handbook of industrial drying”; New York: MarcelDekker.
- NOGUEIRA, R.L.; 1991; “Processo de secagem de banana (*Musa acuminiata* subgrupo Cavendish cultivar Nanica)”; *Dissertação de mest.*, FEA- Campinas-SP, 153.

- OKADA, M., VITALI, A.A., TEIXEIRA NETO, R.O., CARVALHO, R.; JARDIN, D.C.P.; 1997; “Fundamentos sobre secagem de sólidos In: Desidratação de frutas e hortaliças”- Manual técnico. Campinas: ITAL.
- OLIVEIRA, V.H.; 2002; “Cultivo do Cajueiro Anão Precoce”; EMBRAPA, Edit. Embrapa, Sistema de Produção I, 1, 40.
- PAIVA, F.F.A., GARRUTTI, D.S., NETO, R.M.S.; 2000; “ Aproveitamento industrial do caju”; Embrapa agroindústria Tropical/SEBRAE-CE, 37-39; (Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 38)
- PANG, G., SIMPSON, I., HASLETT, T.; 2001; ”Wood Science and Technology”, 487-502.
- PARK, K. S., VOHNIKOVA, Z., e BROD, F.P.R.; 2002; “Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.)”. *Journal of Food Engineering*, 51, 193–199.
- PARK, K.J.; 1987; “Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem”; Tese de Doutorado; Departamento de Engenharia de Alimentos- FEA- Campinas-SP.
- PERRY, R.H.; 1973; "Chemical Engineers' Handbook", Fifth Edition, McGraw-Hill, Section 20, 44-45.
- QUEIROZ, M.R.; 1994; “Estudo teórico-experimental da cinética de secagem de bananas”; Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, UNICAMP-Campinas-SP.
- RATTI, C., MUJUNDAR, A.S.; 1997; “Solar drying of foods: modeling and numerical simulation, *Solar Energy*”, 60, 3-4, 151-157.
- SAHIN, A.Z., DINCER, I.; 2002; “Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying”; *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 3267–3273.
- SANTIN, A. P.; 1996; “Estudo da secagem e da inativação de leveduras *saccharomyces cerevisiae*”; Dissertação de Mestrado-Departamento de Engenharia Química-UFSC-Florianópolis-SC.
- SILVA, J.S.; 1995; “Pré-processamento de produtos agrícolas”; Instituto Maria, Juiz de Fora-MG., 509.
- SILVA, J.S.; 2000; “Secagem e armazenamento de produtos agrícolas”, editora aprenda fácil, Viçosa-MG.

- SOUSA, S.; 1999; “Desenvolvimento experimental de passa de umbu (*Spondias tuberosa*, Arruda Câmara)”; Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Agrícola-UFCG- Campina Grande-PB.
- STRUMILLO,C., KUDRA, T.; 1989;”Drying: Principles, Applications and Design”, Gordon and Breach Sciences Publishers.
- SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E.; 1991; “Shrinkage effect on drying behavior of potato slabs”; *Journal of Food Engineering*, Barking; 13, 2, 103-114.
- SUZUKI, K., KUBOTA, K., HASEGAWA, T., HOSAKA, H.; 1976; “Shrinkage in dehydration of root vegetables”; *Journal Food Science*; 41, 1189–1193.
- TACO-Tabela Brasileira de Composição de Alimentos –Versão 2; (2006); Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação – NEPA e UNICAMP-Campinas – SP
- TOGRUL, I.T., PEHLIVAN, D.; 2003; “Modeling of drying kinetics of single apricot”; *Journal of Food Engineering*, 58, 23–32.
- TOGRUL, I.T, PEHLIVAN, D.; 2002; “Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers”, *Journal of food engineering*; 55, 209-216.
- UGULINO, S.M.P., 2007; “Técnicas de secagem para elaboração de passas de jaca”; Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Agrícola, UFCG- Campina Grande-PB.
- VAGENAS, G.K.; MARINOS-KOURIS, D.; 1991b; “Finite element simulation of drying of agricultural products with volumetric changes”; *Applied Mathematical Modeling*; New York, 15, 9, 475-482.
- WANG, C.Y., SINGH R.P.; 1978; “A single layer drying equation for rough rice”; *Am Soc Agr Eng- St. Joseph (MI)*; 78-3001.
- WERMA, L.R., BUCKLIN, R.A., ENDAN, J.B., WRATTEN, F.T.;1985; “Effects of drying air parameters on rice drying models”; *Transactions of the ASAE*, 28, 296-301.
- XANTHOPOULOS, G.; OIKONOMOU, N.; LAMBRINOS G.; 2007; “Applicability of a single-layer drying model to predict the drying rate of whole figs”; *Journal of Food Engineering*, 81, 553-559.
- YALDIZ, O., ERTEKIN, C.; 2001; “Thin layer solar drying of some vegetables”; *Drying Technology*; 19, 583–96.
- ZHANG, Q.; LITCHFIELD, J.B.; 1991; “An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer”; *Drying Technology*, 9, 383-395.

