



UNIVERSIDADE FEDERAL DE
CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PROCESSOS

TESE DE DOUTORADO

SECAGEM DE BANANA EM ESTUFA:
EFEITOS TÉRMICOS E GEOMÉTRICOS

RAIMUNDO PEREIRA DE FARIAS

Campina Grande - PB
2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PROCESSOS**

TESE DE DOUTORADO

**SECAGEM DE BANANA EM ESTUFA:
EFEITOS TÉRMICOS E GEOMÉTRICOS**

RAIMUNDO PEREIRA DE FARIAS

Curso: Engenharia de Processos

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

Tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos como um dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Orientadores: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

**Campina Grande – PB
2011**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

F224s Farias, Raimundo Pereira de.
Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos /
Raimundo Pereira de Farias. — Campina Grande, 2011.
136 f.: il. col.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.
Orientadores: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima.
Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva
Referências.

1. Secagem de Banana. 2. Frutas. 3. Efeitos Térmicos e Geométricos.
I. Título.

CDU 66.047:634.773(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE RAIMUNDO PEREIRA DE FARIAS APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado **aprovada** em 31 de agosto de 2011.



Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
Orientador – UFCG/CCT/UAEM



Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva
Orientador – UFCG/CCT/UAEM



Prof. Dr. Vital Araújo Barbosa de Oliveira
Membro Externo – UEPB/CCEA



Profa. Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias
Membro Externo – UFCG/CDSA/UATEC



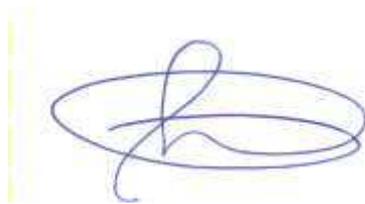
Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes
Membro Interno – UFCG/CTRN/UAEA



Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo
Membro Interno – UFCG/CCT/UAEM

Campina Grande – PB
Agosto 2011

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Raimundo Pereira de Farias e aprovada pela banca examinadora em 31 de agosto de 2011.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke, positioned to the right of a vertical yellow line.

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima (Orientador)
UFCG/CCT/UAEM

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima e Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva pelo caráter, profissionalismo na dedicação em me orientar e na especial colaboração neste trabalho.

Aos membros da Banca Examinadora por disponibilizarem tempo na apreciação deste trabalho.

A minha família (Maria José, Keitowney, Daiane, Hiure e Rodolfo) pelo apoio, carinho e compreensão.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos pela valiosa atenção.

Aos colegas da pós-graduação pela amizade, companheirismo e colaboração, os quais me proporcionam uma motivação para realização deste trabalho. Especialmente aos colegas de doutorado João Carlos, Ivonete e Cleide.

Aos amigos de graduação em Engenharia Mecânica: JoãoVictor, Leonardo Pereira, Filipe Nascimento e outros alunos de Iniciação Científica.

Aos meus amigos pela confiança e incentivo.

Aos professores e funcionários da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica que estiveram sempre presente e ao nosso dispor.

A todos os alunos de pós-graduação, pela ajuda, apoio, confiança, até mesmo nos momentos de descontração.

“Grande é a constância adquirida pela persistência em arriscar-se em favor do que mais importa; presença de espírito e ousadia para opinar; acuidade nas relações com o mundo, originalidade e talento para produzir.”

Romano Guardini

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 Secagem: Teoria e modelagem	4
2.2 Banana	6
2.2.1 Aspectos produtivo e mercadológico.....	6
2.2.2 Aspectos da composição e tecnologia de preservação	9
2.2.2.1 Composição química, vitamínica, mineral e nutricional	9
2.2.2.2 Propriedade termo-físico-químico da banana.....	10
2.2.2.3 Tecnologia de conservação	14
2.2.2.3.1 Perdas e preservação	14
2.2.2.3.2 Estado da arte sobre desidratação de banana	17
3 METODOLOGIA	25
3.1 Material e métodos experimentais	25
3.1.1 Material.....	25
3.1.2 Procedimentos experimentais	28
3.2 Metodologia matemática.....	30
3.2.1 Parâmetros auxiliares e dados de secagem	30
3.2.2 Tratamento estatístico dos dados	34
3.2.2.1 Modelo empírico de secagem	34
3.2.2.2 Modelo empírico de aquecimento	34
3.2.2.3 Modelo empírico de variação volumétrica	35
3.2.2.4 Métodos estatísticos.....	37
3.2.2.4.1 Regressão não-linear: o processo iterativo	37

3.2.2.4.2 Testes estatísticos aplicados aos ajustes	40
3.2.2.5 Modelo de difusão.	41
3.2.2.5.1 A Equação de difusão.	42
3.2.2.5.2 Soluções analíticas da equação de difusão.	42
3.2.2.6 Otimização: determinação de parâmetros.....	49
3.2.2.6.1 Otimizador para soluções com condições de contorno do primeiro tipo.....	49
3.2.2.6.2 Otimizador para soluções com condição de contorno do terceiro tipo.....	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Experimental.....	53
4.2 Empírico.....	81
4.3 Difusão para o transporte de água.....	104
4.3.1 Cilindro infinito: bananas inteiras.....	104
4.3.2 Parede infinita: bananas cortadas longitudinalmente.....	111
4.3.3 Cilindro finito: bananas cortadas em rodela.....	118
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
5.1 Conclusões	127
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
ANEXOS	136

RESUMO

FARIAS, Raimundo Pereira de, *Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2011. 159p. Tese (Doutorado)

Este trabalho apresenta um estudo teórico e experimental da secagem de banana. Bananas nos formatos geométricos: inteiras, cortadas longitudinalmente ao meio e em rodela, foram secadas em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C. Modelos empíricos de secagem, aquecimento e variação volumétrica foram propostos e ajustados aos dados experimentais. A análise estatística de regressão não-linear foi feita para verificar a consistência dos modelos para representar os resultados experimentais. Modelos difusivos uni e bidimensionais foram aplicados para descrever a cinética de secagem e estimar os coeficientes de transporte difusivo e convectivo utilizando o Método dos Mínimos Quadrados. Os resultados revelaram que os parâmetros temperatura e forma geométrica têm efeitos significativos nas cinéticas de secagem, aquecimento e encolhimento da banana. Taxas de secagem, aquecimento e variações dimensionais mais elevadas foram verificadas com temperaturas do ar e relação área/volume das amostras mais altas. Todos os modelos propostos apresentaram boa concordância com os dados experimentais. Valores dos coeficientes de encolhimento dimensional e adimensional foram obtidos e analisados. Os coeficientes de transporte de massa difusivo e convectivo tendem a aumentar com o aumento da temperatura do ar de secagem.

Palavras-chave: massa, encolhimento, aquecimento, modelo empírico, difusão, experimental.

ABSTRACT

FARIAS, Raimundo Pereira de, *Drying of banana in oven: thermal and geometric effects*. Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2011. ??p. Tese (Doutorado)

This work presents a theoretical and experimental drying study of banana. Banana in the shapes whole, half-longitudinal slices and cylindrical pieces were dried in an oven at temperatures 40, 50, 60 and 70°C. Drying, heating and shrinkage lumped models were proposed and fitted to experimental data. Non-linear regression analyses were done to verify the consistence of the models to predict the experimental data. Diffusive models (1D and 2D) were applied to describe drying kinetic and to estimate diffusive and convective transport coefficients by using the least square error technique. Results revealed which temperature and shape affect significantly drying, heating and shrinkage of banana. Drying, heating and dimensions variations were increased when higher temperature and area/volume relationship are used. The fitted models presented good concordance with the experimental data. Dimensional and non-dimensional shrinkage coefficients were obtained and analyzed. The diffusive and convective mass transport coefficients have a tendency to increase by increasing air-drying temperature.

Key-words: mass, shrinkage, heating, empirical models, diffusion, experimental.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Banana prata	25
Figura 3.2	Paquímetro digital Messen, com certificado de calibração, 6 polegadas 0,01 e faixa de medição: 0 – 150 mm	26
Figura 3.3	Balança analítica eletrônica digital com tara automática	26
Figura 3.4	Termômetro infravermelho digital tipo pistola, modelo TI – 890	27
Figura 3.5	Termohigrômetro digital	27
Figura 3.6	Estufa de secagem com renovação/circulação de ar	27
Figura 3.7	Anemômetro de palhetas com leitura digital	28
Figura 3.8	Amostras de bananas utilizadas nos experimentos. a) banana inteira, b) banana cortada longitudinalmente e c) banana cortada em rodela	29
Figura 3.9	Modelo das amostras de banana mostrando o comprimento (C), a largura/altura (L), diâmetro (D) e local da medição da temperatura da banana	30
Figura 3.10	Vista interna da estufa de secagem com renovação/circulação de ar	30
Figura 3.11	Parede infinita de espessura L_1	43
Figura 3.12	Cilindro infinito: raio R muito menor que o comprimento L	45
Figura 3.13	Cilindro finito de raio R e comprimento L	48
Figura 4.1	Varição do teor de umidade médio adimensional da banana inteira durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	54
Figura 4.2	Varição do teor de umidade médio adimensional da banana cortada longitudinal durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	55

Figura 4.3	Varição do teor de umidade médio adimensional da banana cortada em rodela durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	55
Figura 4.4	Varição do teor de umidade médio adimensional da banana durante a secagem a 40°C	56
Figura 4.5	Varição do teor de umidade médio adimensional da banana durante a secagem a 50°C	56
Figura 4.6	Varição do teor de umidade médio adimensional da banana durante a secagem a 60°C	57
Figura 4.7	Varição do teor de umidade médio adimensional da banana durante a secagem a 70°C	57
Figura 4.8	Razão entre o volume medido e inicial da banana inteira em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	58
Figura 4.9	Razão entre o volume medido e inicial da banana cortada longitudinal em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	59
Figura 4.10	Razão entre o volume medido e inicial da banana cortada em rodela em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	59
Figura 4.11	Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do tempo durante a secagem a 40°C	60
Figura 4.12	Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do tempo durante a secagem a 50°C	60
Figura 4.13	Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do tempo durante a secagem a 60°C	61
Figura 4.14	Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do tempo durante a secagem a 70°C	61
Figura 4.15	Razão entre o volume medido e inicial da banana inteira em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.....	62
Figura 4.16	Razão entre o volume medido e inicial da banana cortada longitudinal em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	63
Figura 4.17	Razão entre o volume medido e inicial da banana cortada em rodela em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	63
Figura 4.18	Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do teor de umidade durante a secagem a 40°C	64
Figura 4.19	Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do teor de umidade durante a secagem a 50°C	65

Figura 4.20	Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do teor de umidade durante a secagem a 60°C	65
Figura 4.21	Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do teor de umidade durante a secagem a 70°C	66
Figura 4.22	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana inteira em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	66
Figura 4.23	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana cortada longitudinal em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	67
Figura 4.24	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana cortada em rodela em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	67
Figura 4.25	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do tempo durante a secagem a 40°C	68
Figura 4.26	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do tempo durante a secagem a 50°C	68
Figura 4.27	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do tempo durante a secagem a 60°C	69
Figura 4.28	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do tempo durante a secagem a 70°C	69
Figura 4.29	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana inteira em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	70
Figura 4.30	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana cortada longitudinal em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	71
Figura 4.31	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana cortada em rodela em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	71
Figura 4.32	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do teor de umidade durante a secagem a 40°C	72
Figura 4.33	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do teor de umidade durante a secagem a 50°C	72
Figura 4.34	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do teor de umidade durante a secagem a 60°C	73
Figura 4.35	Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do teor de umidade durante a secagem a 70°C	73

Figura 4.36	Varição da temperatura adimensional na superfície da banana inteira durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	74
Figura 4.37	Varição da temperatura adimensional na superfície da banana cortada longitudinalmente durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	75
Figura 4.38	Varição da temperatura adimensional na superfície da banana cortada em rodelas durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C	76
Figura 4.39	Varição da temperatura adimensional na superfície da banana durante a secagem a 40°C	76
Figura 4.40	Varição da temperatura adimensional na superfície da banana durante a secagem a 50°C	77
Figura 4.41	Varição da temperatura adimensional na superfície da banana durante a secagem a 60°C	77
Figura 4.42	Varição da temperatura adimensional na superfície da banana durante a secagem a 70°C	78
Figura 4.43	Comparação entre os teores de umidade médios da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C	82
Figura 4.44	Comparação entre os teores de umidade médios da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C	83
Figura 4.45	Comparação entre os teores de umidade médios da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C	83
Figura 4.46	Comparação entre os teores de umidade médios da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.....	84
Figura 4.47	Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C	84
Figura 4.48	Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C	85
Figura 4.49	Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C	85

Figura 4.50	Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C	86
Figura 4.51	Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C	86
Figura 4.52	Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C	87
Figura 4.53	Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C	87
Figura 4.54	Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C	88
Figura 4.55	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C	90
Figura 4.56	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C	90
Figura 4.57	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.	91
Figura 4.58	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C	91
Figura 4.59	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C	92
Figura 4.60	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C	92
Figura 4.61	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C	93

Figura 4.62	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C	93
Figura 4.63	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C	94
Figura 4.64	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C	94
Figura 4.65	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C	95
Figura 4.66	Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C	95
Figura 4.67	Comparação entre o volume adimensional da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C.	97
Figura 4.68	Comparação entre o volume adimensional da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C	97
Figura 4.69	Comparação entre o volume adimensional da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C	98
Figura 4.70	Comparação entre o volume adimensional da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C	98
Figura 4.71	Comparação entre o volume adimensional da banana cortada longitudinalmente ao meio, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C	99
Figura 4.72	Comparação entre o volume adimensional da banana cortada longitudinalmente ao meio, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C	99
Figura 4.73	Comparação entre o volume adimensional da banana cortada longitudinalmente ao meio, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.	100
Figura 4.74	Comparação entre o volume adimensional da banana cortada longitudinalmente ao meio, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C	100

Figura 4.75	Comparação entre o volume adimensional da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C	101
Figura 4.76	Comparação entre o volume adimensional da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C	101
Figura 4.77	Comparação entre o volume adimensional da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C	102
Figura 4.78	Comparação entre o volume adimensional da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C	102
Figura 4.79	Cilindro infinito de raio R destacando a seção circular onde a distribuição de umidade para cada temperatura é investigada	105
Figura 4.80	Cinética de secagem de bananas inteiras para T = 40°C	106
Figura 4.81	Banana inteira, em t = 270 min, para T = 40°C: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição radial	106
Figura 4.82	Cinética de secagem de bananas inteiras para T = 50°C.....	107
Figura 4.83	Banana inteira em t = 270 min, para T = 50°C: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição radial	108
Figura 4.84	Cinética de secagem de bananas inteiras para T = 60°C	109
Figura 4.85	Banana inteira em t = 270 min, para T = 60°C: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição radial.....	109
Figura 4.86	Cinética de secagem de bananas inteiras para T = 70°C	110
Figura 4.87	Banana inteira em t = 270 min, para T = 70°C: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição radial	111
Figura 4.88	Parede infinita de espessura L ₁ onde a distribuição de umidade para cada temperatura é investigada	111
Figura 4.89	Cinética de secagem de bananas cortadas em fatias longitudinais para T=40°C	113
Figura 4.90	Banana em fatias longitudinais em t = 100 min, para T = 40°C: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição x	113

Figura 4.91	Cinética de secagem de bananas cortadas em fatias longitudinais para $T=50^{\circ}\text{C}$	114
Figura 4.92	Banana em fatias longitudinais em $t = 100$ min, para $T = 50^{\circ}\text{C}$: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição x	115
Figura 4.93	Cinética de secagem de bananas cortadas em fatias longitudinais para $T=60^{\circ}\text{C}$	116
Figura 4.94	Banana em fatias longitudinais em $t = 100$ min, para $T = 60^{\circ}\text{C}$: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição x	116
Figura 4.95	Cinética de secagem de bananas cortadas em fatias longitudinais para $T=70^{\circ}\text{C}$	117
Figura 4.96	Banana em fatias longitudinais em $t = 100$ min, para $T = 70^{\circ}\text{C}$: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus x	117
Figura 4.97	Cilindro finito destacando a seção retangular de lados R e L onde a distribuição de umidade para cada temperatura é investigada	118
Figura 4.98	Cinética de secagem de bananas em rodelas para $T = 40^{\circ}\text{C}$	119
Figura 4.99	Gráficos de contorno de bananas em rodelas para $T = 40^{\circ}\text{C}$ nos instantes: (a) 35 min; (b) 50 min; (c) 70 min e (d) 130 min	120
Figura 4.100	Cinética de secagem de bananas cortadas em rodelas para $T = 50^{\circ}\text{C}$	121
Figura 4.101	Gráficos de contorno de bananas cortadas em rodelas para $T = 50^{\circ}\text{C}$ nos instantes: (a) 35 min; (b) 50 min; (c) 70 min e (d) 130 min	121
Figura 4.102	Cinética de secagem de bananas cortadas em rodelas para $T = 60^{\circ}\text{C}$	122
Figura 4.103	Gráficos de contorno de bananas cortadas em rodelas para $T = 60^{\circ}\text{C}$ nos instantes: (a) 35 min; (b) 50 min; (c) 70 min e (d) 130 min	123
Figura 4.104	Cinética de secagem de bananas cortadas em rodelas para $T = 70^{\circ}\text{C}$	124
Figura 4.105	Gráficos de contorno de bananas cortadas em rodelas para $T = 60^{\circ}\text{C}$ nos instantes: a 35 min; (b) 50 min; (c) 70 min e (d) 130 min	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição química dos principais componentes da banana fresca	11
Tabela 2.2	Métodos de secagem e valores das densidades da partícula seca, da água, do leite úmido e coeficiente de encolhimento	12
Tabela 2.3	Difusividade de umidade de banana para várias temperatura e geometrias ...	13
Tabela 3.1	Parâmetros experimentais do ar e da banana inteira para cada teste de secagem realizado	32
Tabela 3.2	Parâmetros experimentais do ar e da banana cortada longitudinalmente ao meio para cada teste de secagem realizado	32
Tabela 3.3	Parâmetros experimentais do ar e da banana cortada em rodela para cada teste de secagem realizado.	33
Tabela 4.1	Dados dimensionais da banana inteira durante a secagem	78
Tabela 4.2	Dados dimensionais da banana cortada longitudinalmente durante a secagem	78
Tabela 4.3	Dimensionais da banana cortada em rodela durante a secagem	79
Tabela 4.4	Dados de encolhimento relativo durante a secagem de banana inteira	79
Tabela 4.5	Dados de encolhimento relativo durante a secagem de banana cortada longitudinalmente	79
Tabela 4.6	Dados de encolhimento relativo durante a secagem de banana cortada em rodela	80
Tabela 4.7	Parâmetros da Equação (3.10) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade da banana inteira	81
Tabela 4.8	Parâmetros da Equação (3.10) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade da banana cortada longitudinalmente	81

Tabela 4.9	Parâmetros da Equação (3.10) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade da banana cortada em rodela	82
Tabela 4.10	Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana inteira	88
Tabela 4.11	Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana cortada longitudinalmente ao meio	89
Tabela 4.12	Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana cortada em rodela.....	89
Tabela 4.13	Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana inteira..	96
Tabela 4.14	Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana inteira.	96
Tabela 4.15	Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana inteira.	96
Tabela 4.16	Coeficiente de encolhimento adimensional da banana.	103
Tabela 4.17	Resultados do processo de otimização para bananas inteiras, secas a 40°C	105
Tabela 4.18	Resultados do processo de otimização para bananas inteiras, secas a 50°C	107
Tabela 4.19	Resultados do processo de otimização para bananas inteiras secas a 60 °C	108
Tabela 4.20	Resultados do processo de otimização para bananas inteiras secas a 70°C	110
Tabela 4.21	Resultados do processo de otimização para bananas cortadas longitudinalmente, secas a 40 °C	112
Tabela 4.22	Resultados do processo de otimização para bananas cortadas longitudinalmente, secas a 50°C	114
Tabela 4.23	Resultados do processo de otimização para bananas cortadas longitudinalmente, secas a 60°C	115
Tabela 4.24	Resultados do processo de otimização para bananas cortadas longitudinalmente, secas a 70°C	117
Tabela 4.25	Resultados para bananas cortadas em rodela a 40°C	119

Tabela 4.26	Resultados para bananas cortadas rodelas, secas a 50°C	120
Tabela 4.27	Resultados do processo de otimização para bananas cortadas em rodelas, secas a 60°C	122
Tabela 4.28	Resultados para bananas cortadas em rodelas, secas a 70°C	123

NOMENCLATURA

Letras Latinas

$a_m, A_m, K_m, A_n,$ - constantes B_m, B_n $m = 0, 1, 2, \dots, n;$		[-]
Bi	número de Biot	[-]
C	comprimento	[m]
D	coeficiente de difusão	[m ² / s]
D	diâmetro $D_e, D_f.$	[m]
$\partial M / \partial t$	taxa de difusão	[1 / s]
Exp	exponencial	[-]
h	coeficiente de transferência convectivo de massa	[m / s]
J_0, J_1	funções de Bessel do primeiro tipo e ordens zero e um	[-]
L	largura/altura	[m]
L_1, L_2	dimensões do esferóide prolato	[m]
M	teor de umidade (base seca ou base úmida)	[kg/kg]
m	massa	[kg]
M^*	teor de umidade adimensional	[kg/kg]
\bar{M}	teor de umidade médio	[kg/kg]
\bar{M}^*	razão de umidade médio	[kg/kg]
r	coordenada radial esférica	[m]
R	raio	[m]
R	coeficiente de correlação	[-]
R^2	coeficiente de determinação	[-]
S	área superficial do sólido	[m ²]
S_0	área superficial inicial do sólido	[m ²]
t	tempo	[s]

T	temperatura	[K]
UR	umidade relativa	[%]
V	volume	[m ³]
v	velocidade	[m/s]
V ₀	volume inicial	[m ³]
X	coordenadas cartesianas	[m]

Letras gregas

$\bar{\beta}, \bar{\beta}', \bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2$	coeficientes de encolhimento	[-]
χ^2	qui-quadrado relativo	[-]
θ	temperatura do produto	[K]
ρ	densidade (massa específica)	[kg/m ³]
σ_{ymi}	incerteza de y_i	[-]
μ_m	autovalores	[-]

Superescritos

*	adimensional
---	--------------

Subscritos

e	equilíbrio
f	final
o	inicial
p	produto
s	seco
t	tempo
bu	base úmido
bs	base seca
a, w	água

Abreviações

exp	experimental
ana	analítico

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A banana é uma fruta que se destaca em relação à maioria das demais frutas, por ser saborosa e com aroma agradável, pelo valor calorífico e energético e, principalmente, pelo conteúdo mineral e vitamínico, apresentando-se como uma alternativa na alimentação básica da maioria da população dos países em desenvolvimento. Ela ocupa o quarto lugar na ordem dos produtos alimentares mais produzidos no mundo, perdendo apenas para o arroz, o trigo e o milho. É originária do sudeste da Ásia, sendo atualmente cultivada em praticamente todas as regiões tropicais do planeta.

Existem diversas variedades de bananas cultivadas, algumas delas se apresentam com características diferentes, como por exemplo, polpa mais rija e de casca mais firme e verde, geralmente designadas por plátanos, banana-pão ou plantains, que são consumidas cozinhadas (fritas cozidas ou assadas), constituindo o alimento base de muitas populações de regiões tropicais.

Segundo a CEPEA (2010), a banana é a fruta mais consumida no mundo. De 2001 a 2005, o consumo mundial de banana aumentou, em média, 2,37% por ano, totalizando 59,31 milhões de toneladas. O país que mais consome banana é a Índia, seguido pela China e pelo Brasil, com 5,61 milhões de toneladas. Considerando-se o valor “per capita”, as Filipinas se

destacam, consumindo 42,16 kg/habitante/ano em 2005, logo a frente do Brasil, que consome em média 30/kg/habitante/ano.

Dada a importância que a banana representa na alimentação humana e por ser consumida por pessoas de todas as idades e de todas as regiões do planeta, a credencia ser uma fruta que requer atenção mais criteriosa. Além disso, esta fruta *in natura* tem um período de consumo muito curto, devido ao seu teor de umidade elevado (aproximadamente 70% em base úmida) e um amadurecimento rápido.

A banana é uma fruta com alta velocidade de deterioração. Assim, faz-se necessário que ela receba cuidados especiais no manuseio, desde o campo até os setores onde deve ser consumida. Segundo a (AGRIANUAL 2003), a perda desta fruta apresenta uma elevada taxa, podendo chegar ao nível de 40%, isso quando a produção se destina ao consumo *in natura*. Na busca de uma alternativa para minimizar o problema, é possível fazer uso de alguns processos de conservação, sendo a secagem um dos principais processos que proporcionará melhores condições de armazenamento, conseqüentemente, uma vida mais longa, beneficiando tanto o produtor quanto o consumidor.

A literatura sobre a secagem de banana é vasta, podendo ser citados os seguintes trabalhos: Queiroz e Nebra (2001), Lima et al. (2002), Boudhrioua et al. (2002), Talla et al. (2004), Fernandes e Rodrigues (2007), Smitabhindu et al. (2008), Bains e Langrish (2008). A maioria destes trabalhos só contempla a perda de água e o encolhimento da fruta, sem se preocuparem com a temperatura e a geometria do produto que são fatores relevantes nos processos de secagem, sendo assim, a difusão de umidade de um produto qualquer depende da sua temperatura e forma, assim com também da temperatura e da umidade relativa do ar no ambiente. .

Neste sentido, os objetivos desta pesquisa são:

- a) Estudar a secagem de banana prata (perda de água, aquecimento e encolhimento) em diversas condições operacionais;
- b) Avaliar o efeito da geometria da fruta sobre a sua cinética de secagem e aquecimento;

- c) Propor modelos matemáticos empíricos para descrever a perda de água, aquecimento e variações dimensionais do produto ao longo do tempo;
- d) Aplicar o modelo difusivo, baseado na Lei de Fick, a secagem de banana, e comparar os resultados obtidos com os dados experimentais e estimar os coeficientes de transporte para diversas condições experimentais..

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Secagem: Teoria e modelagem

Operações de desidratação ou secagem são importantes processos nas indústrias químicas e de alimentos, como também no armazenamento de grãos e outros produtos biológicos. Durante a secagem de produtos biológicos ocorrem variações nas suas características físicas, químicas e biológicas, que, dependendo da intensidade do efeito, causam sua perda ou inutilidade para uma determinada função (alimentícia ou germinativa). Assim sendo, é importante o conhecimento dos efeitos da secagem sobre as propriedades químicas e biológicas do produto, uma vez que afetam sensivelmente os fenômenos de transferência de massa, principalmente em alimentos.

O encolhimento de materiais sólidos durante a secagem é um fenômeno físico observável, que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade, principalmente em produtos biológicos com alto teor de umidade inicial como é o caso de frutas e vegetais. Dessa forma o encolhimento pode ter um significativo efeito na difusividade de massa, e conseqüentemente na taxa de remoção de umidade.

Um vasto número de estudos tem sido conduzido para analisar o processo de secagem, uns consideram as condições externas do ar, como temperatura, umidade relativa e velocidade, correlacionadas à taxa de secagem do sólido, enquanto outros consideram as condições internas ao produto com ênfase nos mecanismos de movimento da umidade.