9. ANEXOS

Anexo A(AFERIÇÃO DOS TERMOPARES)

A aferição dos termopares utilizados neste trabalho foi determinado pelo método comparativo definido pela ITS-90 (International Temperature Scale of 1990). Nestes tipos de métodos o termopar a calibrar é imerso em um meio uniforme e estabilizado juntamente com outro sensor que servirá de padrão de referência. Este padrão pode ser um termômetro de bulbo, termopar calibrado, RTD, etc. Este método de calibração é mais barato do que sistemas que utilizam métodos absolutos e atendem a uma grande parte das calibrações.

Neste estudo utilizou-se 8 Termopares tipo “T”, e optou-se por utilizar um recipiente cilíndrico metálico preenchido com sílica (areia homogênea) e inserido em uma estufa para calibração em temperaturas de referência de 30, 50, 70 e 90°C. A areia é utilizada para garantir uma melhor estabilização da temperatura lida pelos termopares livre dos efeitos da convecção. A Figura A1 mostra o esquema do recipiente e a Figura A2 mostra a estufa utilizada.



Figura A1. Termômetro de referência dentro de recipiente com areia.



Figura A2. Estufa QUIMIS utilizada na calibração de termopares.

A estufa é equipada com um termopar tipo K, ligado a um mostrador digital para verificação da temperatura no interior da estufa. Os termopares e o termômetro de bulbo padrão foram cuidadosamente inseridos no estabilizador inercial de temperatura e postos dentro da estufa conforme mostra a Figura A3.



Figura A3. Esquema da calibração de termopares utilizando a estufa.

Os termopares foram ligados a um equipamento de aquisição de dados (logger) da marca DataTakerT650, com resolução de 3 casas decimais e precisão de 0,01. As medições foram realizadas após a estabilização da temperatura ou que as diferenças de temperatura entre o termopar e o termômetro padrão ficassem constantes, a partir deste momento fez-se 10 leituras a cada 2 minutos de intervalo. Esta rotina foi realizada para todas as outras temperaturas 30, 50, 70 e 90°C. Após o término das medições, agruparam-se todas as medições para cada faixa de temperatura, foi calculada a média dos dez valores medidos para cada temperatura, conforme Tabela A1.

Tabela A.1. Agrupamento das temperaturas padrão para os termopares.

Padrão	TT1	TT2		Padrão	TT1	TT2
28,9	27,35	28,16		73,3	71,81	72,40
28,9	27,34	28,15		73,3	71,84	72,39
28,9	27,34	28,14		73,3	71,77	72,39
28,9	27,30	28,12		73,3	71,79	72,37
28,9	27,31	28,13		73,3	71,82	72,39
28,9	27,35	28,14		73,3	71,78	72,35
28,9	27,33	28,12		73,3	71,76	72,36
28,9	27,34	28,09		73,3	71,67	72,34
28,9	27,27	28,07		73,3	71,63	72,30
28,9	27,28	28,11		73,3	71,66	72,30
28,9	27,32	28,12		73,3	71,75	72,36
Padrão	TT1	TT2		Padrão	TT1	TT2
55,3	54,16	54,51		95,4	93,55	94,16
55,3	54,14	54,53		95,4	93,57	94,13
55,3	54,15	54,57		95,4	93,54	94,14
55,3	54,09	54,55		95,4	93,50	94,11
55,3	54,20	54,53		95,4	93,48	94,08
55,3	54,02	54,54		95,4	93,51	94,08
55,3	53,98	54,60		95,4	93,43	94,03
55,3	53,94	54,59		95,4	93,44	94,04
55,3	53,92	54,57		95,4	93,44	94,03
55,3	53,93	54,52		95,4	93,32	94,00
55,3	54,05	54,55		95,4	93,48	94,08

Após se coloca os dados em um gráfico de dispersão, ajustou-se uma curva. Na Figura A4, pode-se observar que uma reta se ajusta muito bem devido aos coeficientes de determinação ser bem próximos da unidade.