Diversos mecanismos de transporte em sólidos têm sido propostos na literatura (Lima, 1999) tais como: transporte por difusão líquida devido a gradientes de concentração de umidade; transporte por difusão de vapor devido a gradientes de concentração de umidade e de pressão parcial do vapor (causados por gradientes de temperatura); transporte por efusão (escoamento Knudsen). Ocorre quando o caminho livre médio das moléculas de vapor é da mesma ordem de grandeza do diâmetro dos poros. É importante para condições de alto vácuo, como por exemplo, secagem por criogenia; transporte de vapor por termodifusão devido a gradientes de temperatura; transporte de líquido por forças capilares; transporte de líquido por pressão osmótica; transporte de líquido devido à gravidade; transporte de líquido e de vapor, devido à diferença de pressão total, causada por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade, e transporte por difusão superficial.

Devido à importância de se entender melhor a migração de umidade em sólidos porosos, o desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever o processo de secagem tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores por várias décadas. Dependendo da espessura da camada do material estudado ou se o material seco é apenas uma partícula, estes modelos podem ser classificados em modelos em nível de partícula e modelos em nível de secador. Particularmente para grãos, a importância prática da secagem de uma partícula isolada ou de uma camada fina do produto é muito limitada, pois geralmente os materiais são secos em camadas espessas: estacionárias ou em movimento. Contudo no caso das frutas, estas são secas em camadas finas. Neste sentido, numerosos modelos têm sido propostos para descrever a taxa de perda de umidade durante a secagem de produtos agrícolas, podendo ser divididos em grandes grupos: modelos empíricos e semi-empíricos, modelos difusivos e modelos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis.

Os modelos empíricos e semi-empíricos normalmente são usados para descrever a secagem de uma partícula ou de uma camada fina de partículas. Os modelos empíricos consistem numa correlação direta entre o teor de umidade e o tempo de secagem, enquanto os semi-empíricos baseiam-se na hipótese da validade da Lei de Newton do Resfriamento, assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de umidade do produto e seu respectivo teor de umidade de equilíbrio, para as condições de secagem especificadas.

Os modelos difusivos geralmente baseiam-se na difusão de líquido e/ou vapor dentro do produto. Estes modelos descrevem as taxas de transferência de calor e massa como função da posição dentro do sólido e do tempo de secagem e consideram as resistências aos fluxos de calor e massa externa e interna. Já os modelos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis são mais complexos e assumem basicamente a validade das relações recíprocas de Onsager, o princípio de Curie e a existência de um equilíbrio termodinâmico local no interior do produto.

A consideração do efeito de encolhimento nos modelos de secagem depende do conhecimento das propriedades relativas ao fenômeno. Há falta de informações na literatura sobre os coeficientes de encolhimento, assim como de relações matemáticas entre a difusividade de massa, encolhimento e densidade. Apesar deste inconveniente, vários trabalhos incluem o efeito de encolhimento volumétrico no estudo do processo de secagem, fornecendo interpretações teóricas sobre o mesmo. Contudo, relativamente poucas pesquisas têm sido reportadas na literatura sobre estudos do fenômeno de encolhimento em problemas bidimensionais e tridimensionais (Lima, 1999).

2.2 Banana

2.2.1 Aspectos produtivo e mercadológico

A banana é considerada mundialmente um importante alimento, em função dos benefícios que ela pode oferecer. Esta fruta é rica em vitaminas e em minerais, principalmente o potássio. Destaca-se, dentre as frutas tropicais, como a mais consumida, e isso se dá pela sua versatilidade em modo de consumo (processada, frita, cozida e principalmente a grande quantidade consumida *in natura* como também pelo seu valor nutritivo. Além desses benefícios, a banana apresenta outras características que motivam o consumo: a qualidade, o sabor, o aroma agradável e as condições higiênicas que ela facilita no consumo *in natura*. A banana é a fruta mais produzida no mundo. Segundo a EMBRAPA (2009), a banana é uma fruta de grande importância mundial e o quarto alimento vegetal mais consumido no mundo, superada apenas pelo arroz, o trigo e o milho. Segundo os dados da FAO, em 2002, a produção mundial de banana foi de, aproximadamente, 65 milhões de toneladas e, a área plantada de aproximadamente 4 milhões de hectares. O Brasil foi o terceiro maior produtor

mundial de banana, com 6,4 milhões de toneladas, atrás do Equador (7,5 milhões) e da Índia (16 milhões).

Em 2004, por exemplo, a produção de banana ocupou uma área total de 4,54 milhões de hectares, sendo cultivada em 128 países, produzindo 70,59 milhões de toneladas. Os principais países produtores são: Índia, Brasil, China, Equador e Filipinas, representando 58% da produção mundial de banana (FAO, citada por Donato et al., 2006).

A maioria das frutas necessita de condições climáticas favoráveis para melhorar a sua qualidade e produtividade, a banana, que se adapta melhor e com boa produtividade e qualidade em região de clima tropical. Geralmente, o cultivo da banana é praticado em países em desenvolvimento, representando em 2007, cerca de 98% da produção mundial. Cerca de 130 países produzem bananas, no entanto, a produção, bem como as exportações e as importações, estão altamente concentradas em poucos países. Para se ter uma idéia, em 2007, 75% da produção mundial de banana foi cultivada nos 10 principais países produtores, sendo que somente Índia, China, Filipinas, Brasil e Equador produziram mais de 60% da produção mundial. Em 1970, os EUA eram o maior produtor mundial de banana com mais de 50% da produção, contra 34% da Ásia. Ao longo do tempo esta concentração de produção de bananas mudou, apresentando uma distribuição regional diferente. A produção da Ásia começou a aumentar no decorrer da década de 1990, chegando a 58% em 2007, contra 31% nas Américas. A produção no continente Africano é mantida relativamente inalterada desde a década de 1970 (13%) até os anos 2000 (11%) (FAO, citado por UNCTAD, 2011).

A banana é uma das principais frutas do comércio internacional e a mais popular no mundo. Em termos de volume exportado são os primeiros frutos, ao passo que ocupa o segundo lugar depois das frutas cítricas em termos de valor. Segundo a FAO, citada por UNCTAD (2011), o total de exportações mundiais de banana representou 16,8 milhões de toneladas em 2006. A banana também forma um grupo “commodity” muito importante para muitos países em desenvolvimento, como acontece com o trigo, o arroz e o milho, daí a relevância da banana na alimentação da população de baixa renda. Alguns dos principais países produtores de banana, como a Índia e o Brasil, têm pouca participação no comércio de exportação. Na realidade, apenas cerca de um quinto da produção total de banana brasileira é comercializada internacionalmente.

A indústria de processamento da banana representa uma fonte muito importante de renda, gerando emprego e receita para a população que lida com essa fruta, principalmente nos países em desenvolvimento da América do Sul e do Caribe, assim como os da Ásia e da África que trabalham com a exportação da banana. De acordo com estatísticas da FAO, citado por UNCTAD (2011), as exportações mundiais de bananas são avaliadas em um total de 5,8 bilhões de dólares americanos em 2006, tornando-se claramente uma fonte vital de rendimento para muitos países em desenvolvimento e mostrando que existe uma forte ligação entre a renda gerada pela banana e a segurança alimentar das famílias.

As exportações mundiais de bananas também mostram um elevado nível de concentração nos países em desenvolvimento, respondendo pela maior parte das exportações. Somente a América do Sul e o Caribe contribuíram com cerca de 70% das exportações mundiais em 2006. Os países que lideraram as exportações de banana em 2006 foram Equador, Costa Rica, Filipinas e Colômbia, sendo eles responsáveis por 64% das exportações mundiais, onde o Equador sozinho comercializou mais de 30% do total das exportações de banana (UNCTAD, 2011). O volume da exportação de banana traz mudanças de renda para aqueles que trabalham diretamente na produção de banana, tanto para os pequenos agricultores, como para os assalariados nas plantações dessa fruta. Além disso, as indústrias secundárias e terciárias e seus funcionários também sentem os efeitos dessas mudanças. No Brasil as exportações da fruta brasileira ainda não são representativas. No ano 2006, as vendas externas de banana renderam ao Brasil cerca de US\$ 27 milhões, os países da União Européia foram os principais compradores, pagando cerca de US\$ 15 milhões pelas bananas brasileiras.

Com relação às importações, as principais regiões representadas pelos três maiores importadores de banana são a União Européia, os Estados Unidos da América e o Japão, que representam mais de 70% do total das importações mundiais em 2006, enquanto os dez primeiros países importadores de banana representaram mais de 80% das importações totais (UNCTAD, 2011). Desta forma, fica evidente a dependência dos países exportadores de banana em relação a esses países sendo sensivelmente afetados pela economia mundial que apresenta inúmeras incertezas mercadológicas.

2.2.2 Aspectos da composição e tecnologia de preservação

2.2.2.1 Composição química, vitamínica, mineral e nutricional

A banana é uma fruta de elevado valor nutricional. É boa fonte energética, possuindo alto teor de carboidrato-amido e açúcares. Contêm ainda teores consideráveis de vitamina A, B1 (tiamina), B2 (riboflavina), C e de sais minerais, como: potássio, fósforo, cálcio, sódio e magnésio, além de outros em menor quantidade. A inclusão da banana, rica em potássio, na dieta habitual dos adultos e idosos está sendo recomendada por médicos e nutricionistas. Estudos recentes revelam a importância dos minerais nas funções musculares adequadas, inclusive o coração. Uma banana média, de 115 g, fornece um terço do potássio diário recomendado para as necessidades de uma pessoa. Cada banana contém cerca de 100 calorias, sendo, por isso, um dos alimentos favoritos dos atletas, que a consideram um anabolizante natural. Em termos de fruta como fonte de potássio, a banana só é superada pelo abacate, que é rico em gordura. A inclusão da banana na dieta habitual reduz o risco de derrame e doenças relacionadas à pressão sanguínea. Essa afirmação poderá até constar do rótulo da fruta nos Estados Unidos, depois que as autoridades normativas de drogas e alimentos aprovaram os estudos apontando os benefícios da banana (EMBRAPA, 2009).

Segundo estudos realizados nas Filipinas, comer duas ou três bananas por dia é um excelente remédio para superar a depressão e outro estudo destacou o alto conteúdo do tryptophan, um antidepressivo natural na fruta. A conclusão é do Instituto de Pesquisa de Alimento e Nutrição (FNRI). Uma pesquisa publicada recentemente assegura que os níveis de tryptophan nas bananas mantêm os níveis de serotonina no cérebro e melhoram o humor das pessoas. O FNRI recomenda a ingestão de duas ou três bananas por dia, equivalentes a 20 a 30 g de carboidratos e entre 80 e 120 kcal. Os pesquisadores filipinos observaram outras virtudes da banana para a saúde, como os altos níveis de vitaminas A, C, K e B6. A vitamina B6, especificamente, é essencial na dieta e sua ausência pode provocar insônia, fraqueza e irritabilidade. Os cientistas destacam que a vitamina regula o nível de glicose no sangue, o que também repercute no estado de ânimo das pessoas. O Instituto acrescenta que a banana não produz colesterol nem causa obesidade, reduz o risco de ataques cardíacos e contribui para reforçar a massa muscular e a energia, especialmente nas crianças (EMBRAPA, 2009).

Sob o ponto de vista tecnológico e comercial, devido à grande variedade de vitaminas e nutrientes, o aproveitamento para consumo *in natura* e industrial tem sido elevado. O processamento de bananas para obtenção de produtos elaborados tem sido direcionado para farinha de banana verde, farinha ou pó de banana verde e madura, cremes, flocos, passas, purês, néctares, geléias, bananadas, balas, vinagres, vinhos, bananas-passa, licores, sucos, bolos, tortas e banana ao rum. Da planta e dos restos dos cachos obtêm-se ainda fibra para fabricação de sacos para cereais, palmito em salmoura, torta da casca de banana, torta de engaço e torta de “coração”. Os restos da banana e dos cachos também têm sido usados na alimentação animal (Tanada, 1996). A Tabela 2.1 mostra as frações que compõem 100 g de banana e também revela o poder nutricional da mesma na dieta dos seres humanos representando assim um papel importante no ciclo alimentar.

2.2.2.2 Propriedade termo-físico-químico da banana

Propriedades de alimentos, do ponto de vista da Engenharia de Processos, podem ser definidas como qualidades e quantidades que são importantes para o projeto de equipamentos e processamento de alimentos. Incluem as propriedades reológicas, térmicas, de mudança de fase, elétricas, químicas, colorimétricas e ópticas. Um grande número de referências tem sido encontrado na literatura que fornece valores destas propriedades para um vasto número de produtos alimentares (frutas, cereais, carnes, peixe, açúcar etc.) e seus derivados.

As propriedades térmicas dos produtos biológicos são afetadas pelas variações de temperatura e teor de umidade, assim como pela sua composição e porosidade. Desde que no processo de secagem o teor de água e temperatura do material variam consideravelmente, pode-se esperar uma variação do valor da difusividade térmica dentro do produto. Além disso, muitos alimentos são heterogêneos e, portanto, esta mesma difusividade pode variar de um ponto para outro dentro do mesmo produto. Estudos nesse sentido têm sido conduzidos por Riedel, citado por Singh (1982), Kostaroupoulos e Saravacos (1995), Sweat (1995), Niesteruk (1996) e Rahman et al. (1997).

Tabela 2.1- Composição química dos principais componentes da banana fresca.
Fonte: USDA (2001).

Nutrientes Seleccionados	Unidade	Valor por 100 g
Água	g	74,910
Calorias	kcal	89
Proteínas	g	1,09
Lipídeos totais (gordura)	g	0,33
Carboidratos (por diferença)	g	22,84
Fibra total dietética	g	2,6
Cinzas	g	0,82
Minerais		
Cálcio (Ca)	mg	5
Ferro (Fe)	mg	0,26
Magnésio (Mg)	mg	27
Fósforo (P)	mg	22
Potássio (K)	mg	358
Sódio (Na)	mg	1
Zinco (Zn)	mg	0,15
Cobre (Cu)	mg	0,078
Manganês (Mn)	mg	0,27
Selênio (Se)	mcg	1
Vitaminas		
Vitamina C, ácido ascórbico total	mg	8.7
Vitamina A (Retinol)	UI	81
Vitamina E (Tocoferol)	mg	0,27
Tiamina	mg	0,031
Riboflavina	mg	0,073
Niacina	mg	0,665
Ácido pantatênico	mg	0,334
Vitamina B6	mg	0,367
Folato total		mcg
Vitamina B12	mcg	20
Vitamina A	UI	0
Vitamina A, RAE	mcg_RAE	64
		3
Lipídeos		
Ácidos graxos, total saturados	g	0,112
Ácidos graxos, total mono-insaturados	g	0,032
Ácidos graxos, total poli-insaturados	g	0,073
Colesterol	mg	0
Folato total	mcg	20

Krokida e Maroulis (1997) e Krokida et al. (1998a), estudando o efeito do método de secagem na densidade média, densidade da partícula úmida, volume específico e porosidade

da banana, maçã, batata e cenoura, apresentaram as seguintes equações para as duas primeiras propriedades:

$$\rho_p = \frac{1 + \bar{M}}{\left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{\bar{M}}{\rho_w} \right)} \quad (2.1)$$

$$\rho_b = \frac{1 + \bar{M}}{\left(\frac{1}{\rho_{b_{\bar{M}=0}}} + \frac{\bar{\beta}' \bar{M}}{\rho_w} \right)} \quad (2.2)$$

onde \bar{M} é o teor de umidade (base seca); ρ é a densidade e $\bar{\beta}'$ é o coeficiente de encolhimento. Os índices p, s, w, b e $b_{\bar{M}=0}$ referem-se à partícula úmida; a partícula seca; a água; ao leito úmido e ao leito seco, respectivamente. Segundo os autores, durante a secagem com uso de microondas, a banana encolheu 25%; na secagem a vácuo 70% e na secagem por congelamento 80 a 90%. Especificamente para banana, os autores reportam na Tabela 2.2 os valores destes parâmetros.

Tabela 2.2 - Métodos de secagem e valores das densidades da partícula seca, da água, do leito úmido e coeficiente de encolhimento para banana,

Tipo de secagem	ρ_s (kg/m ³)	ρ_w (kg/m ³)	$\rho_{b_{\bar{M}=0}}$ (kg/m ³)	$\bar{\beta}'$
Convencional	1970	1020	1810	1,04
A vácuo	1940	980	630	0,90
Por microondas	1870	1060	1790	1,05
Criogênica	1880	1040	260	0,43
Desidratação osmótica	1670	1060	1330	1,04

A difusividade de massa é uma das mais importantes propriedades de transporte, essencial para o projeto e otimização de processos de transferência de massa no interior de sólidos, tal como, secagem e desidratação osmótica. Esta propriedade tem uma particularidade muito importante, em relação às propriedades térmicas: até o presente momento não existe um equipamento que possa quantificá-la. Sendo assim, os pesquisadores utilizam-se dos métodos e modelos matemáticos (numérico ou analítico) para sua determinação, por comparação direta entre os valores numéricos ou analíticos e os experimentais, procurando minimizar o erro nesta diferença.

A Tabela 2.3 apresenta alguns valores da difusividade de umidade efetiva resultante da aplicação de alguns modelos e técnicas aos dados experimentais de secagem e desidratação

osmótica de banana, obtidas por diferentes pesquisadores. Em todos estes estudos, utilizou-se o modelo da difusão, segundo a geometria utilizada e as considerações feitas em cada caso.

Tabela 2.3 - Difusividade de umidade de banana para várias temperatura e geometrias.

Geometria (Consideração)	M ^{**} (b. s.)	T (° C)	D.10 ⁺¹⁰ (m ² /s)	Referência
Pedaços (Placa semi-infinita)	0,027	25	0,0251	Hong et al. (1986)
Inteiras descascadas (cilindro infinito)	3,77 a 0,06	50 à 70	2,62 a 6,53	Nogueira (1991) Nogueira e Park (1992)
----	3,50 a 0,01	20 à 40	0,003 a 2,10	Kechaou e Maalej (1994)
Fatias (Placas)	2,10 0,20	60	34,80 (fresca 15 °Brix) 8,80 (39 °Brix)	Sankat et al. (1996)
Inteiras descascadas (cilindro infinito)	3,43 a 0,22	29,9 a 68,4	1,25 a 29,7	Queiroz (1994) Queiroz e Nebra (1996)
Pedaços cilíndricos	2,64 a 1,85	25 à 45	8,50 a 24,30	Rastogi et al. (1997)
Cubos	3,54 a 0,11	60	8,33	Mowlah et al. (1982)
Fatias	3,00 a 0,15	60	2,80 a 163,40	Garcia et al. (1988)
Fatias (Placa)	----	50	27,7 (60 °Brix) 26,6 (70 °Brix)	Waliszewski et al. (1997)
Pedaços cilíndricos (placa)		85 95	11,3 13,7	Fernando et al. (2011)
Inteiras descascadas (cilindro infinito)	2,69	50	4,6	Dandamrongrak et al. (2002)
Pedaços cilíndricos (placa)	≈4,00	40 50 60	0,66 1,57 1,95	Karim et al. (2005)
Pedaços cilíndricos (placa infinita)	4,25 (média)	40 50 60 70	0,51 0,80 1,10 1,80	Demirel e Turhan (2003)
Pedaços cilíndricos (1 cm de espessura) (placa infinita)	3,21 (média)	40 50 60 70	2,10 3,20 5,10 7,80	Nguyen e Price (2007)
Pedaços cilíndricos (2 cm de espessura) (placa infinita)	3,21 (média)	50 60 70	10.80 15.90 22.70	Nguyen e Price (2007)
Inteiras descascadas (esferóide prolato)	3,17 3,21 2,96 2,95	39,9 49,9 60,2 68,4	6,25 13,27 25,87 34,28	Lima (1999) Lima et al. (2002)

**A faixa de valores refere-se aos teores de umidade inicial e final da fruta.

Os valores da difusividade de massa obtidos por meios numéricos ou analíticos dependem de muitos fatores tais como: tipo de modelo, considerações adotadas em cada um, geometria adotada, tipo de método numérico usado, e assim por diante. Desta forma, os seus valores, evidentemente variam de caso para caso, mesmo relacionando-se com um mesmo experimento. A mesma dificuldade existe com o coeficiente de transferência de calor, quando o mesmo é obtido com uma metodologia similar à utilizada na de transferência de massa.

O valor da difusividade de massa obtido por um modelo não deve ser usado em outro modelo, sob pena da margem de erro aumentar consideravelmente. De qualquer forma, a ordem de grandeza é a mesma em todos os casos, independentemente do modelo e considerações adotadas, a menos que a pesquisa não tenha sido conduzida corretamente, ou métodos não-convencionais tenham sido usados. Contudo isso não tem sido observado na prática.

2.2.2.3 Tecnologia de conservação

2.2.2.3.1 Perdas e preservação

As perdas da banana provêm daquelas frutas que não estão de acordo com o padrão de exportação devido à variação de tamanho ou manchas, ou ainda, resultantes do excesso de produção, que proporciona uma oferta do produto maior que a procura. Portanto, como o consumo é menor que a quantidade produzida, o excedente da fruta destina-se ao apodrecimento, culminando com a perda total da mesma. Pode-se minimizar esse problema, fazendo uso de um tratamento que conserve as características iniciais da fruta in natura, prolongando-se, assim, a sua vida útil e conseqüentemente, o tempo para o consumo.

A perda de banana tem sido estimada entre 25 a 50% da produção total colhida dos 125000 hectares plantados na América central e do Sul (Clavijo e Maner, citados por Hammond et al., 1996).

Do ponto de vista de consumo, frutas, e particularmente as bananas, são produtos de plantas com sabor aromático que são naturalmente doces ou normalmente adoçadas antes de comê-las. Fora o fato de elas fornecerem sabor e variedade à dieta humana, servem também

como importante e indispensável fonte de vitaminas e minerais, embora não sejam boa e econômica fontes de proteínas. Devido a isso, e aliado ao crescimento populacional, a produção e o consumo de frutas processadas estão aumentando a cada dia.

Devido ao seqüencial crescimento da cultura da bananeira e da quantidade de banana colhida, do aumento das perdas desta fruta, pelas razões já citadas neste texto, gera-se a necessidade de estudos cada vez mais efetivos de conservação da banana. Neste sentido, os pesquisadores, preocupados com os altos índices de banana perdida, principalmente na fase de pós-colheita, sugerem aos órgãos governamentais, técnicos e pesquisadores, para que, juntos definam uma estratégia de ação de um sistema de tratamento e melhoramento da fruta, que vá desde a pré-colheita até a comercialização.

Uma das técnicas de preservação de alimento mais antigas utilizadas pelo homem consiste na remoção de umidade dos alimentos através do processo de secagem. Durante o processo de secagem de produtos biológicos, as suas características físicas e químicas sofrem alterações; dependendo da temperatura, os produtos biológicos podem ser afetados em suas estruturas, assim como as sementes podem perder o poder germinativo, ou até mesmo ocorrer a perda total dos produtos. A remoção de umidade provoca a diminuição da atividade de água do produto, inibindo o desenvolvimento de microorganismo e retardando a deterioração de origem físico-química.

As frutas e vegetais caracterizam-se pelo seu alto teor inicial de umidade, sendo considerados produtos altamente perecíveis. Portanto, o processo de secagem implica em considerável redução de custo em manipulação do produto, além de proporcionar efetivo prolongamento na sua vida útil.

O Brasil ocupa um lugar de destaque na produção mundial de banana. No entanto, as perdas desse produto são estimadas em 40% do volume total da produção (AGRIANUAL, 2003). Apesar de ser colhida em quantidades e qualidades devido ao clima sazonalidade praticamente iguais ao longo do ano, a fruta deve ser consumida num período máximo de até 25 dias após a colheita.

Justifica-se a aplicação de método de conservação do excedente da produção para frutos extremamente perecíveis. A industrialização é, sem dúvida, uma excelente alternativa para o aproveitamento integral da banana. Dentre os processos de aproveitamento industrial da banana, a produção de banana-passa é a que requer baixo custo de investimento inicial e perspectiva de lucratividade, compatíveis com o investimento. O mercado interno está em expansão e o mercado externo continua praticamente inexplorado pelo Brasil. Obtém-se a banana-passa mediante a secagem natural ou artificial da fruta madura. Geralmente a banana usada na produção de banana-passa é a banana-nanica e a banana nanicão. A banana-passa é caracterizada por seu elevado teor de açúcares e com umidade entre 20 a 25% da umidade inicial da fruta.

A secagem de fruta ainda é considerada uma operação complexa e pouco compreendida, principalmente, no que se refere à seleção e controle das condições do processo para a manutenção da qualidade final do produto. A exigência dos consumidores tem aumentado e produtos que preservam ao máximo as suas características originais ganham a preferência do consumidor. Em nível industrial, isto significa o desenvolvimento de operações que minimizem os efeitos adversos do processo de secagem.

O baixo teor de acidez da banana pode exigir o emprego de agentes acidulantes no processamento. A diminuição do pH para 4,2 permite que o tratamento térmico para a conservação seja feita em temperatura mais branda, preservando as propriedades organolépticas do produto.

Geralmente, em uma operação inicial de preservação de uma fruta perecível tal qual a banana, é feito um tratamento osmótico e em seguida é feito o complemento da secagem da fruta por meio de uma estufa ou outro equipamento de secagem fazendo uso de transferência de calor e circulação de ar do ambiente onde se encontra a fruta que passa pela operação de secagem. A operação de secagem pode ser feita por diferentes técnicas de secagem usando uma gama de equipamentos de trabalho, que utilizam energia solar, energia elétrica e energia térmica.

Durante a secagem, a superfície do produto encolhe mais que seu núcleo, originando tensões internas que resulta em danos e ruptura das paredes no interior do produto. Aliados a isto, compostos não voláteis também migram com a água difundida e precipita na superfície

do produto formando uma crosta que mantém as dimensões do produto (Wang e Brennan, 1995). Assim, o encolhimento afeta os parâmetros de transferência de calor e massa e é relevante fator para ser levado em consideração em modelos de secagem.

De acordo com os experimentos e a literatura (Bialobrewski et al., 2008; Wang e Brennan, 1995), inicialmente o encolhimento ocorre na superfície, e então, gradativamente move-se para o centro da fruta com o aumento no tempo de secagem. Então, o encolhimento produz uma variação na distância necessária para o movimento das moléculas de água, que facilita a difusão de umidade através da superfície e, ao mesmo tempo, o tamanho do poro cheio com água encolhe devido a perda de água. Quando o poro diminui de volume, torna-se mais difícil para a umidade mover-se do núcleo para a superfície da fruta. Então, o coeficiente de difusão decresce com o encolhimento da estrutura e tecido da amostra.

2.2.2.3.2 Estado da arte sobre desidratação de banana

A banana seca ou banana-passa é obtida da secagem artificial da banana bem madura. Geralmente é obtida da banana nanica ou nanicão. É um produto industrializado em pequena escala, contudo dados numéricos do volume de comercialização nacional não foram encontrados na literatura.

Azoubel et al. (2010) reportaram um estudo tratando do efeito do ultra-som na cinética de secagem da banana pacovan, usado como um pré-tratamento que pode reduzir o conteúdo inicial da água ou para alterar a estrutura do tecido da fruta de uma maneira que a secagem com ar torne-se mais rápida. A desidratação osmótica é o pré-tratamento mais relatado usado antes da secagem ao ar. Contudo, entre as novas tecnologias emergentes, a desidratação ultra-sônica é muito promissora, pois o processo pode ser realizado a baixas temperatura, o que reduz a probabilidade de degradação dos alimentos e permite a remoção do conteúdo de umidade dos sólidos sem produzir uma mudança da fase líquida. Sua utilização na indústria de alimento está aumentando com o uso de novas técnicas, os autores chegaram à conclusão de que o efeito causado pelo ultra-som pode ser responsável pela criação de canais microscópicos tornando o material da fruta poroso, reduzindo a camada limite de difusão e aumentando a transferência convectiva de massa da fruta.

Prachayawarakorn et al. (2008) apresentam um trabalho sobre a preservação e conservação da banana feita usando um processo com elevada temperatura de secagem, pode ser dividido em três regimes. O primeiro período com aquecimento ascendente e os dois seguintes com abaixamento de temperatura. O processo inicial usa temperatura de 120°C e contribui na formação de grandes poros e baixa taxa de encolhimento, formando uma estrutura mais consistente e de rigidez significativamente mais elevada. Neste trabalho, foram produzidos *chips* de banana que consiste em produzir fatias secas de banana semelhantes à batata frita; ao final do processo o produto fica pronto para o consumo humano como lanche ou como um cereal integral no café da manhã.

Segundo Bains e Langrish (2008) a difusão tem sido frequentemente descrita como um dos mecanismos de transporte de umidade durante a secagem. O objetivo deste trabalho foi avaliar o tipo dominante de difusão na secagem de banana, pois, o tipo ou o mecanismo de secagem de alimento, particularmente o mecanismo de difusão, não tem sido claramente identificado na literatura. O tipo de difusão pode ser avaliado baseando-se no número de Knudsen, o qual requer a medição da distribuição e tamanho dos poros. Embora, nesse trabalho, a distribuição e tamanho dos poros fossem medidos na banana seca. O outro objetivo desse trabalho foi analisar o efeito da temperatura e o teor de umidade na difusividade durante a secagem de bananas. Os autores concluíram que a difusividade para secagem de frutas, incluindo bananas, tem sido geralmente assumida como sendo constante ou sendo uma função da temperatura, desprezando-se o efeito do teor de umidade.

Smitabhindu et al. (2008). Os autores desenvolveram um sistema otimizado que melhora a secagem de banana assistido por energia solar. A literatura apresenta vários trabalhos a respeito da otimização de convecção natural e convecção forçada dos sistemas de secagem solar. Portanto, poucos trabalhos neste sentido têm sido portadores para conduzir os pesquisadores, a simulação matemática e otimização dos sistemas de secagem alimentados por energia solar para frutas tropicais. A conclusão dos autores é formular um modelo matemático de um sistema de secagem de alimento por energia solar e que o uso deste modelo tenha como objetivo a otimização e a performance de um esquema de um sistema de secagem de banana.

Thuwapanichayanan et al. (2008). Os autores desenvolveram um trabalho sobre o processo de secagem de banana, visando melhorar as características de secagem e qualidade da banana, fazendo uso de uma camada de espuma no processo de secagem. A secagem com ar quente pode produzir produtos não nítidos e o seu teor de umidade não pode ser reduzido para o valor desejado, cerca de 0,04 kg/kg de pó para baixa temperatura de secagem. A combinação de espuma e ar quente de secagem no processo é, portanto, uma opção viável para produzir batata frita e “chips” de banana, pois as espumas de bananas são muito porosas, facilitando a perda de umidade da fruta, conseqüentemente, contribuindo para maior rapidez de sua secagem, atingindo o valor desejável de 0,04/kg de pó mesmo sendo utilizada baixa temperatura no processo de secagem.

Mariani et al. (2008) apresentam um trabalho onde os pesquisadores concluíram que a difusividade térmica na secagem de um produto diminui linearmente com o teor de umidade e que recentemente tem despertado interesse crescente na evidência e na análise e solução de problemas inversos de transferência de calor. A metodologia de otimização de novos trabalhos está sendo usada para resolver problemas inversos, abordagens praticamente estocástica, que normalmente fornece uma boa solução, ou até ótima a nível mundial, porém o tempo computacional exigido em geral é superior ao dos métodos determinísticos. Assim, o objetivo deste trabalho foi o estudo de calor e o aspecto de transferência de massa da banana durante o processo de secagem e o uso de temperatura transiente e campos de conteúdo de umidade para estimar a difusividade térmica aparente. O segundo objetivo foi explorar, analisar e validar um novo transiente metodológico de medição utilizando o método inverso para a determinação da difusividade térmica aparente no intervalo entre 20 e 70°C para a temperatura de secagem.

Yan et al. (2008) estudando a secagem de cubos de banana (5 mm de espessura e 23 de diâmetro), a 70°C e teor de umidade inicial de 76% (base úmida), reportam uma razão entre o volume inicial e final de 20% para um teor de umidade final de 24% (base úmida).

Nimmol et al. (2007) apresentam em seu trabalho uma alternativa significativa de secagem é portanto aquela que apresente elevada qualidade do produto seco com redução no consumo de energia. De acordo com os autores uma concepção de secagem com vapor superaquecido, pressão baixa e sem a presença de radiação infravermelha foi feita e aplicada

com êxito para muitos produtos alimentícios durante a década passada. Os resultados obtidos por vários pesquisadores, claramente mostram que o processo acima citado é o que fornece produtos secos com menor deterioração, comparando com os produtos secos fazendo uso do ar quente.

Sothornvit e Pitak (2007) desenvolveram um trabalho mostrando que a embalagem de alimento é um dos principais fatores que preocupa os produtores e as indústrias de processamento. O desenvolvimento de alternativas no sentido de produzir materiais de embalagem, comestíveis e/ou materiais biodegradáveis, parcialmente ou totalmente, que venha substituir os polímeros sintéticos, podem oferecer oportunidade de beneficiar tanto os fabricantes como os consumidores. Vários polímeros biodegradáveis naturais, como proteína e polissacarídeos na forma de películas (filmes) consumível podem potencialmente servir como materiais de revestimento ideal na embalagem de produtos. Apesar dos filmes comestíveis de polissacarídeos, lipídeos ou proteínas serem mais fracos que os polímeros sintéticos, eles fornecem biodegradação, podem ser aceitável para o consumo humano e aplicação farmacêutica. Neste sentido, a banana é uma fruta que apresenta grande produção, conseqüentemente, valor baixo para o produto. Na busca de agregar novos valores ao produto e melhorar a sua aceitação, uma alternativa é, usar o amido e a pectina da farinha de banana para produzir as películas para utilizar na embalagem de produtos secos (comestíveis). Os autores deste artigo chegaram às seguintes conclusões: os filmes de farinha de banana podem ser formados com flexibilidade, transparência e ligeira aparência amarelada. A resistência dos filmes de banana aumenta com o aumento da farinha de banana e o conteúdo de pectina, enquanto que a flexibilidade do filme aumentou com o aumento do teor de glicerol. Aumentar o conteúdo de farinha de banana contribui para o aumento da permeabilidade de oxigênio no filme.

Segundo Fernandes e Rodrigues (2007) o uso de ultra-som como um pré-tratamento na desidratação da banana tem sido muito importante na redução do tempo de secagem convencional com ar quente, pois é um processo oneroso em função do consumo de energia, portanto um pré-tratamento pode ser usado para reduzir o teor de umidade inicial. Ondas ultra-sônicas podem ser uma das alternativas no processo de preservação da fruta. O uso de ultra-som na indústria de alimento é novo, poucos trabalhos têm abordado a secagem de fruta com ultra-som, mas muitos têm utilizado esta técnica para auxiliar a desidratação osmótica. A

vantagem do uso de ultra-som é que o processo pode ser realizado a temperatura ambiente e não é necessário o aquecimento, reduzindo a probabilidade de degradação dos alimentos. Os autores concluíram que o uso de ultra-som é um interessante tratamento que complementa a metodologia clássica de secagem com o ar quente. O uso de ultra-som como um pré-tratamento aumenta a difusividade de água do fruto proporcionando um menor período de secagem com ar quente. A difusividade da água aumentou em 14,4% quando a fruta era exposta a 20 minutos de ultra-som.

Leite et al. (2007) reportaram que um trabalho que trata do efeito da temperatura de secagem na qualidade da banana-passa (variedade: banana prata e banana d'água), é fator importante associado ao tempo de secagem, pois este tempo deve ser suficiente para levar o produto a um nível final de umidade que seja ideal para a conservação e armazenamento do mesmo e também, inibir a ação microbiológica que ocorre em produtos com alto teor de umidade. Portanto, o tempo de secagem deve ser tal que atenda os requisitos citados acima e apresente um produto final sem comprometer a qualidade e estrutura da fruta. Assim o objetivo deste trabalho é verificar o efeito da temperatura de secagem na composição química, nas condições microbiológicas e a aceitação do produto. Quando a desidratação da fruta é feita com elevada temperatura, isso contribui para que ocorra uma redução nos carboidratos, lipídios e proteínas, mas os produtos desidratados com baixa temperatura apresentam uma performance de marca superior comparados com aqueles comercialmente simples, secados com alta temperatura.

Swasdisevi et al. (2007) reportam um encolhimento de fatias de banana (4 mm de espessura e teor de umidade inicial de 3 kg/kg em base seca) de aproximadamente 46%, secas com radiação infravermelho, na faixa de temperatura de 50 a 60°C.

Temperatura e tempo de secagem são importantes parâmetros para alterar a cor dos produtos agrícolas durante a secagem, principalmente frutas. Pela importância, diversos pesquisadores têm estudado os fenômenos de alteração de cor e textura em banana durante a secagem (Jiang et al., 2010; Pan et al., 2008; Swasdisevi et al., 2007; Nguyen e Price, 2007; Ramos et al., 2003; Maskan, 2000).

Segundo Karim e Hawlader (2005) a validação da modelagem teórica e experimental nas características de secagem de banana, depende de alguns fatores, tais como: energia térmica para a secagem do produto, umidade inicial e final da fruta, temperatura, umidade relativa do ar de secagem e da taxa do fluxo de ar. A desidratação de frutas e vegetais, incluindo banana, produzem grandes alterações no seu volume e na sua área de troca de calor e massa em função da variação da estrutura do espaço e do tempo. Este fenômeno de encolhimento afeta, em particular, o coeficiente de secagem do material, que é um dos principais parâmetros que regem um processo de secagem.

Segundo Talla et al. (2004) o aumento da densidade de frutas tropicais durante a secagem em função do encolhimento (aplicação em banana) é comprovado por grandes alterações em seu volume e na área de troca de calor e massa, dependendo também de variáveis especiais, como, o tempo e a estrutura da fruta. Os autores verificaram que, durante a operação, a diminuição da superfície sob a influência da contração dos tecidos era compensada parcialmente pela perda de água. Neste estudo, equações fundamentais da retração e da evolução da densidade da banana durante a secagem foram desenvolvidas com base na hipótese de variação do volume do produto correspondente ao volume de água evaporada.

Lima et al. (2002) desenvolveram um trabalho sobre o simultâneo transporte de umidade e encolhimento durante a secagem de sólido com configuração elipsoidal, com ênfase a banana. Segundo os autores, durante a desidratação de alimento, secagem de frutas e legumes, é produzido grandes alterações no seu volume e na área da superfície, simultaneamente com a perda de umidade. Portanto, é necessário dedicar mais atenção ao fenômeno de encolhimento, pois, este afeta a velocidade de secagem e o coeficiente de difusão. Neste trabalho, equações fundamentais para a difusão de líquido em corpos esferoidais prolatos, considerando o efeito do encolhimento, foram desenvolvida usando o método dos volumes finitos.

Boudhrioua et al. (2002). Este trabalho relata a preocupação de vários pesquisadores relacionando as mudanças que ocorrem na qualidade da banana durante a maturação e ao prolongamento de sua vida útil após a colheita, tornando-a mais rentável ao produtor. Segundo os autores, a secagem tem sido considerada como uma possibilidade de melhorar a

estabilidade do produto em função da redução do conteúdo de umidade ou atividade de água o que proporcionará novos valores ao produto. Apesar da importância, poucos autores tem se interessado na monitoração dos dados da cinética de secagem observando as mudanças que ocorrem na qualidade da banana durante o processo. Se houvesse melhor compreensão dos fenômenos de secagem, provavelmente, isso iria contribuir para o desenvolvimento de modelos dinâmicos que proporcionaria a mudança da banana, gerando uma gama de novos produtos.

Segundo Queiroz e Nebra (2001) a secagem de produtos agrícolas tais como, frutas e vegetais, apresentam um elevado teor de umidade inicial. Durante o processo de secagem, sempre se tem um considerável efeito de encolhimento. Este fenômeno deve ser incluído na modelagem de secagem, com o objetivo de melhorar a representação física do fenômeno. Ainda, referindo-se aos autores, durante a secagem, foi verificado uma redução de cerca de 43 a 47% entre o diâmetro inicial e o final das bananas.

Waliszewski et al. (1997) justificam em seu trabalho sobre a alteração do amido de banana por modificações químicas e físicas. Devido à alta concentração de amido (mais de 70% do peso seco), a banana pode ser transformada em farinha e fécula sendo uma perspectiva interessante como um recurso alimentício e um possível e importante propósito da indústria de processamento de produtos alimentícios. Amidos nativos representam muitas desvantagens, assim limitando a sua ampla aplicação no processamento industrial.

Schirmer et al. (1996) investigando a secagem de banana com energia solar, apresentam um secador solar tipo túnel. Segundo os autores, a temperatura do ar de secagem na saída do coletor solar variou de 40 a 65°C durante a secagem, dependendo das condições climáticas e da hora do dia, sendo que o processo demorou de 3 a 5 dias, em comparação aos 5 a 7 dias necessários para a secagem solar com ar natural. Aliado a esta vantagem, o produto apresentou alta qualidade em sabor, cor e textura.

Luccas (1996), estudando a secagem de bananas em leito fluidizado, desenvolveu um processo em que rodela do produto são submetidas a uma velocidade do ar de 10 m/s a altas temperaturas, 110 a 150°C, por 15 e 6 minutos respectivamente, seguido de secagem convencional por 5,5 horas a 70°C e 1,25 m/s de velocidade de ar. Segundo o autor, o produto

final apresentou alto índice de reidratação, cor atraente, baixa densidade real e crocância, após comparação com a secagem convencional. Em ambos os casos, as rodela de banana foram pré-tratadas por 2 minutos em suspensão de amido de mandioca gelatinizado na concentração 2%, à temperatura ambiente ($\approx 25^{\circ}\text{C}$).

Drouzas e Schubert (1996) investigaram experimentalmente a secagem a vácuo de fatias de banana, utilizando microondas como meio de aquecimento, e obtendo excelente qualidade do produto, examinada por testes de gosto, aroma, cheiro e reidratação.

Queiroz (1994), Queiroz e Nebra (1995, 1996 e 1997) comprovaram em um estudo teórico-experimental da secagem de bananas na faixa de temperatura de $29,9$ a $68,4^{\circ}\text{C}$, umidade relativa do ar de $35,7$ a $7,3\%$, considerando o produto como um cilindro infinito. Vários aspectos são considerados, tal como encolhimento e efeitos convectivos na superfície da fruta. Nestes estudos, são apresentados vários resultados numéricos da cinética de secagem e distribuição interna do teor de umidade do sólido, obtidos a partir da aplicação do modelo difusional. Segundo os autores, o modelo mostrou-se adequado para solucionar problemas de secagem de fruta, apresentando resultados satisfatórios quando comparado com a solução analítica e os dados experimentais. Para todos os casos estudados, o coeficiente de difusão e o coeficiente de transferência de massa foram obtidos por ajuste com os dados experimentais, contudo nenhuma abordagem sobre a qualidade do produto após a secagem foi dada.

De acordo com Travaglini et al. (1993) a banana é um sólido não-poroso, cuja umidade está ligada à estrutura e, durante o período de secagem, a taxa de secagem constante não é percebida.

Altemani (1976) diz em seu trabalho sobre um estudo experimental de coletores solares planos de convecção natural, que o sistema desenvolvido foi aplicado para secagem de frutas, particularmente bananas inteiras, em metades cortadas longitudinalmente e em rodela (1 cm de espessura). Testes experimentais foram realizados com temperaturas do ar na entrada da câmara variando de 30 a 67°C . Segundo o autor, a influência da geometria na taxa de secagem é nítida, sendo que as bananas cortadas apresentaram uma taxa de secagem sensivelmente maior do que às apresentadas para as bananas inteiras.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Material e métodos experimentais

3.1.1 Material

A matéria-prima investigada neste trabalho é a banana prata. Na Figura 3.1, é apresentada a amostra das bananas prata selecionadas para os experimentos.



Figura 3.1- Banana prata.

Para a determinação dos parâmetros de secagem os seguintes equipamentos foram utilizados:

- a) Paquímetro digital da marca Messen com precisão de 0,01 mm, (Figura 3.2);

- b) Balança digital KC-01 com divisão de 1 grama, (Figura 3.3);
- c) Termômetro de infravermelho com escala de -50 à 1000°C TI 890 (Figura 3.4);
- d) Termohigrômetro de fabricação da ICEL, mod. HT 208, (Figura 3.5);
- f) Estufa com circulação mecânica de fabricação da FANEM mod. 320E com controlador digital de temperatura,(Figura 3.6);
- g) Anemômetro de palhetas com leitura digital modelo AMI 300, Instrutemp com precisão de leitura de $\pm 2\%$ (Figura 3.7).



Figura 3.2- Paquímetro digital Messer, com certificado de calibração, 6 polegadas 0,01 e
Faixa de Medição: 0 – 150 mm.



Figura 3.3- Balança eletrônica digital com tara automática.



Figura 3.4 - Termômetro infravermelho digital tipo pistola. modelo TI – 890.



Figura 3.5 - Termohigrômetro digital.



Figura 3.6 - Estufa de secagem com renovação/circulação de ar.



Figura 3.7 – Anemômetro de palhetas com leitura digital.

3.1.2 - Procedimentos experimentais

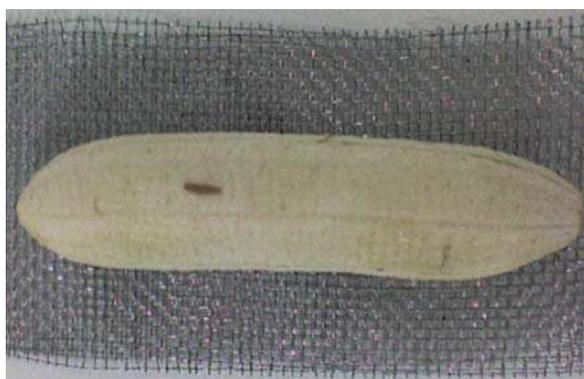
Todos os experimentos foram realizados no Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande PB, no período de abril a dezembro de 2010. No início, as bananas foram selecionadas com relação ao tamanho, a qualidade e grau de amadurecimento (casca amarela com pinta preta em quantidade mínima), descascadas e cortadas, algumas delas foram cortadas em rodelas e outras longitudinalmente ao meio, cada qual antes do início de cada experimento.

Em seguida foram medidas as dimensões, a massa, a temperatura da superfície de cada amostra, como também a temperatura e umidade relativa do ar ambiente. As amostras foram levadas ao interior da estufa onde foram secadas em temperaturas (40, 50, 60 e 70°C), controladas em intervalos pré-definidos (de 5 em 5, de 10 em 10, de 30 em 30 e de 60 em 60 minutos). No final de cada período, as amostras eram retiradas da estufa, com a finalidade de serem feitas as medições da temperatura, massa e dimensões das mesmas. Quando as massas das amostras atingisse o nível de umidade próximo da umidade de equilíbrio, encerrava-se as medições e em seguida, mantinham-se as amostras no interior da estufa nas mesmas condições de secagem por um período de 24 horas para obtenção da massa de equilíbrio. Na seqüência, mudava-se a temperatura no interior da estufa para 70°C e mantiveram-se as amostras no interior da mesma por mais um período de 24 horas para a obtenção da massa do

produto seco. Todo esse procedimento de secagem, era feito para as três geometrias (banana inteira, cortada em rodela e cortada longitudinalmente ao meio).

As amostras eram dispostas no interior da estufa da seguinte forma: uma amostra piloto colocada em uma pequena tela de arame fino e 6 amostras em uma tela grande de arame fino com lugares identificados para cada amostra. No final de cada período de secagem (5, 10, 30 e 60 minutos) eram feitas as medições de massa, temperatura e dimensões só na amostra piloto e no final de cada etapa de secagem eram feitas as medições da temperatura, massa e dimensões em todas as amostras (terminando a secagem mínima, após 24 horas e após 48 horas, fotografias das amostras foram feitas em tempos de processo prefixados).

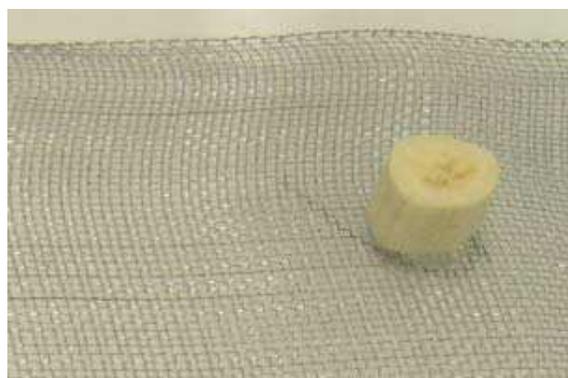
A Figura 3.8 ilustra a banana inteira e cortada longitudinalmente ao meio e em rodela. A Figura 3.9 ilustra esquematicamente as amostras utilizadas, bem como as posições onde foram obtidas as medidas do comprimento (C), da largura (L), diâmetro (D), e da temperatura na superfície da banana. A Figura 3.10 mostra a disposição das amostras no interior da estufa.



a)



b)



c)

Figura 3.8 – Amostras de banana utilizadas nos experimentos. a) banana inteira, b) banana cortada longitudinalmente e c) banana cortada em rodela.

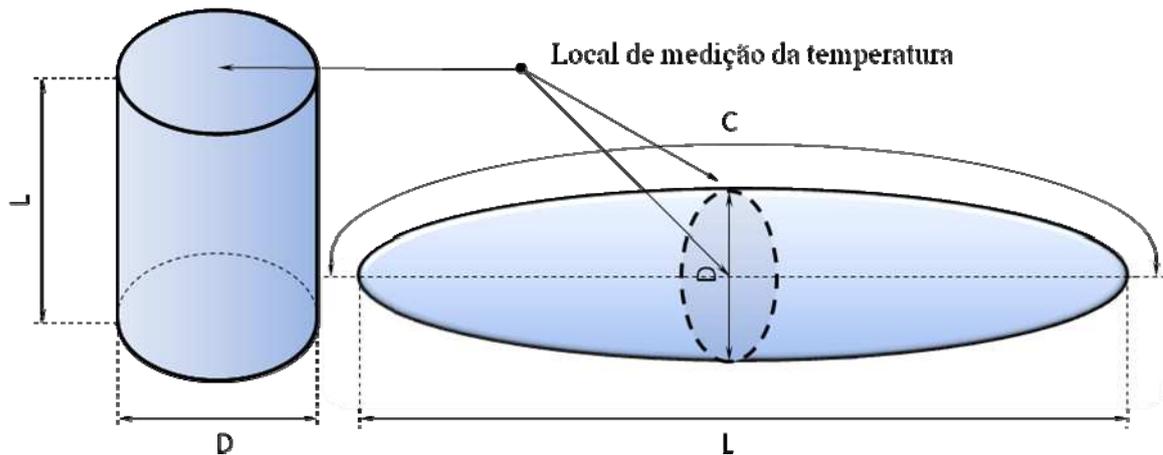


Figura 3.9 - Modelo das amostras de banana mostrando o comprimento (C), a largura/altura (L), diâmetro (D) e local da medição da temperatura da banana.



Figura 3.10 - Vista interna da estufa de secagem com renovação/circulação de ar.

3.2 Metodologia matemática

3.2.1 - Parâmetros auxiliares e dados de secagem

Após a secagem de todas as amostras, a partir das dimensões e massa das bananas, foram feitos alguns cálculos auxiliares para determinação de novos parâmetros, que são importantes para a obtenção dos resultados e discussão do presente trabalho.

- Massa de água

O cálculo da quantidade de água em cada banana (m_a) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa inicial da banana (m_0) e na massa da banana seca (m_s), da seguinte forma:

$$m_a = m_o - m_s \quad (3.1)$$

- Teor de umidade em base úmida

O cálculo do teor de umidade de cada amostra (M) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de água da banana (m_a) e na massa da banana úmida ($m=m_a+m_s$), da seguinte forma:

$$M = m_a / (m_a + m_s) \quad (3.2)$$

- Teor de umidade em base seca

O cálculo do teor de umidade de cada amostra (M) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de água da banana (m_a) e na massa da banana seca (m_s), da seguinte forma:

$$M = m_a / m_s \quad (3.3)$$

- Teor de umidade adimensional

O cálculo do teor de umidade adimensional de cada amostra (M^*) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor do teor de umidade (M), do teor de umidade inicial (M_o) e do teor de umidade de equilíbrio (M_e) em base seca, da seguinte forma:

$$M^* = (M - M_o) / (M_o - M_e) \quad (3.4)$$

- Temperatura adimensional

O cálculo da temperatura adimensional de cada amostra (θ^*) em cada tempo de medição, foi feito com base na temperatura da superfície da banana (θ), da temperatura inicial (θ_o) e da temperatura de equilíbrio (θ_e), da seguinte forma:

$$\theta^* = (\theta - \theta_e) / (\theta_0 - \theta_e) \quad (3.5)$$

- Volume e área superficial da banana

Os cálculos do volume (V) e da área superficial da banana (S) em cada tempo de medição, foi feito com base no valor das suas dimensões, comprimento (C), largura (L) e altura (D) usando as seguintes equações:

- a) Para a banana inteira considerada com um esferóide prolato (Figura 3.9)

$$(V)_t = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{L}{2}\right)_t \left(\frac{D}{2}\right)_t^2 \quad (3.6)$$

$$(S)_t = \frac{1}{2} \pi (D)_t (L)_t \left\{ \frac{(D)_t}{(L)_t} + \frac{\arcsen \left[\sqrt{1 - \left(\frac{(D)_t}{(L)_t}\right)^2} \right]}{\sqrt{1 - \left(\frac{(D)_t}{(L)_t}\right)^2}} \right\} \quad (3.7)$$

- b) Para a banana cortada longitudinalmente ao meio: o valor é determinado pelas equações 3,6 e 3,7 dividido por dois.

- c) Banana cortada em rodela considerada como um cilindro finito.

$$(V)_t = \pi (L)_t \left(\frac{D}{2}\right)_t^2 \quad (3.8)$$

$$(S)_t = 2\pi \left(\frac{D}{2}\right)_t (L)_t + 2\pi \left(\frac{D}{2}\right)_t^2 \quad (3.9)$$

onde V é volume e S é área.