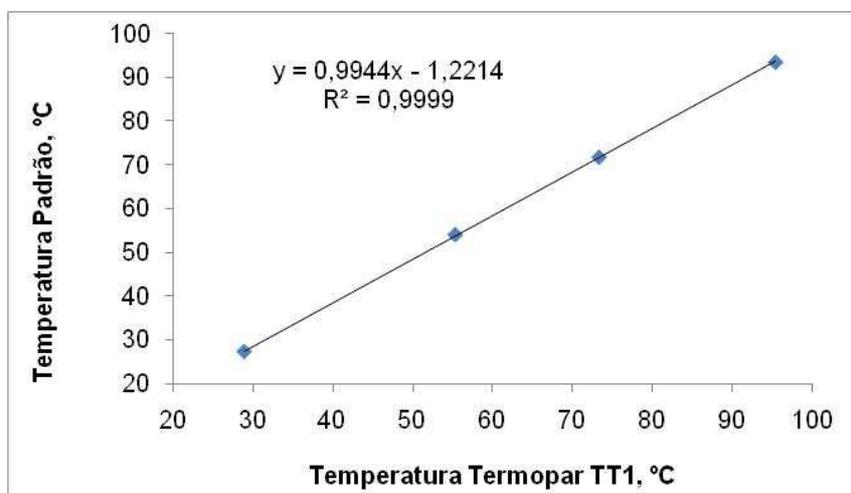


Figura A4. Gráfico da aferição do termopar TT1.

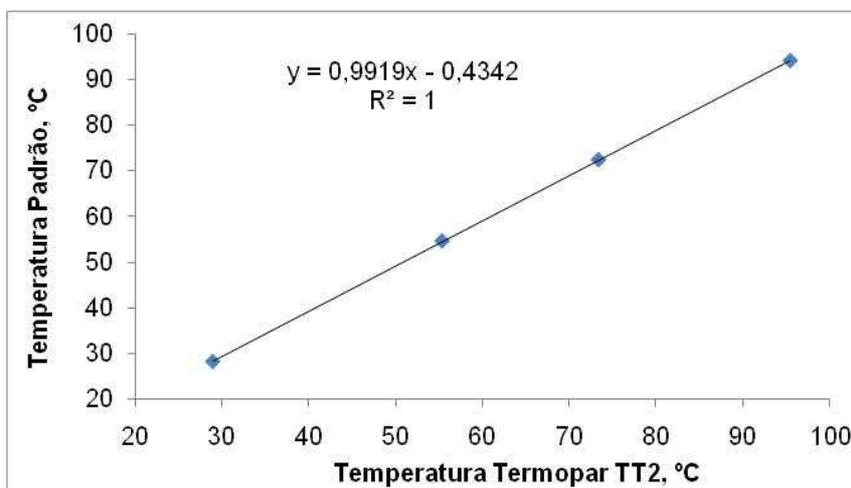


Figura A5. Gráfico da aferição do termopar TT2.

Os valores medidos pelo termopar são colocados no eixo do “X” e os valores medidos com o termômetro padrão no eixo do “Y”, gerando uma série de pontos conforme mostra a Figura A4, representados pelos pontos em azul. Após a construção dos gráficos, fez-se o ajuste de curva, que neste caso o que mais se apropria é o linear dando o valor de r^2 próximo da unidade, e sua curva de ajuste é representada pela linha. Este procedimento é repetido para todos os termopares. As equações geradas foram utilizadas para ajustar os valores das temperaturas no interior das amostras de caju.

AnexoB (ANÁLISE DAS INCERTEZAS EXPERIMENTAIS)

A análise de incertezas é o procedimento usado para quantificar a validade dos dados experimentais e a sua precisão (HOLMAN, 2001). Segundo o mesmo autor, os erros estão sempre presentes, quando são feitas medições experimentais. Além dos enganos grosseiros cometidos pelo experimentador, os erros podem ser de dois tipos. Os fixos (ou sistemáticos) causam medições repetitivas erradas da mesma quantidade para cada tentativa. O erro fixo é o mesmo para cada leitura, e pode ser removido pela calibragem adequada ou pela correção. O erro aleatório (não repetitividade) é diferente para cada leitura e, portanto, não pode ser removido. Os fatores que introduzem o erro aleatório são incertos por sua própria natureza. O objetivo da análise de incerteza é estimar o erro aleatório provável nos resultados experimentais.