As Tabelas 3.1 a 3.3 apresentam para cada experimento a denominação dos testes, e dados da banana e do ar de secagem utilizada na estufa.

Tabela 3.1 - Parâmetros experimentais do ar e da banana inteira para cada teste de secagem realizado

Teste	Ar			Banana inteira								t (min)
	T (°C)	UR (%)	V (m/s)	C (mm)	L (mm)	D (mm)	M _o (b.s.)	M _f (b.s.)	M _e (b.s.)	θ _o (°C)	θ _f (°C)	
1	40	29,58	0,04	110	112,76	29,65	2,0534	0,2911	0,1441	26,70	40,00	2670
2	50	17,32	0,05	110	97,6	26,72	2,3669	0,1713	0,0672	27,20	49,20	1770
3	60	10,15	0,06	136	122,39	31,42	2,3752	0,1615	0,0452	27,30	59,20	1475
4	70	6,93	0,07	115	105,36	27,83	2,5541	0,0574	0,0015	27,60	67,70	1450

Tabela 3.2 - Parâmetros experimentais do ar e da banana cortada longitudinalmente ao meio para cada teste de secagem realizado

Teste	Ar			Banana (longitudinal)								t (min)
	T (°C)	UR (%)	V (m/s)	C (mm)	L (mm)	D (mm)	M _o (b.s.)	M _f (b.s.)	M _e (b.s.)	θ _o (°C)	θ _f (°C)	
1	40	29,60	0,04	133	119,04	25,34	2,2366	0,2256	0,0749	25,6	40,0	1365
2	50	19,10	0,05	106	98,87	23,43	2,6548	0,0656	0,0324	28,1	50,0	1365
3	60	10,71	0,06	120	117,96	27,20	2,1595	0,0722	0,0195	27,5	58,9	1025
4	70	7,30	0,07	112	95,55	21,62	2,3587	0,0079	0,0080	26,7	68,6	630

Tabela 3.3 - Parâmetros experimentais do ar e da banana cortada em rodela para cada teste de secagem realizado

Teste	Ar			Banana (rodela)								t (min)
	T (°C)	UR (%)	V (m/s)	C (mm)	L (mm)	D (mm)	M _o (b.s.)	M _f (b.s.)	M _e (b.s.)	θ _o (°C)	θ _f (°C)	
1	40	29,48	0,04	----	15,18	30,22	2,1037	0,2603	0,1181	28,1	40,0	1275
2	50	21,22	0,05	----	20,95	24,24	2,2626	0,0976	0,0900	28,0	50,0	1325
3	60	9,79	0,06	----	21,21	28,07	2,2237	0,0881	0,0800	27,0	50,9	1095
4	70	8,09	0,07	----	18,64	26,99	2,3405	0,0179	0,0010	28,3	68,9	750

3.2.2 Tratamento estatístico dos dados

3.2.2.1 Modelo empírico de secagem

Com respeito aos dados do teor de umidade ao longo do processo de secagem, é conhecido que no período inicial os gradientes de umidade são mais elevados, requerendo do pesquisador a leitura destes dados em intervalos de tempo menores, podendo ser ampliado, à medida que o processo vai se desenvolvendo. Sob o aspecto físico, esta metodologia é extremamente satisfatória, em virtude de possibilitar a descrição do fenômeno com grande precisão. Contudo, sob o aspecto de tratamento estatístico dos dados não é satisfatório, tendo em vista que uma grande densidade de pontos ocorre nos tempos iniciais em comparação à que existe para tempos maiores. É estatisticamente mais adequado realizar o ajuste de parâmetros a partir de uma distribuição uniforme de pontos ao longo do processo. Desta forma, propõe-se um ajuste destes dados experimentais a uma equação exponencial com 3 termos e 6 parâmetros, a equação tem a forma:

$$M^* = A_1 \exp(-K_1 t) + A_2 \exp(-K_2 t) + A_3 \exp(-K_3 t) \quad (3.10)$$

onde A e K são parâmetros a serem definidos e t é dado em minutos. A estimação não-linear dos parâmetros da Equação 3.10 foi realizada utilizando o Software Statistica[®] e o método numérico de Hooke-Jeeves, para todos os testes, com critério de convergência de 0,0001. A escolha da forma desta equação foi baseada nos trabalhos de Lima (1995), Lima e Mata (1996), Lima et al. (1998) e Nascimento (2002) onde verificaram que equações exponenciais com maior número de termos se ajustam muito bem aos dados experimentais.

3.2.2.2 Modelo empírico de aquecimento

Semelhante procedimento foi adotado para a temperatura na superfície da banana. Neste caso, baseando-se nos trabalhos de Azzouz et al. (1996) e Pérez (1998), propõe-se uma equação parabólica a quatro parâmetros, para a temperatura na superfície da banana em função do tempo de secagem, a equação é a seguinte:

$$\theta^* = A_1 + A_2 \log_{10} \left(t^{K_1} + A_3 \right) \quad (3.11)$$

onde t é dado em minutos. Para os testes usou-se o método de estimação de Hooke-Jeeves. A opção de modificar a equação proposta por Azzous et al. (1996) e Pérez (1998), se deu em decorrência do melhor ajuste da Equação 3.11 aos dados experimentais, em comparação ao obtido com a equação proposta pelos autores referenciados, particularmente, para os tempos iniciais e finais de secagem.

3.2.2.3 Modelo empírico de variação volumétrica

Normalmente é assumido que o material se contrai linearmente com o teor de umidade. No caso de materiais biológicos, o encolhimento pode ser anisotrópico, modificando a estrutura. Baseando-se nos trabalhos de Keey (1992), Queiroz (1994), Queiroz e Nebra (1996) e Sokhansanj e Patil (1996), propôs-se a seguinte equação para a determinação do volume do corpo em qualquer instante:

$$(V)_t = V_o (\bar{\beta}_1 + \bar{\beta}_2 \bar{M}) \quad (3.12)$$

Onde V_o , $\bar{\beta}_1$ e $\bar{\beta}_2$ são o volume inicial da banana e parâmetros a serem estimados respectivamente.

Desde que, em $t = 0$, $\bar{M} = \bar{M}_o$ e $(V)_t = V_o$, tem-se por substituição direta na Equação 3.12, que:

$$\bar{\beta}_1 = (1 - \bar{\beta}_2 \bar{M}_o) \quad (3.13)$$

Então a Equação 3.12, pode ser reescrita na forma:

$$\frac{(V)_t}{V_o} = 1 - \bar{\beta}_2 (\bar{M}_o - \bar{M}) \quad (3.14)$$

ou ainda na forma adimensional, usando os parâmetros adimensionais já definidos:

$$\frac{(V)_t}{V_o} = 1 - \bar{\beta}(\bar{M}_o^* - \bar{M}^*) \quad (3.15)$$

Com $\bar{\beta} = \bar{\beta}_2(\bar{M}_o - \bar{M}_e)$.

Assim, conhecendo-se o valor do parâmetro $\bar{\beta}$, determina-se o novo volume do corpo em qualquer instante do processo. $\bar{\beta}$ deve ser positivo e finito, sendo seu intervalo de valores:

$$0 \leq \bar{\beta} < 1 \quad (3.16)$$

O significado físico do coeficiente de encolhimento $\bar{\beta}$ está associado com a variação máxima de volume sofrida por um sólido durante o fenômeno de difusão. Assim, por exemplo, se seu valor for 0,30, significa que o volume do corpo ao final do processo, quando este atinge seu teor de umidade de equilíbrio, será exatamente 70% do seu valor inicial, ou ainda, se $\bar{\beta}$ for igual a zero significa que nenhum encolhimento ocorreu durante o processo (Lima, 1999).

Para a determinação de $\bar{\beta}$ pode ser adotado o critério de que a variação de volume sofrida pelo corpo é igual ao volume da água evaporada até esse instante. Em adição, se o teor de umidade é dado em base seca e sabendo-se que a variação de volume sofrida pelo corpo é igual a massa de água evaporada dividida pela densidade da água, pode ser mostrado que:

$$\bar{\beta}_2 = \frac{\left(\frac{m_s}{V_o}\right)}{\rho_w} \quad (3.17)$$

ou ainda:

$$\bar{\beta}_2 = \frac{\rho_{so}}{\rho_w} \quad (3.18)$$

onde $\rho_{so} = m_s/V_o$, pode ser considerada como uma densidade aparente da fase sólida no início do processo.

3.2.2.4 Métodos estatísticos

A determinação dos parâmetros das funções previamente definidas para os ajustes será feita através do método dos mínimos quadrados (regressão não-linear), enquanto que a análise dos resultados obtidos será feita através de um conjunto de testes estatísticos disponíveis para esta finalidade.

3.2.2.4.1 Regressão não-linear: o processo iterativo

Praticamente todo o estudo visando generalizar o método dos mínimos quadrados para a sua aplicação em regressão não-linear está descrito em Silva e Silva (1998). O estudo parte de uma função qualquer em que “ t_1, t_2, \dots, t_m ” são as suas “ m ” variáveis independentes, sendo que tal função é não-linear nos “ n ” parâmetros “ a_1, a_2, \dots, a_n ” de ajuste:

$$y = f(t_1, t_2, \dots, t_m, a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (3.19)$$

Seja um conjunto de “ N ” pontos que se adequem a essa função, em que o i -ésimo dentre estes pontos é dado da seguinte forma: $(t_{1i}, t_{2i}, \dots, t_{mi}, y_i \pm \sigma_{ymi})$. Nesta expressão σ_{ymi} é a incerteza de y_i , que é o valor médio de y referente ao i -ésimo ponto, sendo que as variáveis independentes, a priori, são consideradas isentas de erros.

Com referência ao ajuste, pode-se tentar contornar o problema da não-linearidade expressando, inicialmente, qual é a modificação Δf da função, causada pelas modificações $\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_n$ dos parâmetros de ajuste:

$$\Delta f = \left(\frac{\partial f}{\partial a_1} \right) \Delta a_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial a_2} \right) \Delta a_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial a_n} \right) \Delta a_n \quad (3.20)$$

Neste estudo deve-se interpretar Δf como uma função corretiva associada a “ f ”, na qual as derivadas parciais são calculadas fazendo-se o valor de cada parâmetro a_k , desconhecido, igual a um valor inicial a_{k0} . É importante perceber que a expressão obtida para Δf é aproximada porque, a rigor, na expansão de “ f ”, os termos a partir da segunda ordem foram

desprezados. Supondo que $a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0}$ sejam os valores iniciais dos parâmetros, isto é, antes das modificações $\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_n$, os valores Δf_i da função corretiva correspondentes aos $t_{1i}, t_{2i}, \dots, t_{mi}$ devem ser calculados assim:

$$\Delta f(t_{1i}, t_{2i}, \dots, t_{mi}) = f(t_{1i}, t_{2i}, \dots, t_{mi}, a_1, a_2, \dots, a_n) - f(t_{1i}, t_{2i}, \dots, t_{mi}, a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0}). \quad (3.21)$$

Na Equação (3.21), $f(t_{1i}, t_{2i}, \dots, t_{mi}, a_1, a_2, \dots, a_n)$ são os valores y_i dos dados numéricos, enquanto que $f(t_{1i}, t_{2i}, \dots, t_{mi}, a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0})$ são os valores aproximados da função a ser ajustada, obtidos através da substituição das estimativas a_{k0} dos parâmetros na função. Como, para um dado conjunto de parâmetros a_{k0} , as diferenças Δf só dependem dos valores de “ $t_{1i}, t_{2i}, \dots, t_{mi}$ ”, elas foram denotadas simplesmente por $\Delta f(t_{1i}, t_{2i}, \dots, t_{mi})$. Por outro lado, se forem feitas as considerações

$$z = \Delta f(t_1, t_2, \dots, t_m) \quad \text{e} \quad x_k = \left. \frac{\partial f}{\partial a_k} \right|_{a_k = a_{k0}} \quad (3.22)$$

A Equação (3.20), que relaciona Δf e Δa_k , poderá ser reescrita do seguinte modo:

$$z = (\Delta a_1)x_1 + (\Delta a_2)x_2 + \dots + (\Delta a_n)x_n \quad (3.23)$$

É fácil perceber que “ z ” é uma função linear de várias variáveis independentes (x_1, x_2, \dots, x_n), e pode-se determinar os coeficientes Δa_k utilizando o método dos mínimos quadrados, minimizando o qui-quadrado χ^2 relativo à essa função z :

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial \Delta a_j} = 0 \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n, \quad (3.24)$$

em que

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N [z_i - z(x_{1i}, \dots, x_{ni}, \Delta a_1, \dots, \Delta a_n)]^2 \cdot \frac{1}{\sigma_{ymi}^2}, \quad (3.25)$$

onde $\sigma_{ymi} = \sigma_{zmi}$ são as incertezas das ordenadas dos pontos. A igualdade é justificada porque as variáveis independentes da função a ser ajustada foram consideradas isentas de erros. Ao minimizar o qui-quadrado da função corretiva obtém-se um sistema de equações para o cálculo dos Δa_k que pode ser escrito da seguinte forma:

$$[M] \cdot [\Delta A] = [C] \quad (3.26)$$

onde

$$[M] = \begin{bmatrix} \sum \frac{X_{1i}^2}{\sigma_{ymi}^2} & \sum \frac{X_{1i}X_{2i}}{\sigma_{ymi}^2} & \dots & \sum \frac{X_{1i}X_{ni}}{\sigma_{ymi}^2} \\ \sum \frac{X_{1i}X_{2i}}{\sigma_{ymi}^2} & \sum \frac{X_{2i}^2}{\sigma_{ymi}^2} & \dots & \sum \frac{X_{2i}X_{ni}}{\sigma_{ymi}^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum \frac{X_{1i}X_{ni}}{\sigma_{ymi}^2} & \sum \frac{X_{2i}X_{ni}}{\sigma_{ymi}^2} & \dots & \sum \frac{X_{ni}^2}{\sigma_{ymi}^2} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \vdots \\ \Delta a_n \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

e ainda

$$[C] = \begin{bmatrix} \sum \frac{Z_i X_{1i}}{\sigma_{ymi}^2} \\ \sum \frac{Z_i X_{2i}}{\sigma_{ymi}^2} \\ \vdots \\ \sum \frac{Z_i X_{ni}}{\sigma_{ymi}^2} \end{bmatrix} \cdot \quad (3.29)$$

Ao se determinar os Δa_k , pode-se recalculer os a_k ($a_k = a_{k0} + \Delta a_k$) e repetir o processo até que um critério de convergência seja atingido. Em geral, esse critério de convergência consiste em $|\Delta a_k| < \text{tol}$, ou ainda, $\chi^2 < \text{tol}$, sendo “tol” uma tolerância estipulada pelo usuário da metodologia estatística apresentada.

3.2.2.4.2 Testes estatísticos aplicados aos ajustes

Para um dado conjunto de pontos, em que o i -ésimo é $(x_i; y_i)$, tendo-se determinado os parâmetros de uma função $y(x) = f(x, a_1, a_2, \dots, a_n)$, a adequação de $(x_i; y(x_i))$ a tal conjunto de pontos será avaliada pelos testes a seguir indicados.

a) Função de perda

Um dos parâmetros estatísticos que indicam o quanto uma função ajustada se adequa aos pontos experimentais é o qui-quadrado. Tal parâmetro foi usado neste trabalho como função objetivo, na determinação de parâmetros ótimos de funções via regressão não-linear. Assim, este parâmetro, devidamente adaptado ao tipo de dados experimentais obtidos neste trabalho, será usado, também, como um dos indicadores estatísticos.

No presente trabalho, o peso estatístico de cada ponto experimental, genericamente dado por $1/\sigma_{ymi}^2$, não foi medido. Nestes casos, é comum, na literatura, atribuir-se a todos os pontos experimentais o mesmo peso estatístico. Portanto, o valor do peso já não é mais importante para o ajuste, já que todos os pontos têm o mesmo peso, qualquer que seja. É usual, na literatura, atribuir-se a tais pesos comuns um valor arbitrário igual à unidade: $1/\sigma_{ymi}^2 = 1$. Neste caso, o parâmetro χ^2 passa a ser escrito da seguinte forma:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N [z_i - z(x_{1i}, \dots, x_{ni}, \Delta a_1, \dots, \Delta a_n)]^2 \quad (3.30)$$

Em alguns pacotes estatísticos, como o Statistica^R, o parâmetro definido pela Equação (3.30) é chamado de Função Perda, simbolizado da seguinte forma: $(\text{obs} - \text{pred})^2$.

b) Coeficiente de determinação

Um segundo parâmetro estatístico usado para a análise dos ajustes é o coeficiente de correlação (ou alternativamente o coeficiente de determinação), que indica o quanto dois conjuntos de dados, com “N” valores cada, representados respectivamente por y_i e $y(x_i)$, estão

correlacionados entre si. Neste caso, o primeiro conjunto de dados representa os valores y_i dos pontos experimentais, enquanto que o segundo representa os valores $y(x_i)$ obtidos pela função ajustada, equivalentes aos valores experimentais y_i . Por outro lado, como se sabe, o coeficiente de determinação R^2 é o quadrado do coeficiente de correlação, R . Então, pode-se calcular o valor do coeficiente de determinação a partir do coeficiente de correlação, que é definido como a razão entre a covariância entre y_i e $y(x_i)$ e o produto dos desvios padrão destas duas séries. Isto resulta, desconsiderando os pesos estatísticos, na expressão (Silva e Silva, 1998)

$$R_{y,y(x)} = \frac{\sum y_i \cdot y(x_i) - N \bar{y} \bar{y}(x)}{\sqrt{\left(\sum y_i^2 - N \bar{y}^2\right) \left(\sum y(x_i)^2 - N \bar{y}(x)^2\right)}} \quad (3.31)$$

em que \bar{y} e $\bar{y}(x)$ são os valores médios das séries y_i e $y(x_i)$, respectivamente, N é o número de elementos de cada série, sendo que os somatórios são realizados de 1 até N . Uma vez calculado o coeficiente de correlação R pode-se obter, também, o coeficiente de determinação R^2 . Este parâmetro varia entre zero e 1, e tal parâmetro indica a proporção da variância que é explicada pela regressão.

No caso, de um ajuste perfeito, em que a função ajustada reproduz exatamente todos os pontos experimentais, o valor de R^2 é igual a 1. No pior caso, isto é, na ausência completa de correlação, este parâmetro é igual a zero.

3.2.2.5 Modelo de difusão

Neste trabalho, serão usados modelos de difusão para descrever a secagem de bananas inteiras, em rodela e cortadas longitudinalmente. Estes modelos são uni e bidimensionais, com condição de contorno do terceiro tipo. A banana inteira será considerada como um cilindro infinito, a banana cortada longitudinalmente ao meio será considerada como uma placa plana e a banana cortada em rodela será considerada como um cilindro finito. Neste sentido, serão apresentadas, a seguir, as expressões analíticas que descrevem o teor de umidade em função da posição e do tempo, e também o teor de umidade médio em função do tempo, para os modelos citados.

3.2.2.5.1 A Equação de difusão

A equação de difusão foi usada para descrever o processo de secagem de bananas, e tal equação pode ser escrita como (Luikov, 1968; Crank, 1992; Lima, 1999; Bird et al., 2001; Maliska, 2004):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (3.32)$$

onde M é o teor de umidade em base seca, t é o tempo, e D é a difusividade efetiva da água.

3.2.2.5.2 Soluções analíticas da equação de difusão

Para resolver a Equação (3.32) devem ser definidas as condições iniciais e de contorno. Para resolvê-la analiticamente, devem-se estabelecer algumas hipóteses:

- O mecanismo de transporte de água no interior do sólido é somente difusão líquida;
- A distribuição de umidade inicial deve ser uniforme;
- As dimensões do sólido não variam durante a difusão de água;
- O coeficiente de transferência convectiva de massa é constante durante a difusão de água;
- A difusividade efetiva da água não varia durante a difusão;
- O sólido é considerado homogêneo e isotrópico.

Soluções analíticas, considerando as hipóteses apresentadas, podem ser obtidas para diversas geometrias através de separação de variáveis. As soluções para uma parede infinita, um cilindro infinito e um cilindro finito, com condição de contorno do terceiro tipo, serão apresentadas a seguir.

a) Parede infinita

Seja a parede infinita de espessura L_1 , com a origem do eixo x no centro geométrico da parede, como é mostrado na Figura 3.11.

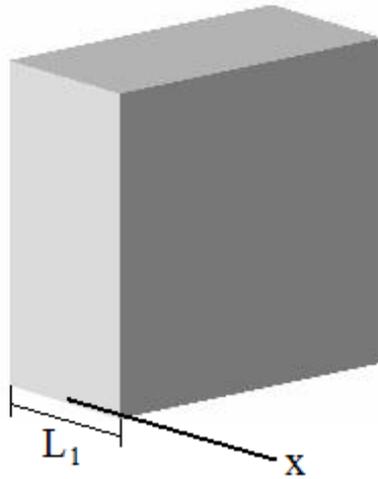


Figura 3.11 – Parede infinita de espessura L_1 .

Com base na Figura 3.11, a Equação (3.32) pode ser reescrita em coordenadas cartesianas da seguinte forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (3.33)$$

Para um problema de difusão unidimensional, envolvendo uma parede infinita de espessura L_1 , a condição de contorno do terceiro tipo é expressa da seguinte forma:

$$-D \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=\pm L_1/2} = h \left(M(x, t) \Big|_{x=\pm L_1/2} - M_e \right) \quad (3.34)$$

onde D , M , M_e , x e h são respectivamente o coeficiente de difusão, teor de umidade, teor de umidade de equilíbrio, coordenada espacial e o coeficiente de transferência convectiva de massa. Para esta condição de contorno, a solução da Equação (3.33) é dada por (Luikov, 1968; Crank, 1992):

$$M(x, t) = M_e + (M_0 - M_e) \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos \left(\mu_m \frac{x}{L_1/2} \right) \exp \left(-\mu_m^2 \frac{D}{(L_1/2)^2} t \right) \quad (3.35)$$

onde as expressões para A_m e μ_m são dadas por:

$$A_m = \frac{4 \sin \mu_m}{2 \mu_m + \sin (2\mu_m)} \quad (3.36)$$

e

$$\cot \mu_m = \frac{\mu_m}{Bi} \quad (3.37)$$

em que Bi é o número de Biot dado por:

$$Bi_1 = \frac{hL_1/2}{D} \quad (3.38)$$

Então, para um determinado número de Biot, se as raízes μ_m forem conhecidas, os coeficientes A_m são completamente definidos. A Equação (3.37) é chamada equação característica e pode ser numericamente resolvida para qualquer número de Biot. Silva et al. (2010) observam que, para baixos números de Biot ($Bi < 5$), apenas 5 termos da série produzem erros de truncamentos desprezíveis. Já para elevados números de Biot, por exemplo, $Bi = 200$, mesmo a consideração de 16 termos da série resulta em um erro de truncamento de 1,7% em $t = 0$ (que é o instante com erro de truncamento máximo). Neste trabalho, um programa auxiliar foi escrito em Fortran, e as primeiras 16 raízes da Equação (3.37) foram calculadas para vários valores especificados de números de Biot, com tais valores variando de $Bi = 0$ (o que corresponde a uma resistência infinita ao fluxo de água na superfície) até $Bi = 200$ (que corresponde, praticamente, a uma condição de contorno de equilíbrio).

O valor médio do teor de umidade num instante t é dado através da seguinte expressão geral:

$$\bar{M}(t) = \frac{1}{V} \int M(\vec{r}, t) dV \quad (3.39)$$

Dessa forma, substituindo a Equação (3.35) na Equação (3.39), pode-se escrever a expressão do teor de umidade médio em um tempo t para a parede infinita:

$$\bar{M}(t) = M_e - (M_e - M_0) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left[-\frac{\mu_n^2}{(L_1/2)^2} Dt\right] \quad (3.40)$$

onde B_n são os coeficientes da solução analítica para o teor de umidade médio, e é dado por:

$$B_n = \frac{2Bi^2}{\mu_n^2 (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)} \quad (3.41)$$

Então, para um determinado número de Biot, com os valores de μ_n calculados pela Equação (3.37), os coeficientes B_n são completamente definidos. Assim, a Equação (3.40) pode ser usada para calcular o teor de umidade médio em um dado instante t .

b) Cilindro infinito

A segunda solução analítica a ser apresentada neste trabalho para a Equação (3.32) é referente ao cilindro infinito, conforme é mostrado na Figura 3.12.

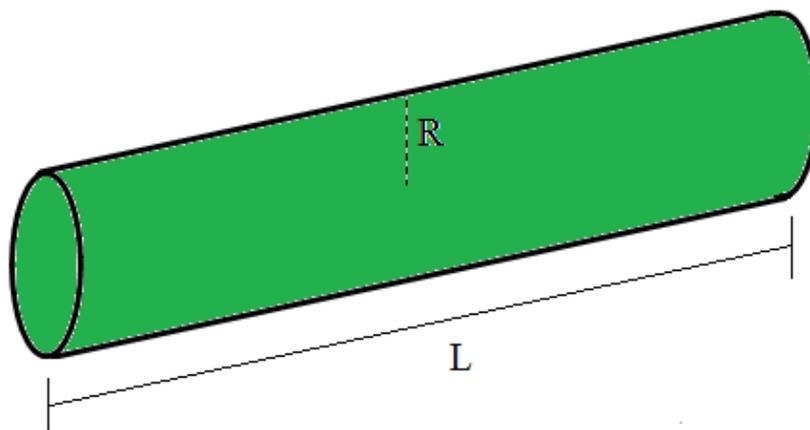


Figura 3.12 – Cilindro infinito: raio R muito menor que o comprimento L .

Supondo $R \ll L$, a Equação (3.32) pode ser reescrita em coordenadas cilíndricas da seguinte forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (3.42)$$

A condição de contorno suposta para o cilindro infinito é convectiva, também chamada de condição do contorno do terceiro tipo ou ainda de condição de contorno de Cauchy. Esta condição é expressa através da imposição de igualdade entre o fluxo interno (difusivo) no contorno do cilindro infinito e o fluxo externo (convectivo) nas vizinhanças deste contorno:

$$-D \frac{\partial M(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=R} = h \left[M(r,t) \Big|_{r=R} - M_e \right] \quad (3.43)$$

Para um cilindro homogêneo, de raio R , com umidade inicial uniformemente distribuída M_0 , com teor de umidade de equilíbrio M_e , a solução $M(r,t)$ da Equação (3.42), para a condição de contorno definida pela Eq. (3.43), é obtida por separação de variáveis (Luikov, 1968; Crank, 1992; Silva, 2010) e resulta em:

$$M(r,t) = M_e - (M_e - M_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(\mu_n r/R) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} t\right) \quad (3.44)$$

em que

$$A_n = \frac{2Bi}{J_0(\mu_n)[\mu_n^2 + Bi^2]} \quad (3.45)$$

Substituindo a Equação (3.44) na Equação (3.39), a expressão para o teor de umidade médio é obtida para o cilindro infinito:

$$\bar{M}(t) = M_e - (M_e - M_0) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} t\right) \quad (3.46)$$

onde $\bar{M}(t)$ é o teor de umidade médio no instante t ; M_e é o teor de umidade de equilíbrio ($t \rightarrow \infty$); M_0 é o teor de umidade inicial ($t = 0$); R é o raio do cilindro; D é a difusividade efetiva e t é o tempo de secagem. O coeficiente B_n é dado por

$$B_n = \frac{4Bi^2}{\mu_n^2(Bi^2 + \mu_n^2)} \quad (3.47)$$

em que Bi é o número de Biot para a transferência de massa, e é definido da seguinte forma:

$$Bi = \frac{hR}{D} \quad (3.48)$$

onde h é o coeficiente de transferência convectiva de massa. As raízes μ_n são calculadas a partir da equação característica para o cilindro infinito, que é dada por

$$\frac{J_0(\mu_n)}{J_1(\mu_n)} = \frac{\mu_n}{Bi} \quad (3.49)$$

A Equação (3.49) é uma equação transcendental e pode ser expressa na forma

$$J_0(\mu_n)Bi - \mu_n J_1(\mu_n) = 0 \quad (3.50)$$

onde J_0 e J_1 são as funções de Bessel do primeiro tipo e ordens zero e um, respectivamente. Então, tal equação pode ser resolvida numericamente para qualquer número de Biot de interesse. No presente trabalho, as primeiras 16 raízes da Equação (3.50) foram determinadas para vários números de Biot distintos, cobrindo a região de 0 (correspondendo a uma resistência infinita ao fluxo interno de água na superfície) até 200 (que em termos práticos corresponde à uma condição de contorno de equilíbrio na superfície).

c) Cilindro finito

Para as hipóteses já estabelecidas anteriormente, a equação de difusão tem, também, solução analítica para o cilindro finito de raio R e comprimento L conforme é mostrado na Figura 3.13.

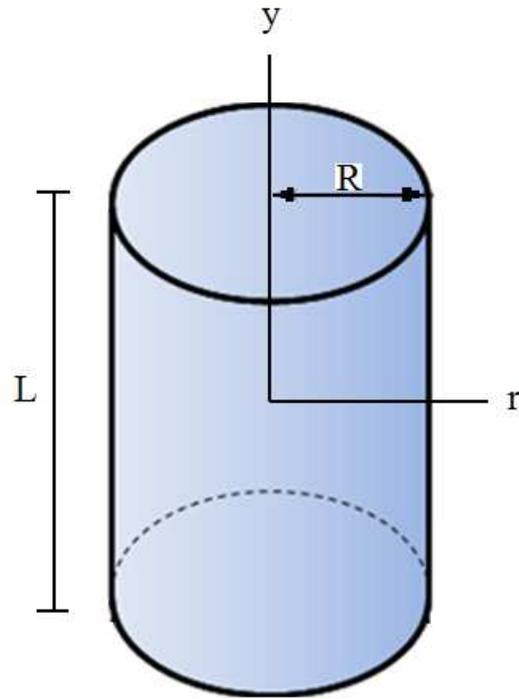


Figura 3.13 – Cilindro finito de raio R e comprimento L.

Com base na Figura 3.13, a Equação (3.32) pode ser reescrita em coordenadas cilíndricas do seguinte modo:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial M}{\partial y} \right) \quad (3.51)$$

Mais uma vez, a condição de contorno do terceiro tipo deve ser expressa através da imposição de igualdade entre o fluxo interno (difusivo) na superfície do cilindro finito e o fluxo externo (convectivo) nas vizinhanças desta superfície:

$$-D \frac{\partial M(r,y,t)}{\partial r} \Big|_{r=R} = h \left[M(r,y,t) \Big|_{r=R} - M_e \right] \quad (3.52)$$

e

$$-D \frac{\partial M(r,y,t)}{\partial y} \Big|_{y=\pm L/2} = h \left[M(r,y,t) \Big|_{y=\pm L/2} - M_e \right] \quad (3.53)$$

Vale salientar que um cilindro finito pode ser obtido pela interseção dos dois sólidos estudados anteriormente: o cilindro infinito e a parede infinita. Dessa forma, pode-se escrever, para uma posição (r,y) no interior do cilindro finito, a seguinte expressão:

$$M(r,y,t) = M_e - (M_e - M_0) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_n A_m J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \cos\left(\mu_m \frac{y}{L/2}\right) \times \exp\left[-\left(\frac{\mu_n^2}{R^2} + \frac{\mu_m^2}{(L/2)^2}\right)Dt\right] \quad (3.54)$$

em que os coeficientes A_m e A_n já foram definidos através das Equações (3.36) e (3.45), respectivamente.

Assim, substituindo a Equação (3.54) na Equação (3.39) o valor médio do teor de umidade relativo ao cilindro finito é obtido:

$$\bar{M}(t) = M_e - (M_e - M_0) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_n B_m \exp\left[-\left(\frac{\mu_n^2}{R^2} + \frac{\mu_m^2}{(L/2)^2}\right)Dt\right] \quad (3.55)$$

em que os coeficientes B_m e B_n são dados, respectivamente, pelas Equações (3.41) e (3.47).

3.2.2.6 Otimização: determinação de parâmetros

Para um conjunto de dados experimentais, as soluções analíticas apresentadas neste trabalho podem ser usadas para determinar os parâmetros de processo, se essas soluções forem acopladas a um otimizador. Neste caso, os parâmetros podem ser determinados, por exemplo, pelo método inverso. Para tal, uma função objetivo é definida e, aqui, o indicador estatístico qui-quadrado será utilizado para este fim (Olek e Weres, 2007).

3.2.2.6.1 Otimizador para soluções com condições de contorno do primeiro tipo

Para a condição de contorno do primeiro tipo, o teor de umidade médio em um instante t depende apenas da difusividade efetiva da água D . Então, para um determinado conjunto de

dados experimentais, o qui-quadrado é definido na Equação (3.25) pode ser reescrito para o teor de umidade da seguinte forma:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} [\overline{M}_i^{\text{exp}} - \overline{M}_i^{\text{ana}}(D)]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (3.56)$$

onde $\overline{M}_i^{\text{exp}}$ é o teor de umidade médio do i -ésimo ponto experimental; $\overline{M}_i^{\text{ana}}(D)$ é o teor de umidade médio no mesmo ponto, calculado através da solução analítica para o valor médio do teor de umidade; σ_i é o desvio padrão do teor de umidade médio experimental no ponto i , D é a difusividade efetiva da água, e N_p é o número de pontos experimentais. Um valor ótimo para D pode ser determinado para cada conjunto de dados experimentais através da minimização da Equação (3.56). Se σ_i não foi obtido experimentalmente e, portanto, é desconhecido, deve-se atribuir $\sigma_i = 1$ a todos os pontos experimentais (Olek e Weres, 2007; Silva et al., (2009 a).; Silva et al. (2009 b), propuseram um algoritmo para determinar D , que é constituído basicamente pelos seguintes passos:

- Um valor inicial próximo a zero (1×10^{-20}) é atribuído a D , e substituído na solução analítica para o valor médio do teor de umidade, para um certo número de termos nt . Assim, $\overline{M}_i^{\text{ana}}(D)$ pode ser calculado em um determinado tempo, através da solução analítica e, conseqüentemente, χ^2 pode ser determinado para um conjunto de dados experimentais através da Equação (3.56). Então, o valor de D é dobrado, e um novo χ^2 é calculado. O novo χ^2 é comparado com o valor antigo. Se o novo valor for inferior ao anterior, D é novamente dobrado, o valor correspondente de χ^2 é calculado, e comparado com o anterior. Este procedimento é repetido até que o último χ^2 calculado seja superior ao valor anterior. Desse modo, o antepenúltimo e o último valores de D , denominados respectivamente por D_a e D_b , definem uma região que contém o valor mínimo de χ^2 . O penúltimo valor da difusividade efetiva da água corresponde ao menor valor de χ^2 obtido nesse intervalo.

- O último procedimento pode ser usado para refinar os valores de D entre D_a e D_b , subdividindo esse intervalo em “ n ” valores de D uniformemente distribuídos. Em seguida, um

intervalo mais refinado pode ser obtido, e este procedimento pode ser repetido até que um critério de convergência seja satisfeito.

O algoritmo descrito anteriormente não necessita de um valor estipulado pelo usuário, nem da definição de um intervalo de pesquisa para a determinação de um valor ótimo para a difusividade. Isto é uma característica muito confortável do processo de otimização, pois o usuário do algoritmo só necessita informar o conjunto de dados experimentais, uma vez que as suposições de valores que definem o intervalo que contém o valor ótimo não são necessárias.

3.2.2.6.2 Otimizador para soluções com condição de contorno do terceiro tipo

Com o objetivo de utilizar o otimizador descrito anteriormente para a condição de contorno convectiva, a Eq. (3.56) deve ser devidamente adaptada. Neste caso, a função objetivo para a minimização torna-se:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} [\overline{M}_i^{\text{exp}} - \overline{M}_i^{\text{ana}}(D, Bi)]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (3.57)$$

A função objetivo dada pela Equação (3.57) depende da difusividade efetiva da água, e também do número de Biot de transferência de massa ou, equivalentemente, do coeficiente de transferência convectiva de massa h . No entanto, para um determinado número de Biot, a Equação (3.57) é apenas uma função da difusividade efetiva da água. Portanto, o otimizador desenvolvido por Silva et al. (2009)b pode ser aplicado para a minimização da Equação (3.57), determinando um valor ótimo da difusividade efetiva da água para um número de Biot especificado. Admitindo que a difusividade efetiva da água D e que o coeficiente de transferência convectiva de massa h são independentes um do outro, o processo de minimização pode ser repetido para todos os números de Biot para os quais raízes das equações características são conhecidas, que cobrem o domínio de 0 a 200. Depois de uma varredura de todos os números de Biot com raízes conhecidas, o menor qui-quadrado entre todos mínimos é determinado. Uma vez que, todo o domínio dos números de Biot de transferência de massa é varrido, novamente não é necessário indicar os valores iniciais ou

intervalos de busca para a determinação dos valores ótimos para B_i e D e, conseqüentemente, para h .

Uma vez determinados os valores de h e de D por otimização, para as geometrias estudadas, as expressões analíticas para o teor de umidade em uma dada posição podem ser usadas e, assim, a distribuição do teor de umidade em um dado instante de tempo pode ser determinada. Esta é uma grande vantagem de um modelo de difusão com relação a um modelo empírico, pois o conhecimento da distribuição do teor de umidade possibilita determinar as tensões hídricas no interior do produto. Como se sabe, tais tensões, dependendo de sua magnitude, podem danificar o produto.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta pesquisa, a análise do processo de secagem envolve a verificação dos parâmetros básicos de secagem, como temperatura e umidade relativa do ar de secagem e forma e dimensões geométricas da banana. Examinar-se-á como estes parâmetros resultam em diferentes potenciais de secagem e como afetam o tempo de secagem e a qualidade da fruta.

Para elucidar o comportamento do produto em função do tempo, vários resultados foram analisados. Dois grupos de resultados concernentes às cinéticas de secagem, aquecimento e variações dimensionais do produto são de interesse: o primeiro referente aos dados obtidos experimentalmente e o segundo referente aos dados empíricos obtidos a partir dos modelos de secagem, aquecimento e encolhimento propostos.

4.1 Experimental

As Figuras 4.1 a 4.3 mostram o comportamento da banana sendo seca nas temperaturas a 40, 50, 60 e 70°C, apresentando o teor de umidade adimensional em função do tempo. Verifica-se que o teor de umidade médio decresce lentamente com o tempo, para o caso de secagem a baixa temperatura. Pode-se observar nos gráficos, que o nível de temperatura exerce grande influência na secagem do produto. Portanto, a secagem com temperatura constante a 70°C, leva o produto a perder umidade bem mais rápido que a 40°C, tendendo a um teor de umidade de equilíbrio em um tempo bem menor. Isto ocorre independente da

forma geométrica da banana. Observe que, devido aos resultados do teor de umidade estar plotado na forma adimensional, estes são independentes do teor de umidade inicial e de equilíbrio da banana em cada condição experimental.

As Figuras 4.4 a 4.7 mostram que a banana apresenta uma perda de umidade acentuada em função da temperatura e também da forma geométrica, verifica-se que quando a banana é cortada na forma de rodela, o produto atinge o teor de umidade médio de equilíbrio em um tempo bem menor do que quando usada na sua forma natural.

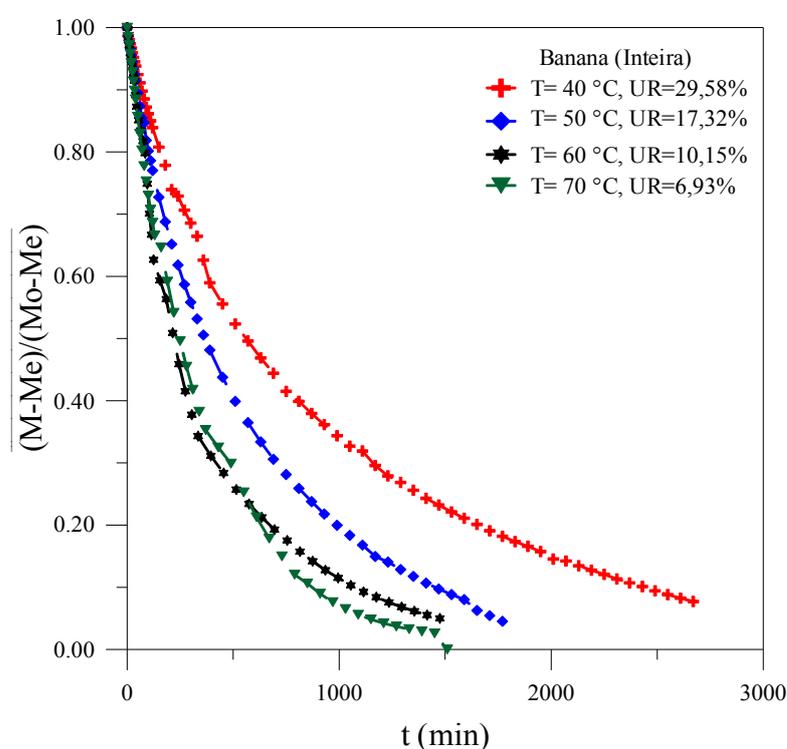


Figura 4.1- Variação do teor de umidade médio adimensional da banana inteira durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

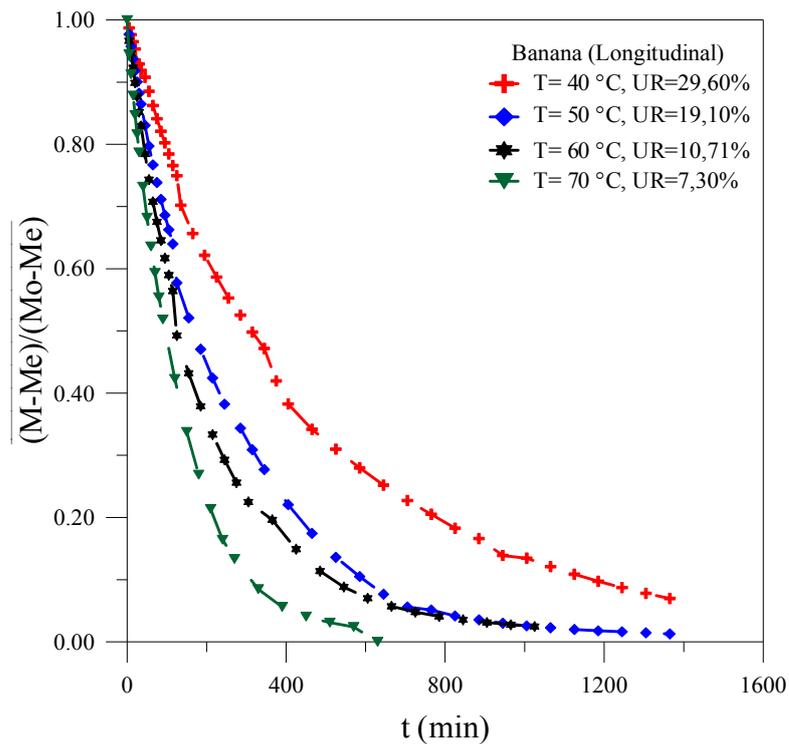


Figura 4.2- Variação do teor de umidade médio adimensional da banana cortada longitudinal durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

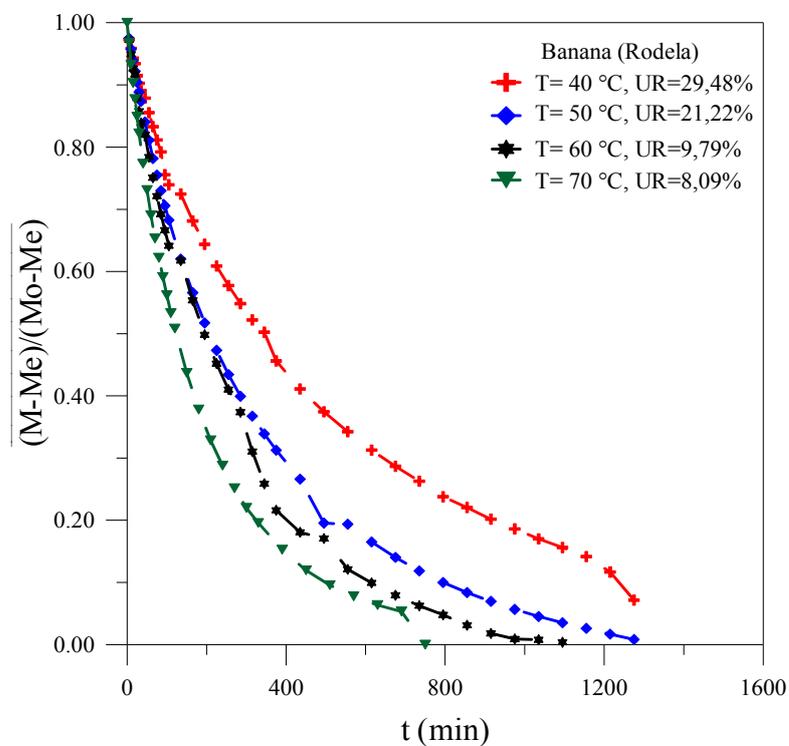


Figura 4.3- Variação do teor de umidade médio adimensional da banana cortada em rodela durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

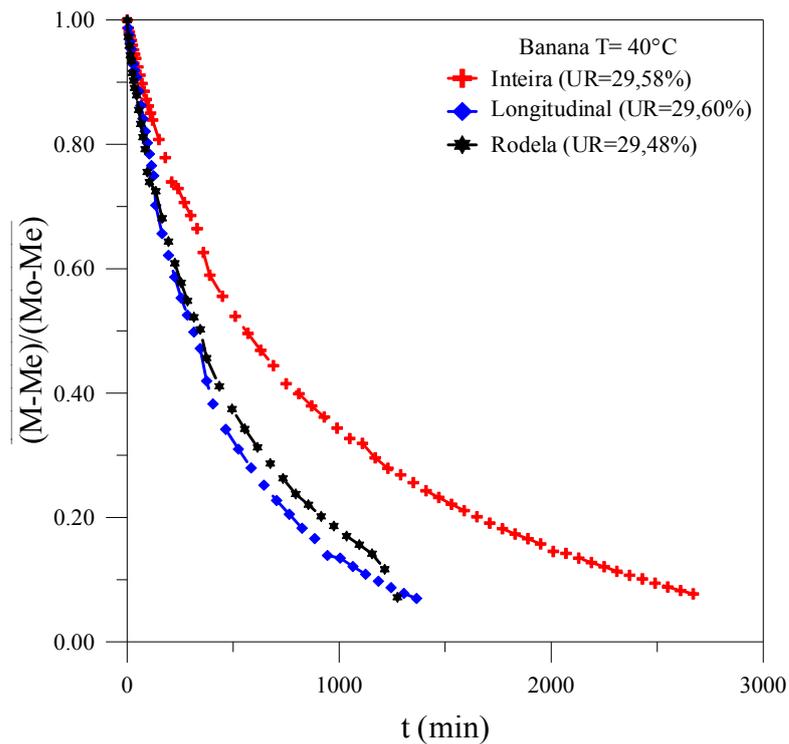


Figura 4.4- Variação do teor de umidade médio adimensional da banana durante a secagem a 40°C.

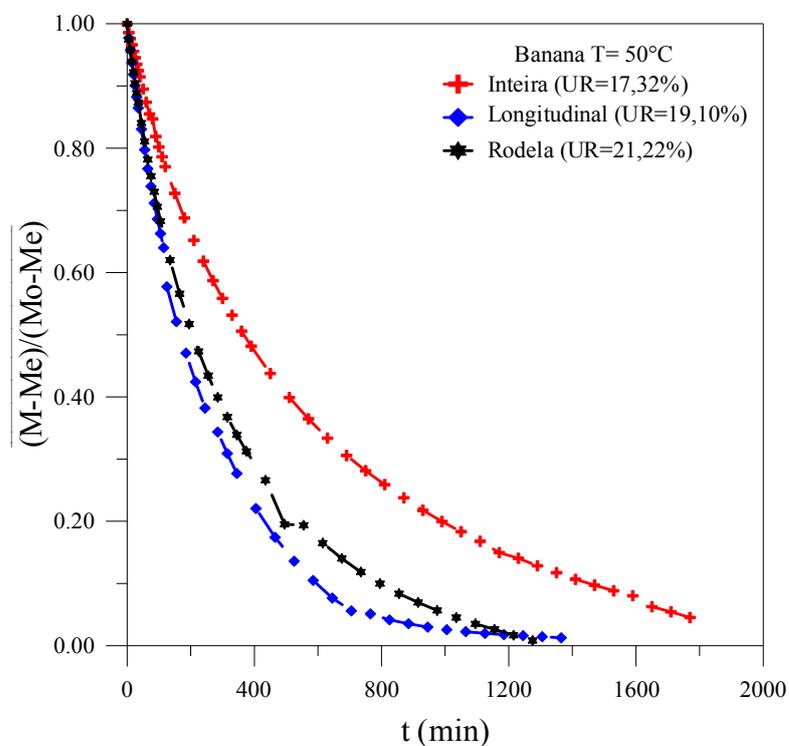


Figura 4.5- Variação do teor de umidade médio adimensional da banana durante a secagem a 50°C.

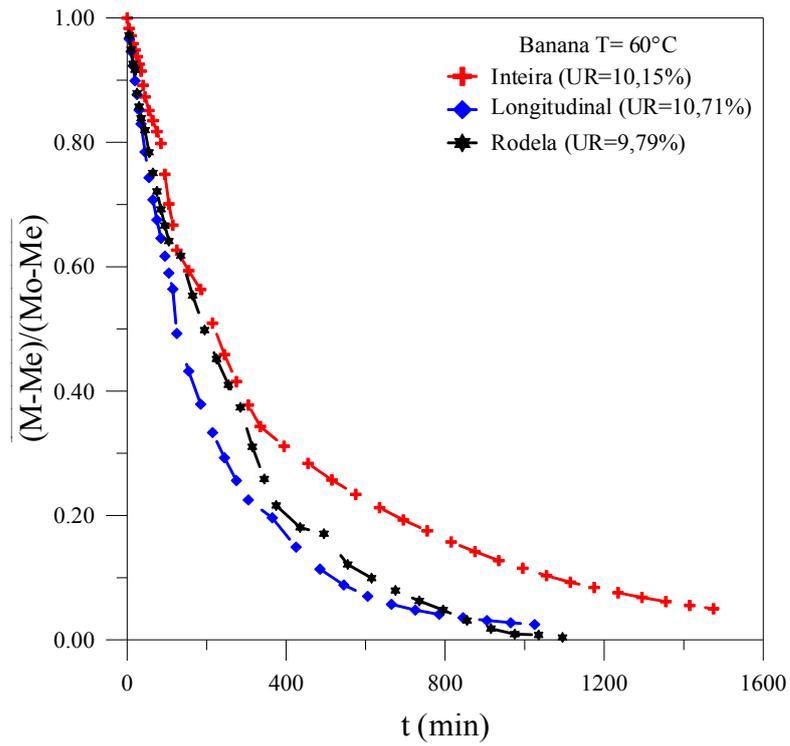


Figura 4.6- Variação do teor de umidade médio adimensional da banana durante a secagem a 60°C.

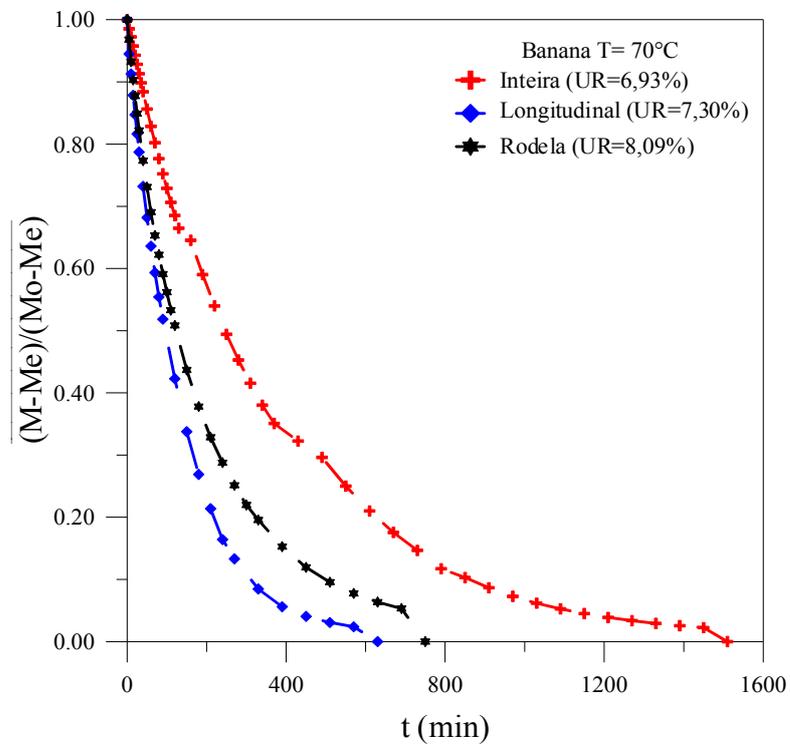


Figura 4.7- Variação do teor de umidade médio adimensional da banana durante a secagem a 70°C.

As Figuras 4.8 a 4.10 ilustram as variações dimensionais sofrida pela banana ao longo do tempo, para as temperaturas constantes de secagem utilizadas na estufa de 40, 50, 60 e 70°C. Observa-se que, o volume varia lentamente com o tempo para as temperaturas de 40 e 50°C, enquanto que, para as temperaturas de 60 e 70°C ocorre uma variação de volume bem mais acentuada.

As Figuras 4.11 a 4.14 mostram os valores da variação do volume com o tempo. Observa-se que a variação de volume em função do tempo ocorre de maneira mais acentuada para as temperaturas de 60 e 70°C e quando a banana é cortada na forma de rodela, essa geometria favorece a uma maior perda de umidade do produto.