Admitiu-se que o equipamento foi construído corretamente, e que foi calibrado de forma adequada, eliminando os erros fixos. Admitiu-se que os instrumentos têm resolução apropriada e que as flutuações de leitura não são excessivas. Admitiu-se também que se tomou cuidado ao fazer e registrar observações, de modo que só os erros aleatórios permanecem.

Existem procedimentos para se estabelecer a incerteza de medições experimentais como estas se propagam nos resultados calculados. Admitindo que R represente um resultado obtido a partir de valores medidos experimentalmente (x_1, x_2, \dots, x_n) tal que $R=R(x_1, x_2, \dots, x_n)$, então a incerteza no resultado devido à propagação das incertezas dos valores medidos poderá ser escrita de acordo com Holman(2001), da seguinte forma;

$$\varepsilon_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \varepsilon_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \varepsilon_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \varepsilon_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.1})$$

onde, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, representam as incertezas dos valores medidos, e ε_R a incerteza no valor calculado.

A seguir aplicar-se-a esta metodologia para determinar a incerteza nos cálculos do Conteúdo de Umidade.

$$X(t) = \frac{P(t) - P_{bs}}{P_{bs}} \quad (\text{B.2})$$

Aqui apenas será considerada a incerteza na medida do peso da amostra, $P(t)$,

$$\varepsilon_{x(t)} = \frac{\varepsilon_{P(t)}}{P_{bs}} \quad (\text{B.3})$$

Como resultado, tem-se;

Tabela B.1. Incertezas globais.

Tempo	Temp.=79,9 °C Vel.=3,9 m/s	Temp.=81,7 °C Vel.=4,2 m/s	Temp.=80,9 °C Vel.=4,2 m/s	Media	Incerteza Global
0	7,33	7,33	7,33	7,33	0,00
1200	5,15	5,57	5,58	5,44	0,28
2400	3,91	4,21	4,21	4,11	0,20
3600	2,94	3,19	3,18	3,10	0,16
4800	2,14	2,39	2,38	2,30	0,16
6000	1,53	1,70	1,69	1,64	0,11
7200	1,01	1,06	1,05	1,04	0,03
8400	0,64	0,68	0,67	0,66	0,03
9600	0,37	0,40	0,39	0,39	0,02
10800	0,23	0,23	0,22	0,22	0,01
12000	0,15	0,15	0,14	0,15	0,01
13200	0,12	0,11	0,11	0,11	0,00
14400	0,10	0,09	0,08	0,09	0,01
15600	0,09	0,07	0,08	0,08	0,01
16800	0,08	0,06	0,09	0,07	0,02
18000	0,07	0,05	0,05	0,06	0,01
19200	0,07	0,04	0,04	0,05	0,02
20400	0,06	0,04	0,04	0,04	0,01
21600	0,05	0,03	0,04	0,04	0,01

Os valores da incerteza global, Tabela B.1, foram obtidos a partir da raiz da soma dos quadrados da incerteza do instrumento de medição e da incerteza das medições, conforme a Equação B.1.

O instrumento utilizado para a obtenção destes dados foi uma balança com precisão de 0,01g, cuja incerteza foi obtida pelo cálculo da propagação do erro através da Equação B.2.

A melhor estimativa para uma grandeza medida experimentalmente é a média aritmética de um conjunto de valores obtidos sob as mesmas condições experimentais. O erro desta estimativa, que representa a incerteza da medição, pode ser obtido a través do cálculo do erro padrão da média. Considerando uma probabilidade de 95% de que a medida esteja num intervalo ($\pm\sigma$) em torno da média, tomar-se-á para este caso a faixa da incerteza de 2σ . Então será obtida a incerteza dos desvios, através da seguinte Equação B.4:

$$\varepsilon_D = \frac{Desv_Pad * 2}{\sqrt{n}} \quad (B.4)$$

onde n é o número de amostras.

Analisando os resultados obtidos pode-se observar que a máxima incerteza está em torno de 30 % para este caso, concentrado no final da secagem. Cálculos para outros casos mostram que a ordem de grandeza nas incertezas é similar às aquelas mostrados aqui.