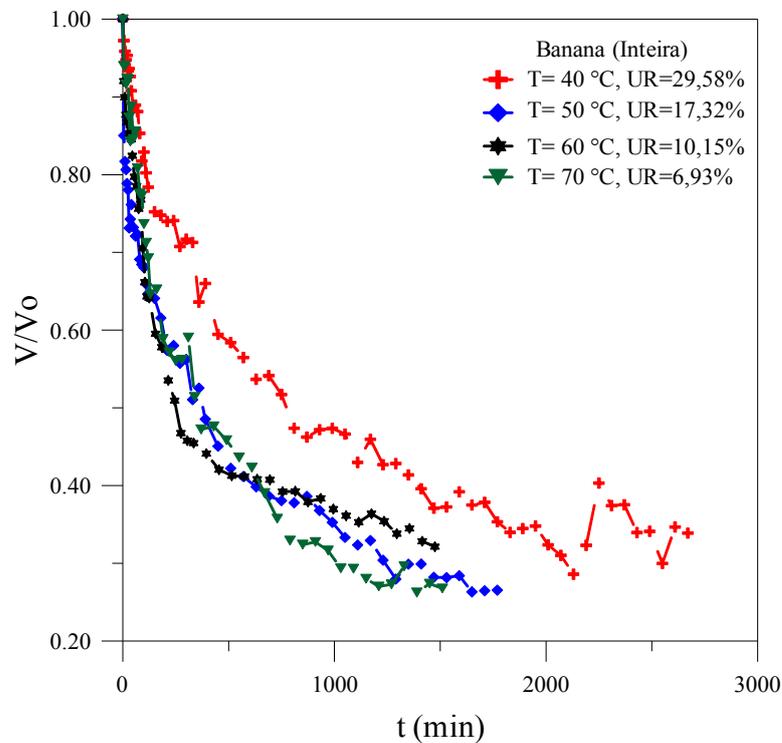


Figura 4.8- Razão entre o volume medido e inicial da banana inteira em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

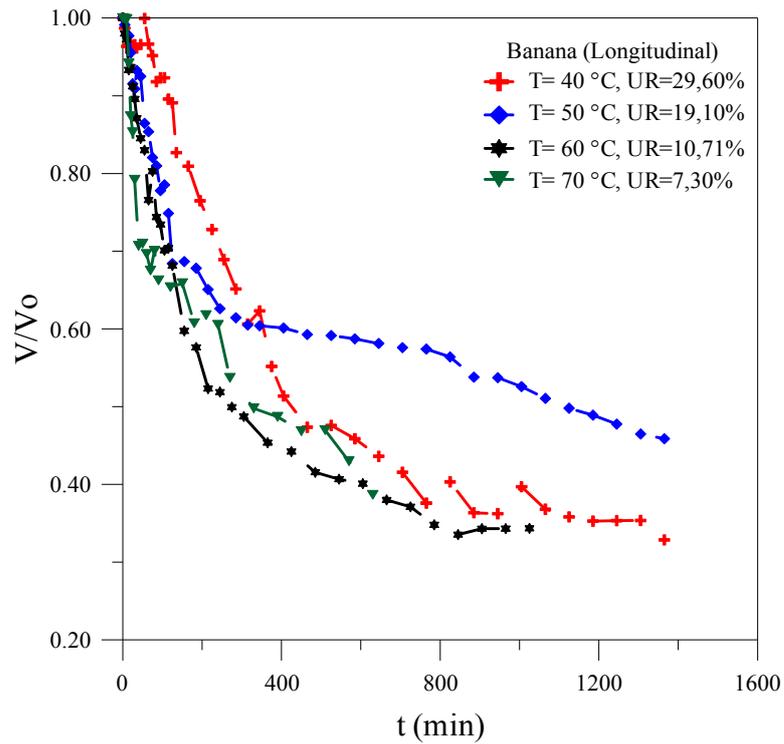


Figura 4.9- Razão entre o volume medido e inicial da banana cortada longitudinal em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

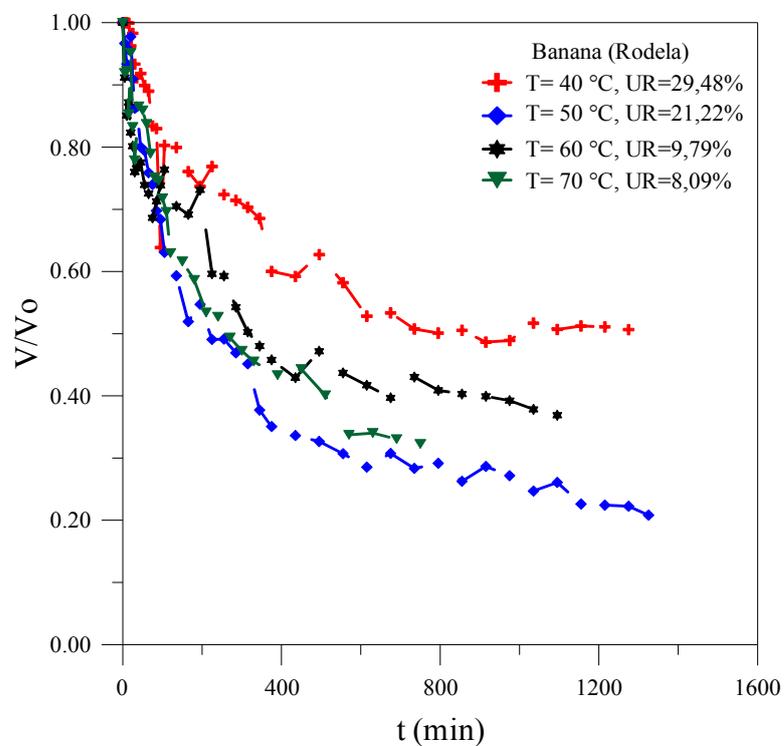


Figura 4.10- Razão entre o volume medido e inicial da banana cortada em rodela em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

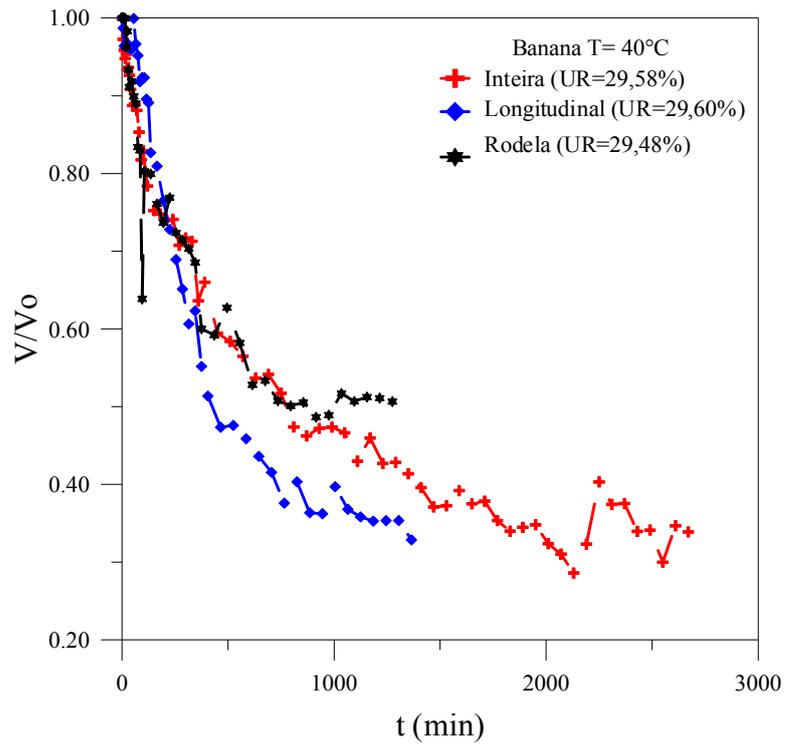


Figura 4.11- Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do tempo durante a secagem a 40°C.

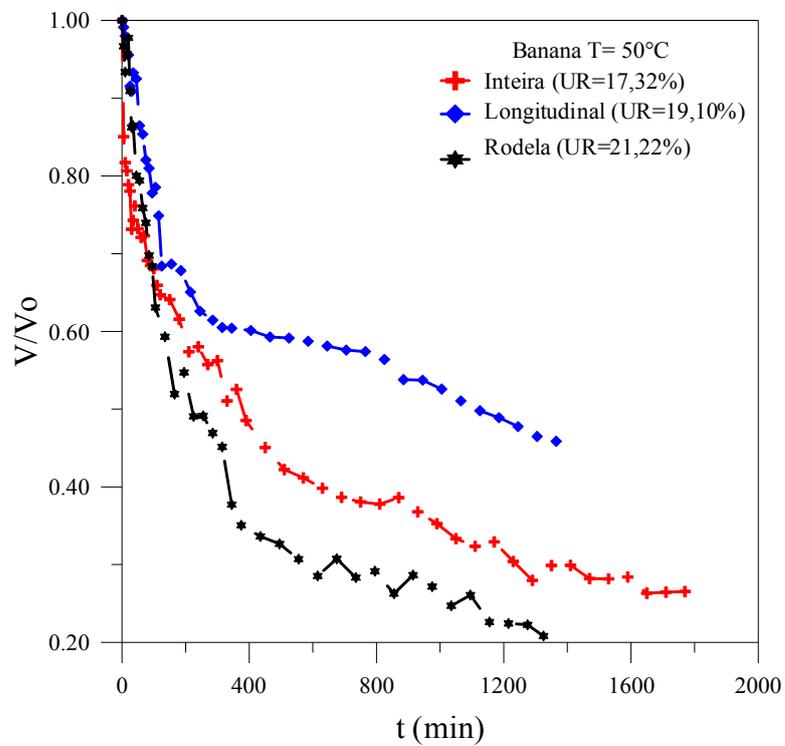


Figura 4.12- Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do tempo durante a secagem a 50°C.

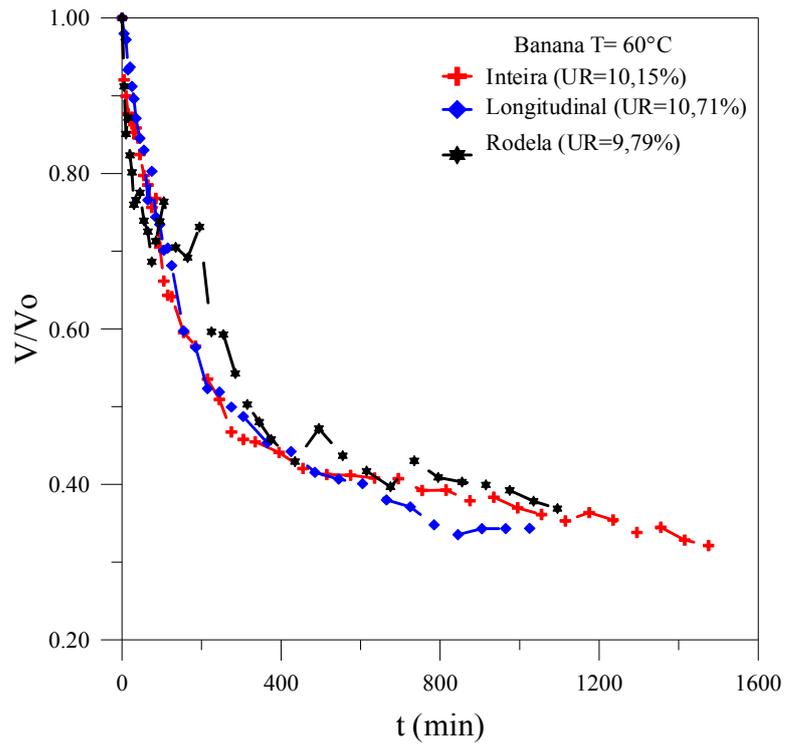


Figura 4.13- Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do tempo durante a secagem a 60°C.

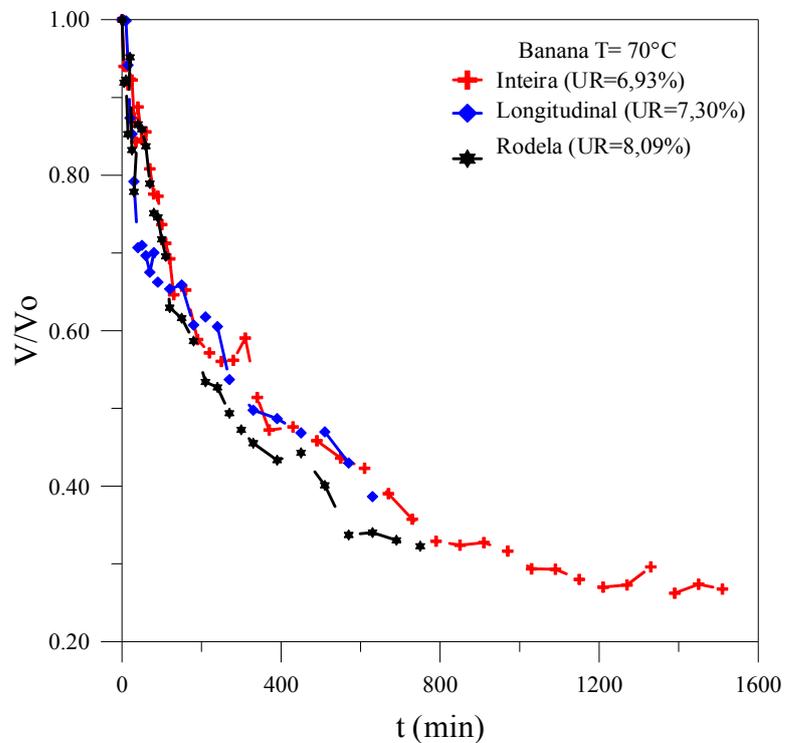


Figura 4.14- Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do tempo durante a secagem a 70°C.

As Figuras de 4.15 a 4.17 ilustram as variações dimensionais sofrida pela banana, nas diversas formas geométricas, em função do teor de umidade médio, o que caracteriza uma redução de volume, para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C. Nota-se, que para todas as temperaturas de secagem, no início do processo há uma grande remoção de umidade, principalmente para a banana cortada na forma de rodela. Assim, as dimensões da fruta mudam desde uma velocidade de encolhimento alta até tender a zero. Porém, comparando os gráficos, observa-se, que para as temperaturas de secagem, de 40 e 50°C, a variação do volume da banana ocorre de forma mais uniforme, devido ao fato da retirada de água ser mais lenta, promovendo a secagem e aquecimento mais demorado. Já para temperaturas elevadas como, por exemplo, 60 e 70°C, logo no início do processo há uma grande perda de água da banana, causando assim, redução brusca no seu volume. Observa-se ainda uma tendência linear do volume com o teor de umidade, indicando que a redução de volume da banana se iguala a quantidade de água removida.

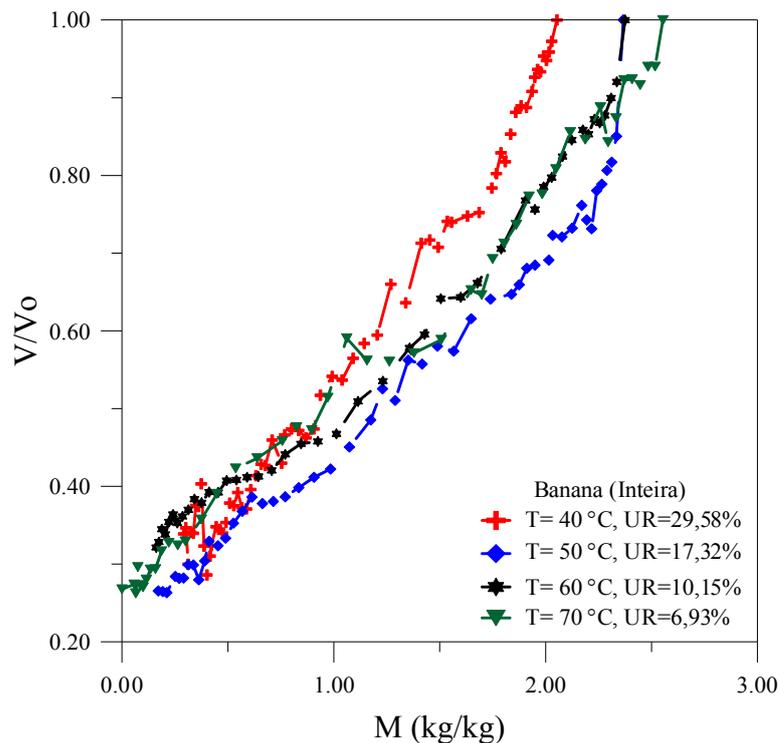


Figura 4.15- Razão entre o volume medido e inicial da banana inteira em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

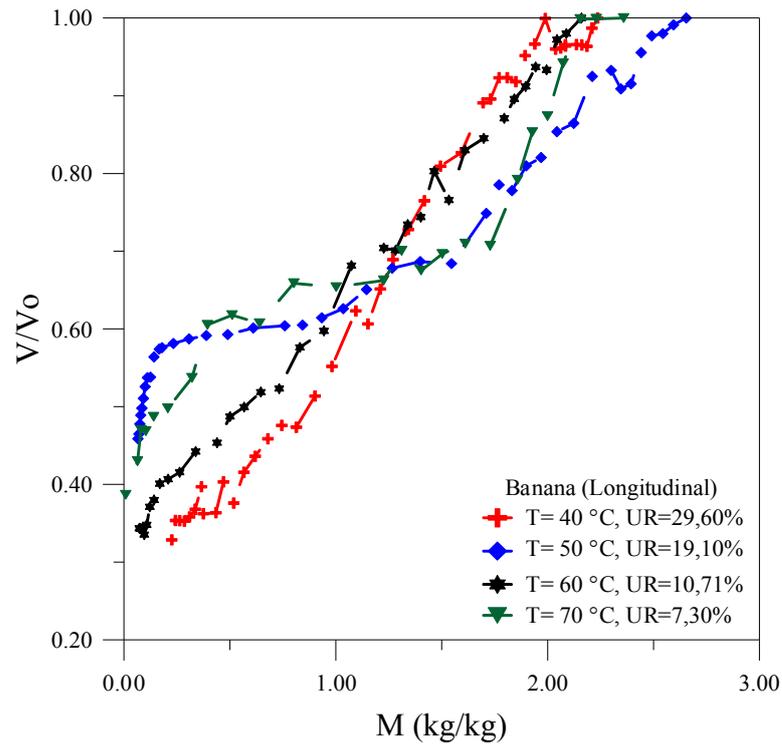


Figura 4.16- Razão entre o volume medido e inicial da banana cortada longitudinal em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

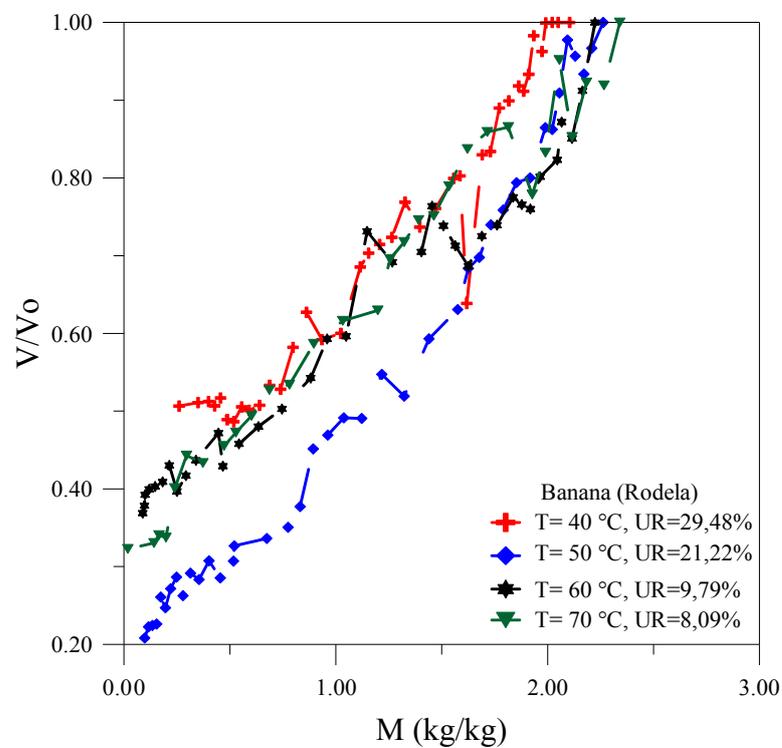


Figura 4.17- Razão entre o volume medido e inicial da banana cortada em rodela em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

As Figuras 4.18 a 4.21 mostram como a forma geométrica da banana exerce grande influência na redução de volume no processo de secagem. Verifica-se que quando a banana é cortada na forma de rodela, o efeito da redução de volume é bem acentuado, como está ilustrado nas curvas de secagem das figuras citadas.

As Figuras 4.22 a 4.24 ilustram a variação da área superficial da banana em função do tempo durante o processo de secagem, para as temperaturas constantes de, 40, 50, 60 e 70°C, respectivamente. As curvas que representam a cinética de secagem mostram que no início do processo há uma grande redução de área, pois, é neste período que o produto possui maior teor de umidade, conseqüentemente, maior perda de água. Pode-se também observar nos gráficos, que o fenômeno ocorre em um tempo bem menor quando usa-se temperatura mais elevada.

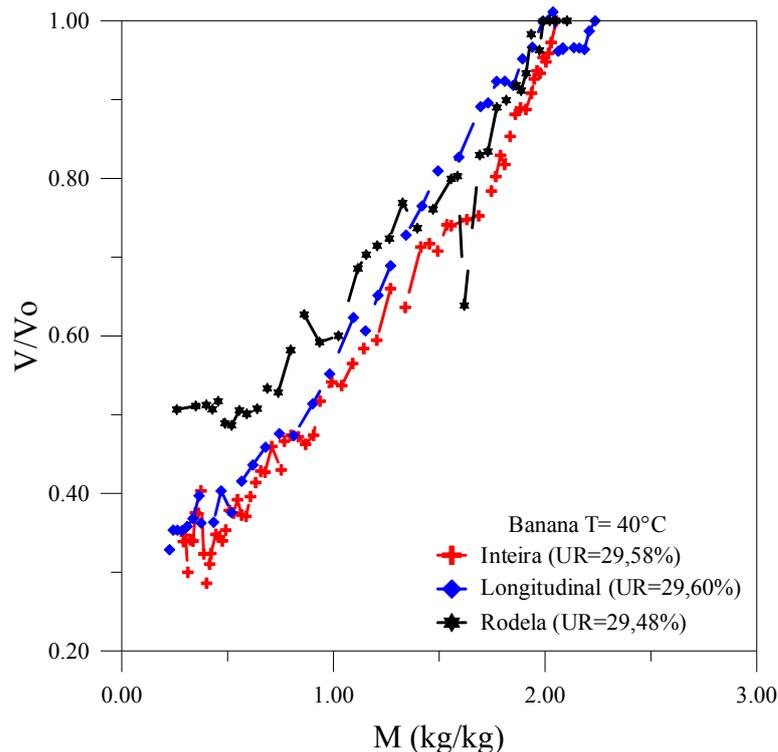


Figura 4.18- Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do teor de umidade durante a secagem a 40°C.

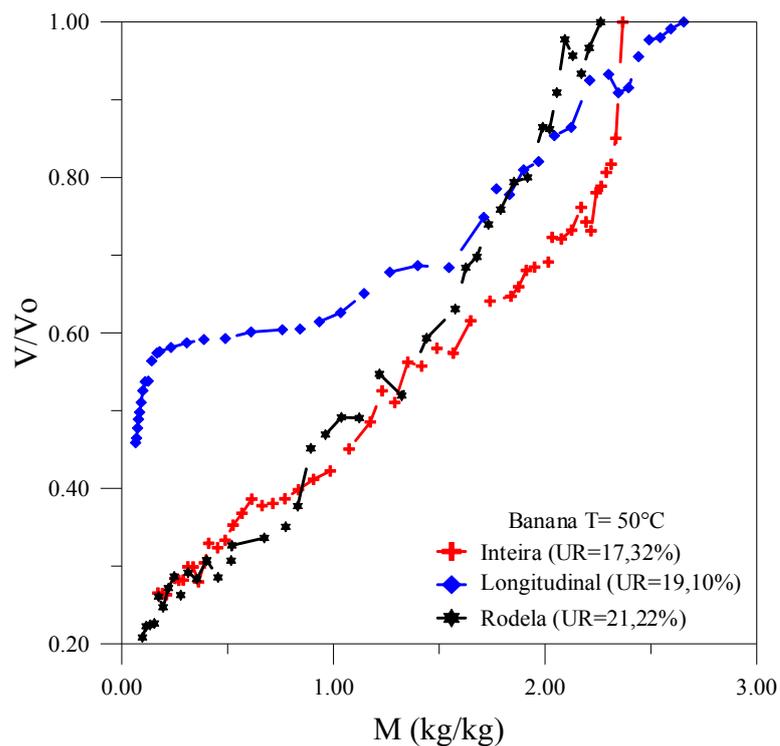


Figura 4.19- Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do teor de umidade durante a secagem a 50°C.

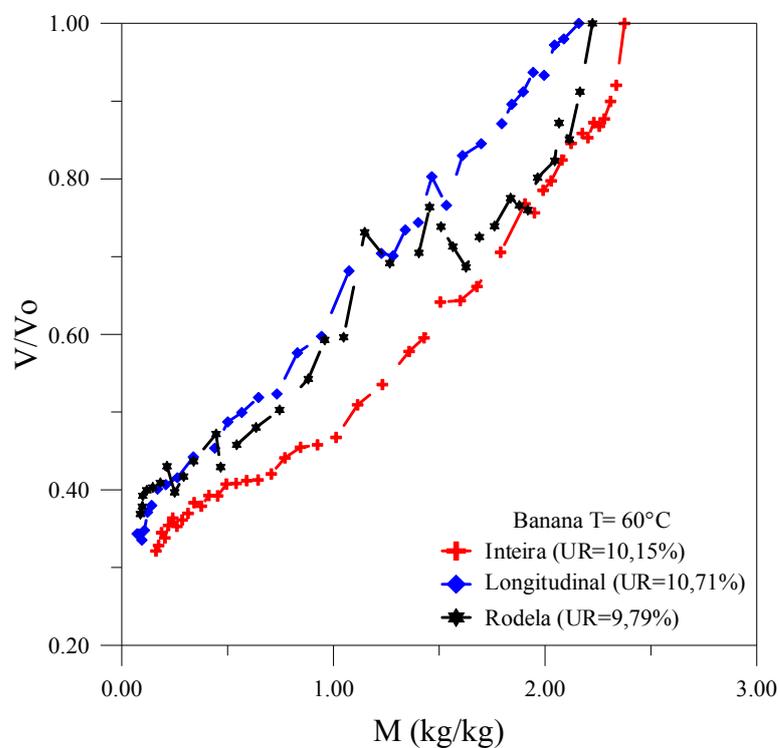


Figura 4.20- Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do teor de umidade durante a secagem a 60°C.

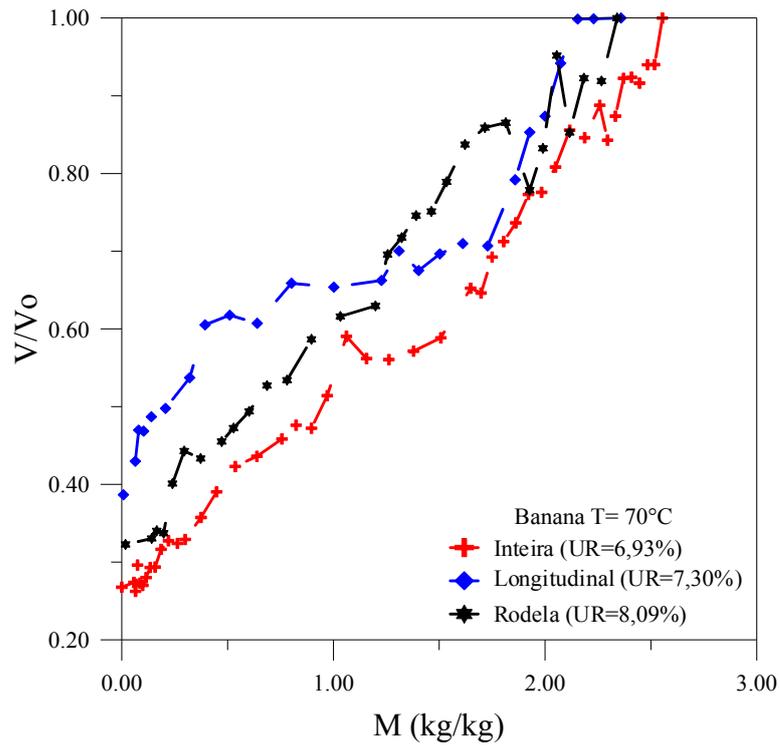


Figura 4.21- Razão entre o volume medido e inicial da banana em função do teor de umidade durante a secagem a 70°C.

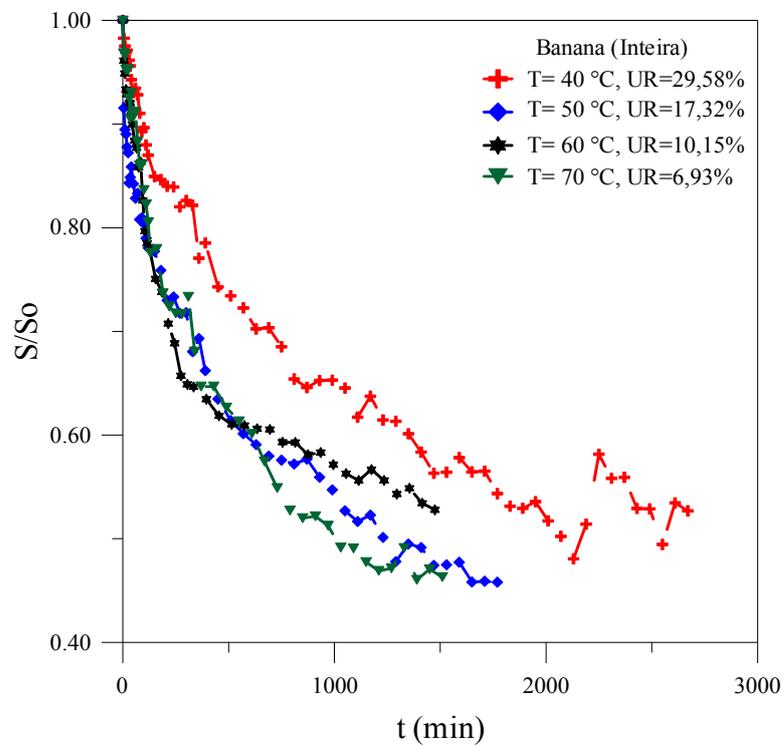


Figura 4.22- Razão entre áreas superficiais das amostras de banana inteira em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

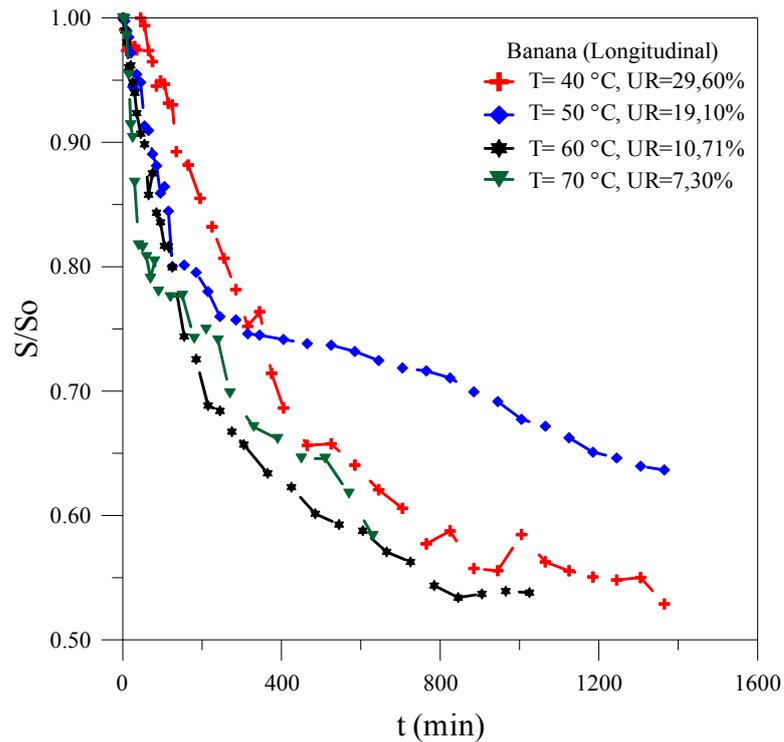


Figura 4.23- Razão entre áreas superficiais das amostras de banana cortada longitudinal em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

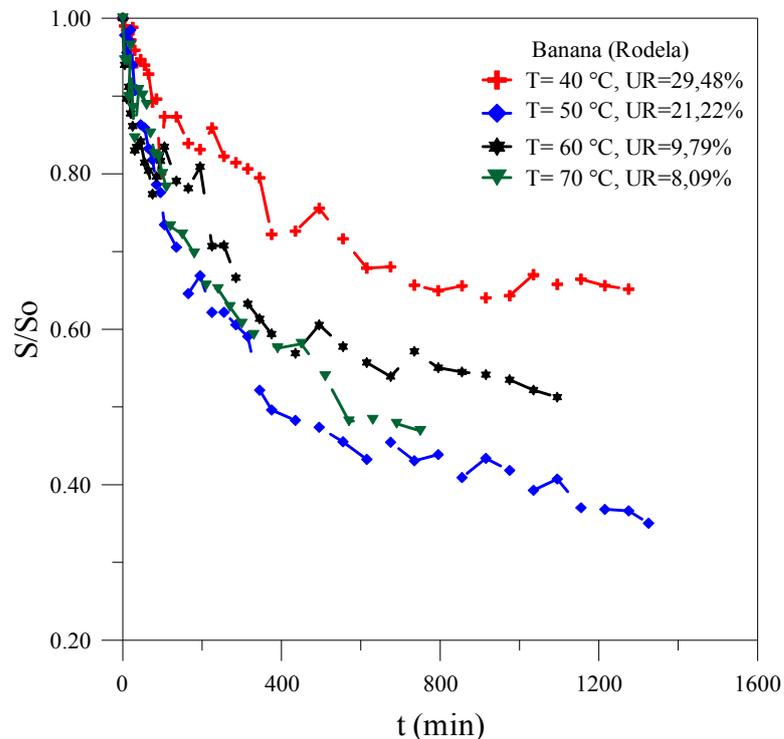


Figura 4.24- Razão entre áreas superficiais das amostras de banana cortada em rodela em função do tempo durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

As Figuras 4.25 a 4.28 mostram que o fenômeno de redução de área em função do tempo não só depende do nível de temperatura, mas também da forma geométrica do produto.

Verifica-se, que a banana cortada na forma de rodela, apresenta uma redução de área bem maior em um tempo menor do que quando ela é seca inteira.

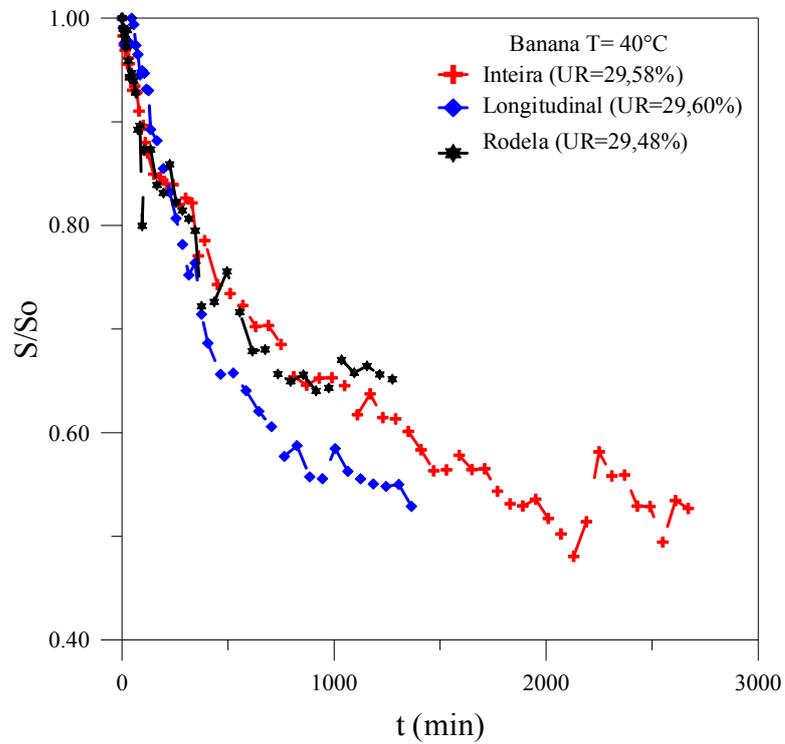


Figura 4.25- Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do tempo durante a secagem a 40°C.

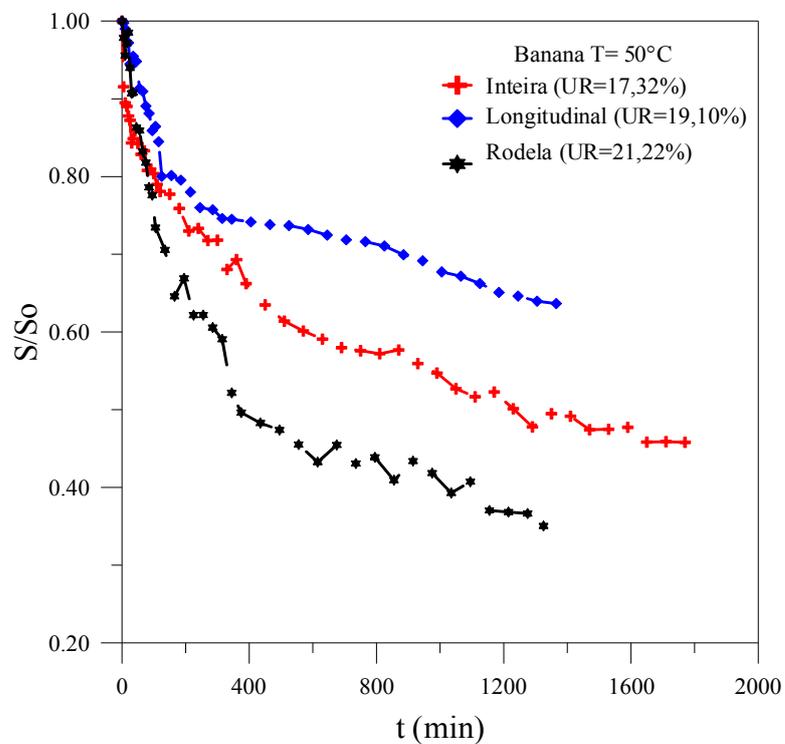


Figura 4.26- Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do tempo durante a secagem a 50°C.

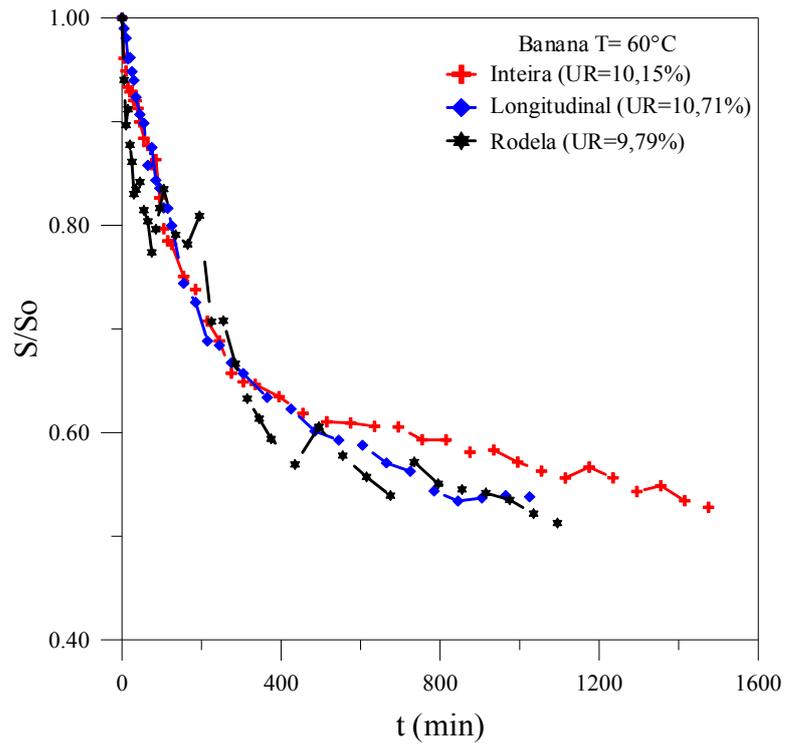


Figura 4.27- Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do tempo durante a secagem a 60°C.

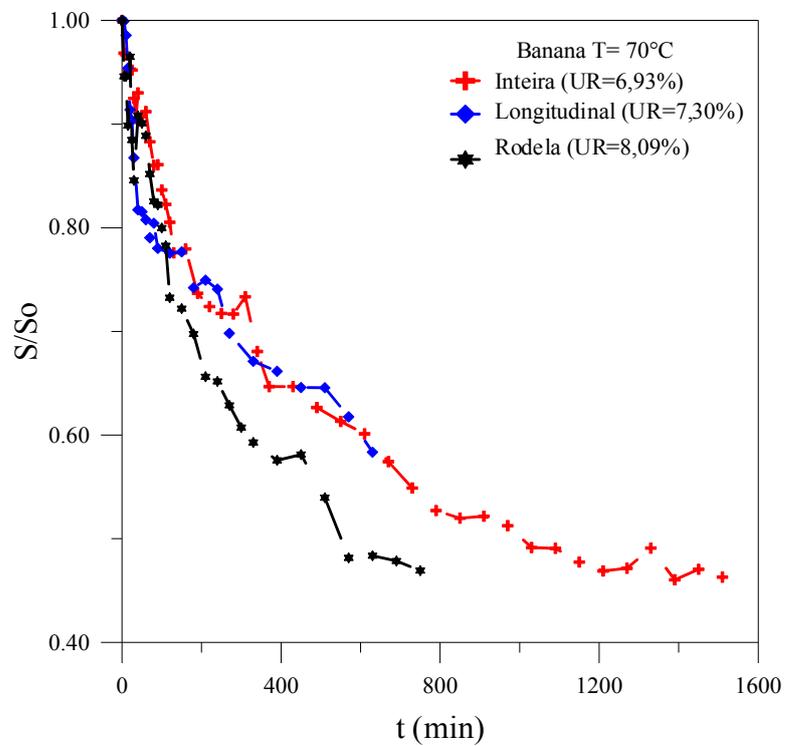


Figura 4.28- Razão entre áreas superficiais das amostras de banana em função do tempo durante a secagem a 70°C.

As Figuras 4.29 a 4.35 ilustram as variações dimensionais de área sofrida pela banana em função do teor de umidade médio, para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C respectivamente, para a banana em diversas formas geométrica. Observa-se que, para todas as temperaturas de secagem avaliadas, no início do processo, há uma grande perda de umidade, principalmente, quando a banana é cortada na forma de rodela, mostrando que a forma geométrica exerce grande influência no fenômeno de encolhimento. Assim, as dimensões de área da fruta muda desde uma velocidade alta no início do processo e que essa velocidade vai diminuindo em relação à perda de umidade do produto no decorrer do processo de secagem. Quando a umidade tender a zero, o encolhimento praticamente não existe. É importante salientar a importância da umidade relativa do ar de secagem no processo. Quanto menor seu valor, maior o potencial de secagem, fixado a temperatura do ar.

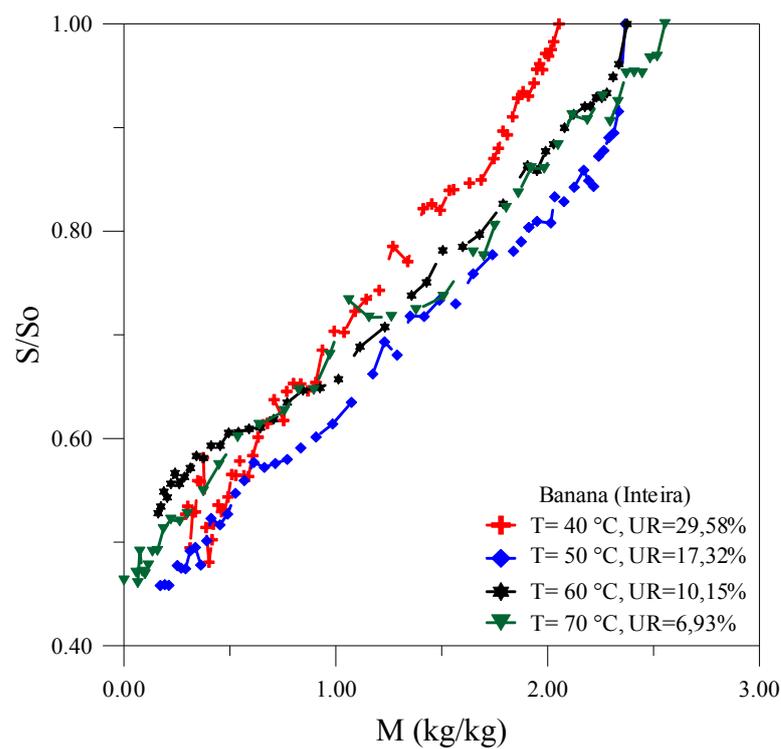


Figura 4.29- Razão entre áreas superficiais das amostras de banana inteira em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

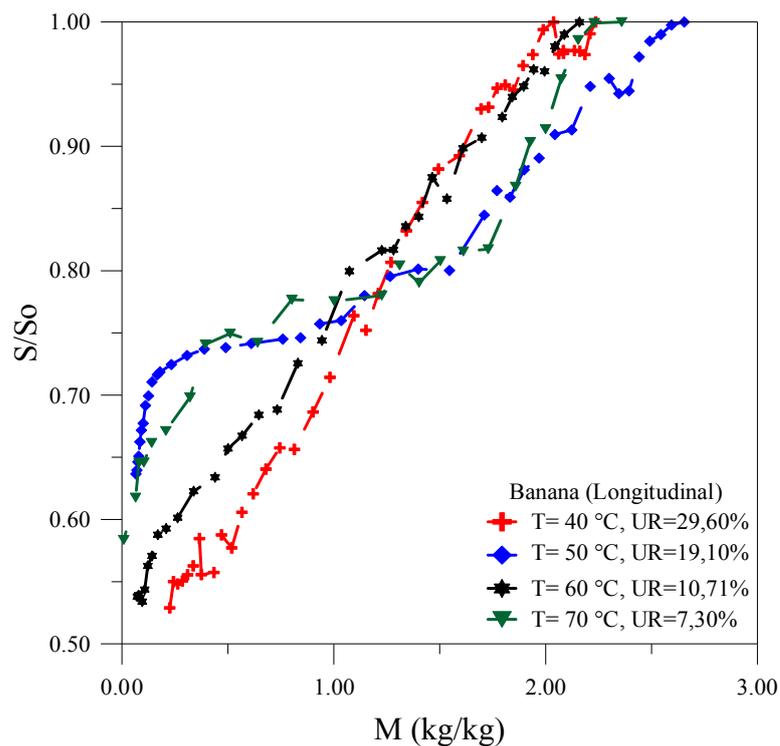


Figura 4.30- Razão entre áreas superficiais das amostras de bananas cortadas longitudinal em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

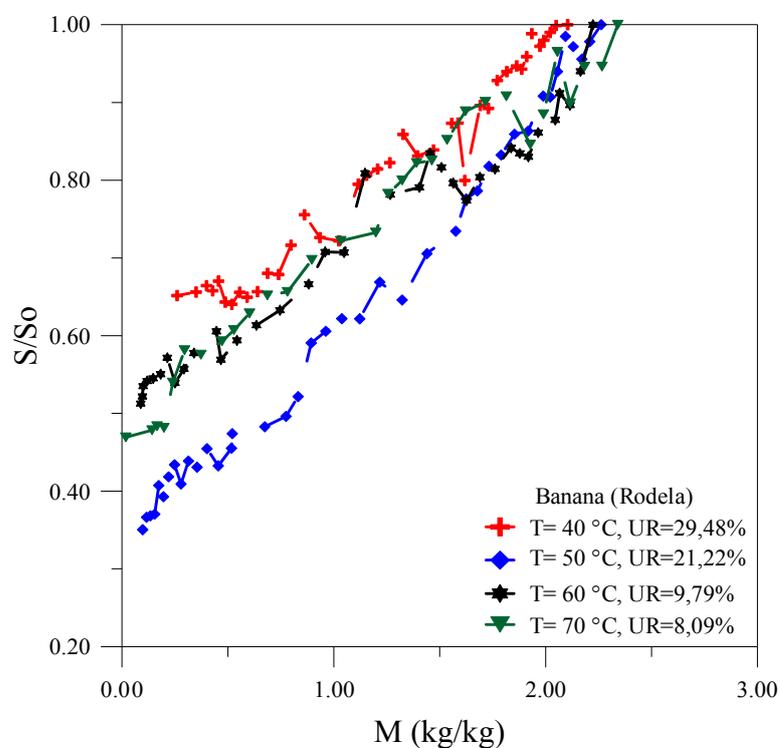


Figura 4.31- Razão entre áreas superficiais das amostras de bananas cortadas em rodela em função do teor de umidade durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

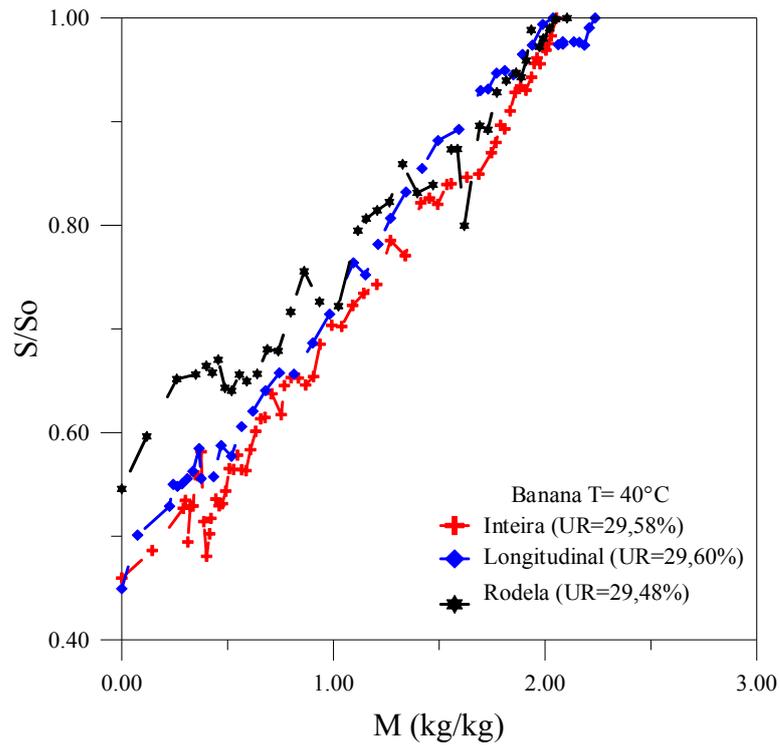


Figura 4.32- Razão entre áreas superficiais das amostras de bananas em função do teor de umidade durante a secagem a 40°C.

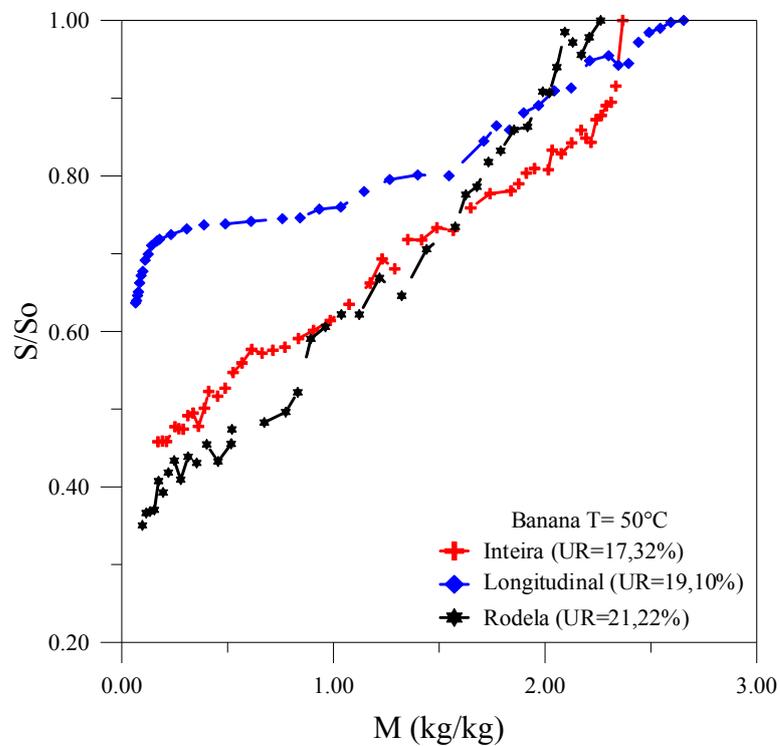


Figura 4.33- Razão entre áreas superficiais das amostras de bananas em função do teor de umidade durante a secagem a 50°C.

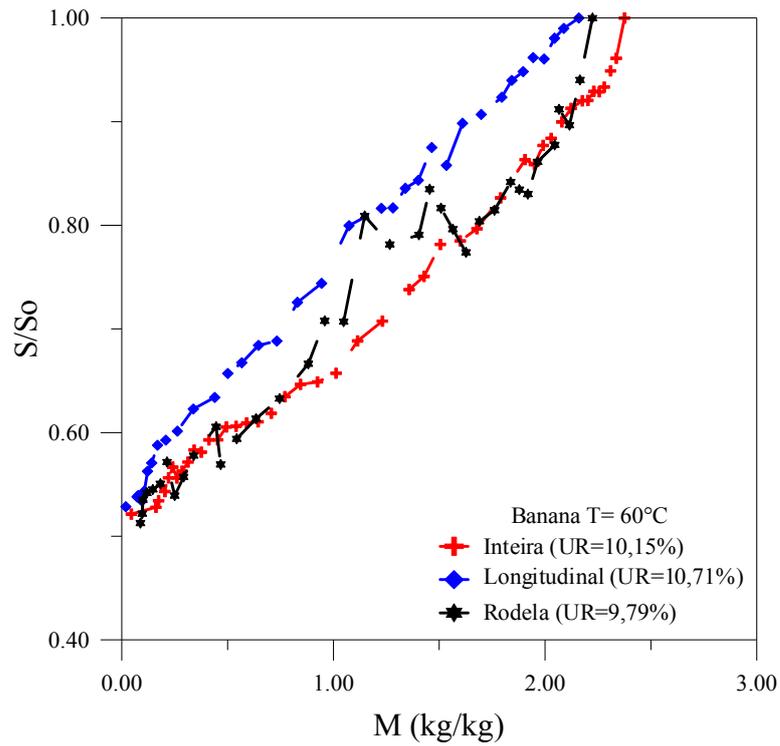


Figura 4.34- Razão entre áreas superficiais das amostras de bananas em função do teor de umidade durante a secagem a 60°C.

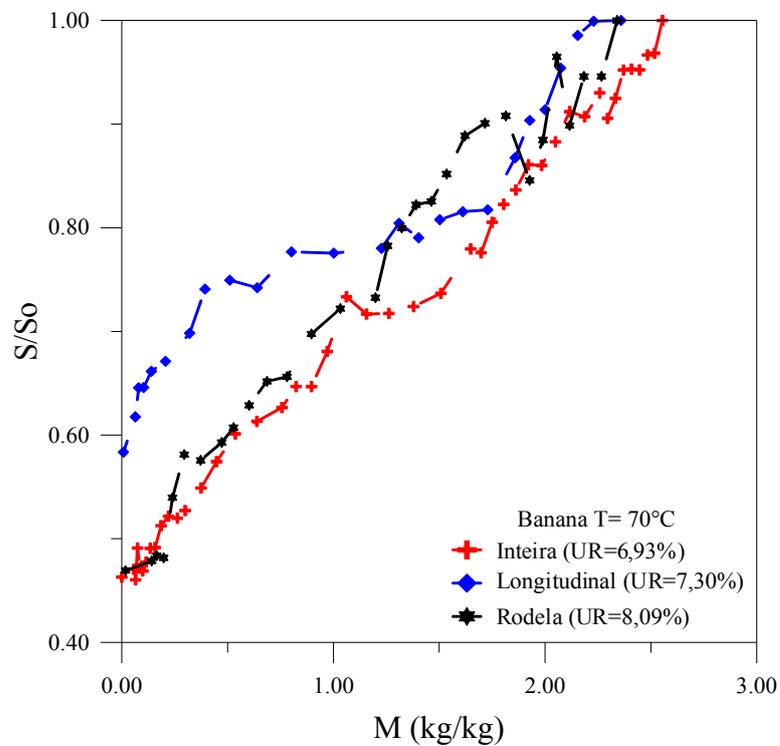


Figura 4.35- Razão entre áreas superficiais das amostras de bananas em função do teor de umidade durante a secagem a 70°C.

As Figuras 4.36 a 4.40 mostram as variações da temperatura superficial da banana com o tempo, para todos os testes de secagem realizados. Verifica-se que num primeiro estágio, as taxas de variação de temperatura são mais pronunciados nas primeiras horas de secagem, em comparação com as taxas de variação do teor de umidade. Posteriormente, num segundo estágio, aproximadamente após 5 h de secagem, ocorre a inversão de tendências, passando a ser mais elevados as taxas de variação do teor de umidade. Por fim, num terceiro e último estágio, ambas as taxas são pequenas, diminuindo a medida que o ponto de equilíbrio se aproxima. Isto ocorre independente da forma geométrica da banana e da temperatura de processo.

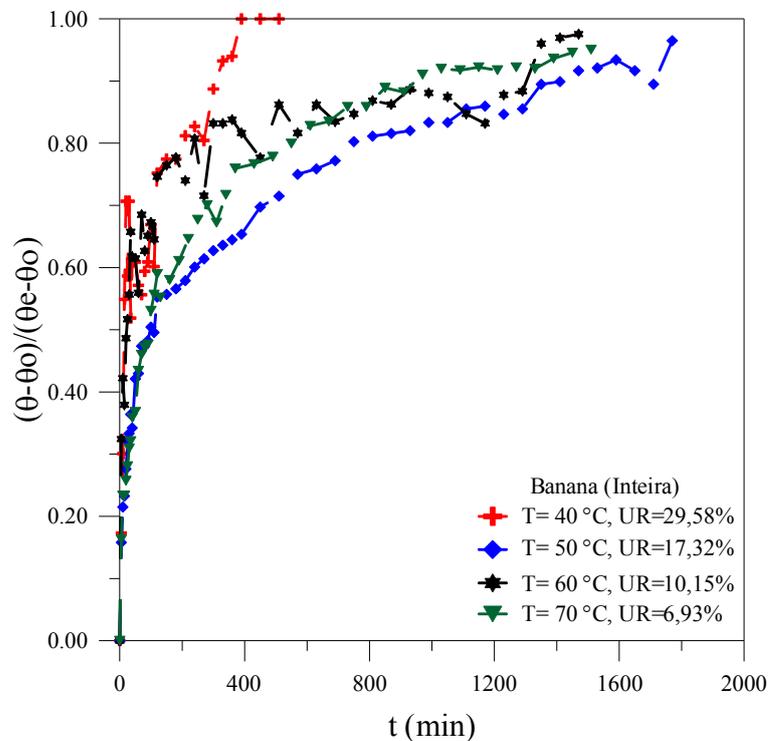


Figura 4.36 - Variação da temperatura adimensional na superfície da banana inteira durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

Analisando conjuntamente as Figuras 4.1 a 4.7 e 4.36 a 4.42 pode-se afirmar que a secagem da banana ocorre a uma taxa decrescente, em concordância com resultados da literatura (Maskan, 2000; Phoungchandang e Woods, 2000; Dandamrongrak et al., 2002; Queiroz e Nebra, 2001; Demirel e Turhan, 2003; Karim e Hawlader, 2005). Durante todo o período de taxa constante de secagem, a temperatura do produto permanece constante,

principalmente nos períodos iniciais de secagem, onde a perda de água é mais acentuada. Isto não foi verificado nos experimentos realizados nesta pesquisa. Observando as figuras citadas no início deste parágrafo, verifica-se que para temperaturas menores as curvas são mais suaves, implicando numa tendência que a difusividade térmica seja menor para uma menor temperatura. Neste sentido, a difusividade térmica também deve ser influenciada pelas temperaturas locais dentro do sólido. Podendo ainda acontecer um aumento do coeficiente de transferência de calor convectivo, ou até mesmo a combinação de um aumento de ambos os coeficientes.

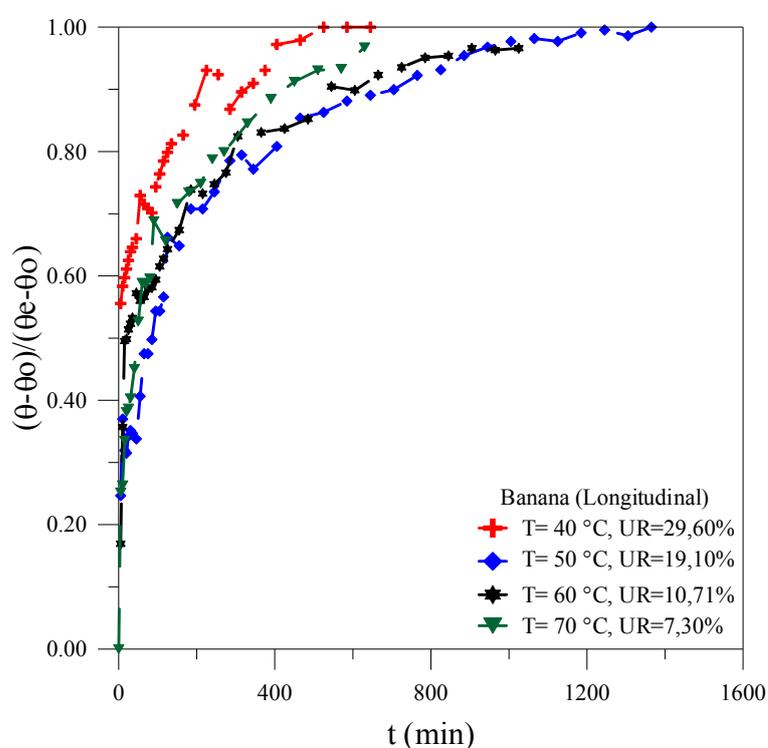


Figura 4.37 - Variação da temperatura adimensional na superfície da banana cortada longitudinalmente durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

Os valores das condições iniciais e finais da área superficial, volume e comprimento da banana, são apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.3, para cada teste experimental.

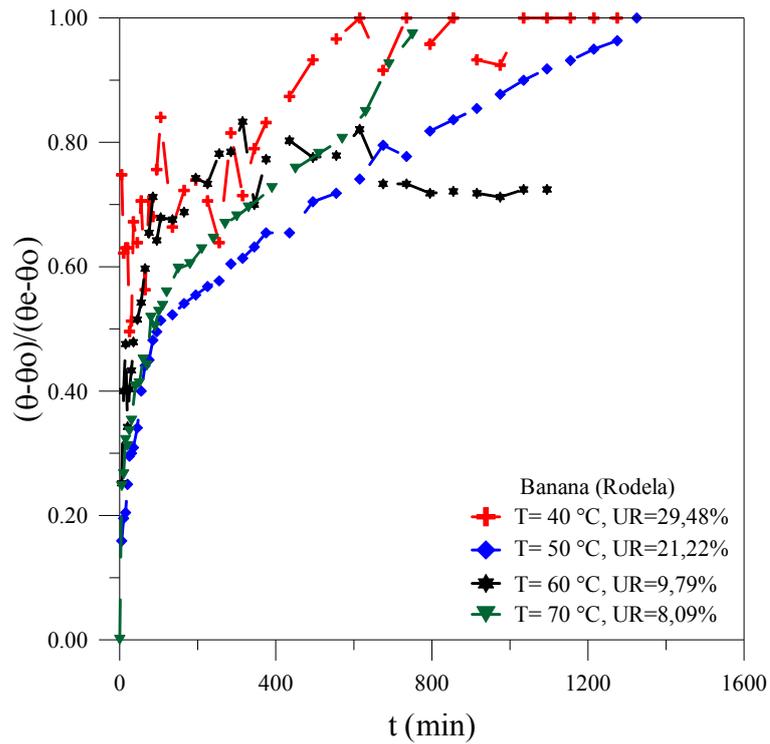


Figura 4.38 - Variação da temperatura adimensional na superfície da banana cortada em rodela durante a secagem a 40, 50, 60 e 70°C.

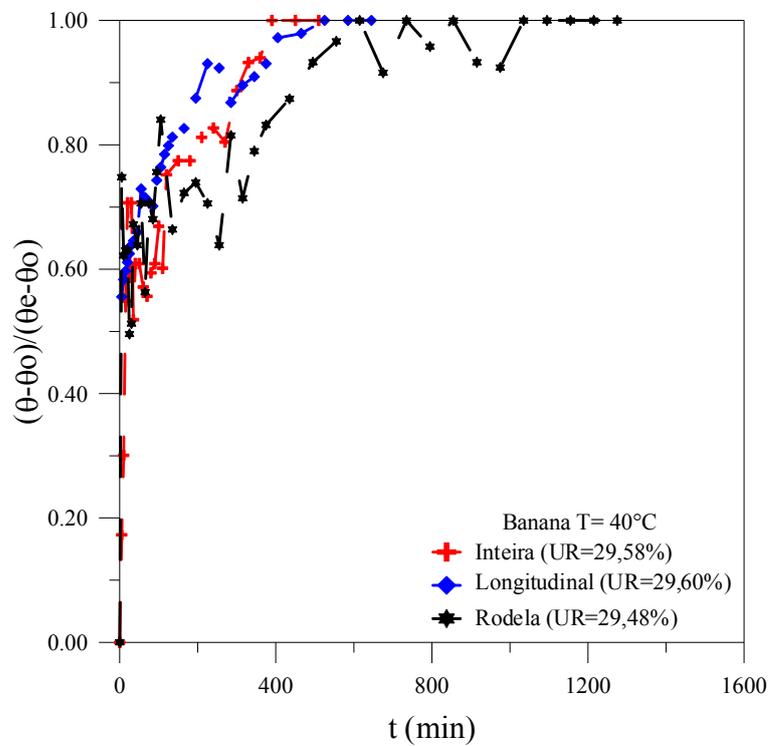


Figura 4.39 - Variação da temperatura adimensional na superfície da banana durante a secagem a 40°C.

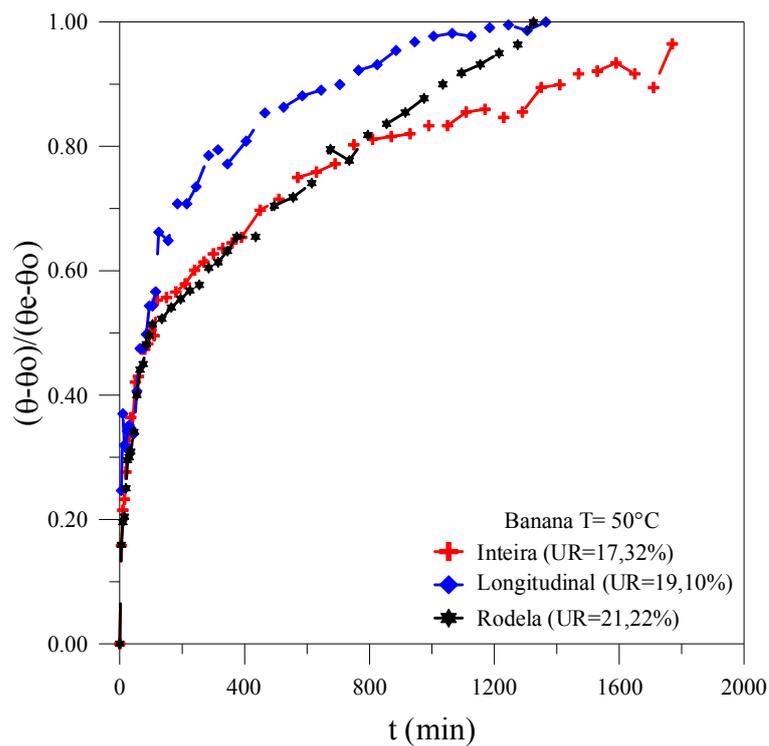


Figura 4.40 - Variação da temperatura adimensional na superfície da banana durante a secagem a 50°C.

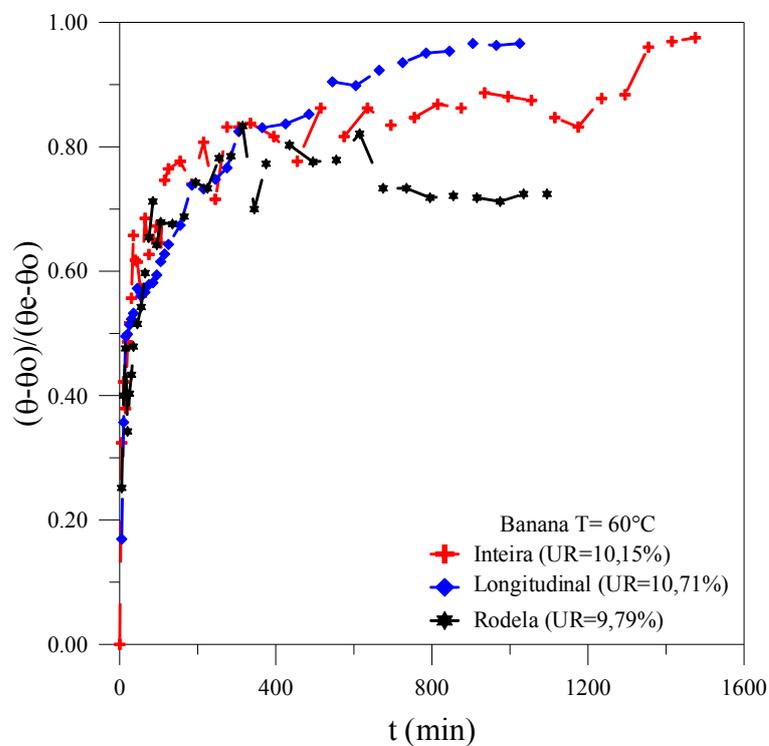


Figura 4.41 - Variação da temperatura adimensional na superfície da banana durante a secagem a 60°C.

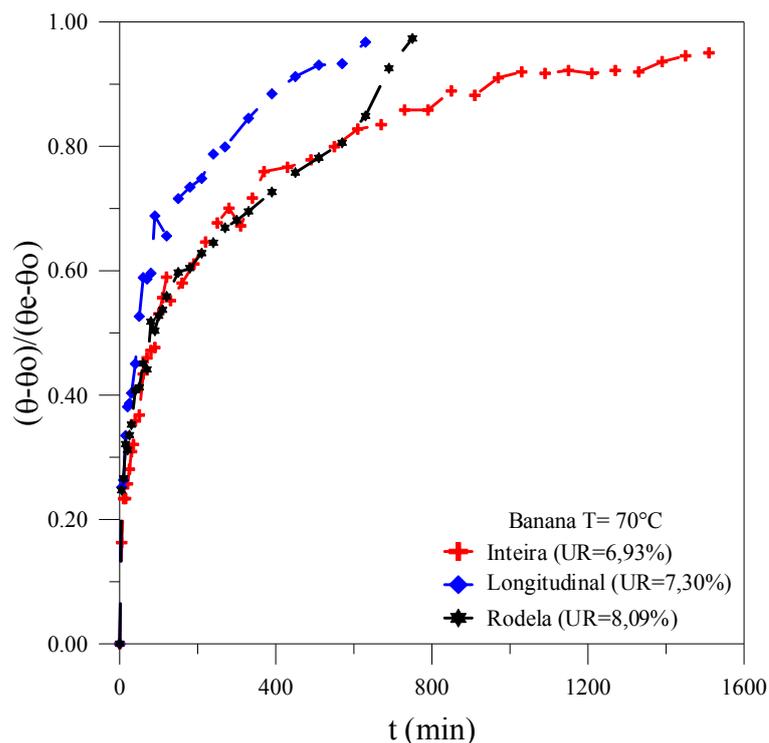


Figura 4.42 - Variação da temperatura adimensional na superfície da banana durante a secagem a 70°C.

Tabela 4.1 – Dados dimensionais da banana inteira durante a secagem.

T (°C)	Início				Final			
	D (mm)	L (mm)	V (mm ³)	S (mm ²)	D (mm)	L (mm)	V (mm ³)	S (mm ²)
40	29,65	112,76	51904,23	8482,82	18,86	94,43	17586,99	4469,32
50	26,72	97,60	36485,55	6630,63	15,26	79,40	9681,17	3037,12
60	31,42	122,39	63263,99	9745,45	18,86	109,13	20324,78	5144,56
70	27,83	105,36	42726,81	7441,30	15,97	87,59	11696,68	3501,14

Tabela 4.2 - Dados dimensionais da banana cortada longitudinalmente durante a secagem.

T (°C)	Início				Final			
	D (mm)	L (mm)	V (mm ³)	S (mm ²)	D (mm)	L (mm)	V (mm ³)	S (mm ²)
40	25,34	119,04	20011,26	3792,91	15,60	103,18	6573,75	2005,90
50	23,43	98,87	14209,45	2924,78	16,75	88,73	6517,31	1861,74
60	27,20	117,96	22847,62	4046,45	17,20	101,30	7845,75	2176,65
70	21,62	95,55	11692,58	2603,36	14,19	85,74	4519,77	1519,02

Tabela 4.3 Dimensionais da banana cortada em rodelas durante a secagem.

T (°C)	Início				Final			
	D (mm)	L (mm)	V (mm ³)	S (mm ²)	D (mm)	L (mm)	V (mm ³)	S (mm ²)
40	30,22	15,18	10888,05	2875,70	25,22	11,04	5015,04	1873,81
50	24,24	20,95	9668,05	2518,35	13,89	13,28	2012,30	882,55
60	28,07	21,21	13125,47	3108,06	19,77	15,77	4840,99	1593,41
70	26,99	18,64	10664,52	2724,77	18,31	13,07	3441,45	1278,44

As Tabelas 4.4 a 4.6 apresentam as relações dimensionais de comprimento, área superficial e volume, para cada teste de secagem, bem como o tempo total de cada experimento.

Tabela 4.4 - Dados de encolhimento relativo durante a secagem de banana inteira.

T (°C)	t (min)	D_f/D_o	L_f/L_o	S_f/S_o	V_f/V_o	M_o (b.u.)	S_o/V_o
40	2670	0,6361	0,8374	0,5269	0,3388	0,6725	0,1634
50	1770	0,5711	0,8135	0,4580	0,2634	0,7030	0,1817
60	1475	0,6002	0,8916	0,5279	0,3213	0,7039	0,1540
70	1450	0,5738	0,8313	0,4705	0,2737	0,7186	0,1741

Tabela 4.5 - Dados de encolhimento relativo durante a secagem de banana cortada longitudinalmente.

T (°C)	t (min)	D_f/D_o	L_f/L_o	S_f/S_o	V_f/V_o	M_o (b.u.)	S_o/V_o
40	1365	0,6156	0,8667	0,5288	0,3285	0,6910	0,1895
50	1365	0,7149	0,8974	0,6365	0,4587	0,7264	0,2058
60	1025	0,6323	0,8587	0,5379	0,3434	0,6835	0,1771
70	630	0,6563	0,8973	0,5835	0,3865	0,7023	0,2226

Nas Tabelas 4.4 e 4.6, ainda observa-se que o volume da banana variou na média (das três geometrias) 39,12; 31,00; 34,49 e 37,76%, para as temperatura de 40, 50, 60 e 70°C, respectivamente. As maiores dimensões da banana tiveram uma maior retração linear. Observa-se ainda que, há uma pequena diferença entre o percentual da variação do volume da banana e o complementar do teor de umidade inicial em base úmida. Isso se dá devido a pequenos erros de medição e uso do equipamento no momento da leitura, talvez, até mesmo

pelo aumento da rigidez da banana durante a secagem. No entanto, há uma tendência de linearidade entre o volume e o teor de umidade do sólido durante o processo.

Tabela 4.6 - Dados de encolhimento relativo durante a secagem de banana cortada em rodela.

T (°C)	t (min)	D_f/D_o	L_f/L_o	S_f/S_o	V_f/V_o	M_o (b.u.)	S_o/V_o
40	1275	0,8345	0,7272	0,6516	0,5065	0,6778	0,2641
50	1325	0,5730	0,6338	0,3504	0,2081	0,6935	0,2605
60	1095	0,7043	0,7435	0,5127	0,3688	0,6898	0,2368
70	750	0,6784	0,7012	0,4692	0,3227	0,7006	0,2555

Após a análise das Tabelas 4.1 a 4.6, observa-se que a variação volumétrica apresenta uma leve tendência a aumentar com a elevação da temperatura, o que é esperado. Similar comportamento ocorre com a variação da área superficial, bem como com as dimensões da banana. Este comportamento é verificado independente da geometria.

Conforme Tabelas 3.1 a 3.3, o tempo de secagem da banana inteira a 70°C é aproximadamente igual ao de 60°C, 22% menor comparado ao de 50°C e 84% menor que o de 40°C. O tempo de secagem decresceu em torno de 20,3 h com o aumento de 30°C na temperatura de secagem. Para secagem de banana cortada longitudinalmente, o tempo de secagem a 70°C é 63% menor do que a de 60°C, 117% menor comparado ao de 50°C e 117% menor que o de 40°C. O tempo de secagem decresceu em torno de 12,3 h com o aumento de 30°C na temperatura de secagem. Já para secagem de banana cortada em rodela, o tempo de secagem a 70°C é 46% menor que o de 60°C, 76% menor comparado ao de 50°C e 70% menor que o de 40°C. O tempo de secagem decresceu em torno de 9,6 h com o aumento de 30°C na temperatura de secagem.

Pela análise das Tabelas 4.4 a 4.6 pode ser visto que a razão entre os diâmetros final e inicial foi menor que a relação de comprimento da banana. Isto implica dizer que a umidade naquela direção difunde mais rapidamente que na outra devido ao efeito geométrico. Assim, é de se esperar que o coeficiente de difusão na direção radial decresce mais que na direção axial. Isto caracteriza um encolhimento não homogêneo.

De acordo com Ramos et al. (2003), a perda de água e voláteis, que ocorre durante a secagem, resulta em maior variação estrutural nos materiais que levam as características sensoriais e de textura diferentes do produto fresco. O endurecimento da superfície da banana foi visualmente verificado durante e após os experimentos.

4.2 Empírico

Modelos matemáticos são usados para descrever as características cinéticas do processo de secagem, visando melhorar, projetar e controlar os sistemas de secagem. Nesta pesquisa, modelos baseados na análise concentrada foram usada para prever a perda de água das bananas. As Tabelas 4.7 a 4.9 reportam os parâmetros da Equação (3.10) obtidos após ajuste com os dados experimentais, para cada condição de secagem.

Tabela 4.7 – Parâmetros da Equação (3.10) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade da banana inteira.

T (°C)	Parâmetros						R	Proporção da variância R ² (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	A ₁	K ₁	A ₂	K ₂	A ₃	K ₃			
40	0,258925	0,003394	0,572271	0,000856	0,163841	0,000642	0,99984	99,967	0,002154716
50	0,112857	0,009172	0,148892	0,000889	0,740397	0,001742	0,99988	99,976	0,001277152
60	0,339489	0,001136	0,340698	0,004919	0,340448	0,004770	0,99899	99,797	0,010271035
70	-0,030115	0,000232	0,156450	0,009797	0,879095	0,002182	0,9997	99,941	0,00323396

Tabela 4.8 – Parâmetros da Equação (3.10) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade da banana cortada longitudinalmente.

T (°C)	Parâmetros						R	Proporção da variância R ² (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	A ₁	K ₁	A ₂	K ₂	A ₃	K ₃			
40	0,390471	0,001581	0,011081	-0,000536	0,597089	0,002958	0,99963	99,925	0,00335760
50	0,199478	0,002785	0,265644	0,005685	0,530756	0,003690	0,99972	99,943	0,002940328
60	0,337103	0,003735	0,337485	0,009479	0,329956	0,003774	0,99961	99,921	0,003164997
70	-0,217682	0,009250	0,971939	0,007800	0,228836	0,006637	0,99984	99,968	0,000925483

Tabela 4.9 – Parâmetros da Equação (3.10) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade da banana cortada em rodela

T (°C)	Parâmetros						R	Proporção da variância R ² (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	A ₁	K ₁	A ₂	K ₂	A ₃	K ₃			
40	0,175599	0,001206	0,115705	0,0115938	0,701496	0,001796	0,99945	99,890	0,003752647
50	0,525089	0,003383	0,087965	0,017074	0,385952	0,002349	0,99982	99,963	0,001670136
60	0,251455	0,004151	0,071157	0,003977	0,651743	0,003574	0,99873	99,746	0,010807184
70	0,650592	0,004157	0,207097	0,016000	0,140085	0,004697	0,99975	99,951	0,001461169

As Figuras 4.43 a 4.54 ilustram as curvas de ajuste do teor de umidade versus tempo de secagem. É evidenciado nas tabelas e nos gráficos apresentados, a excelente concordância entre os valores preditos e experimentais, caracterizados por coeficientes de correlação próximos de 1,0.

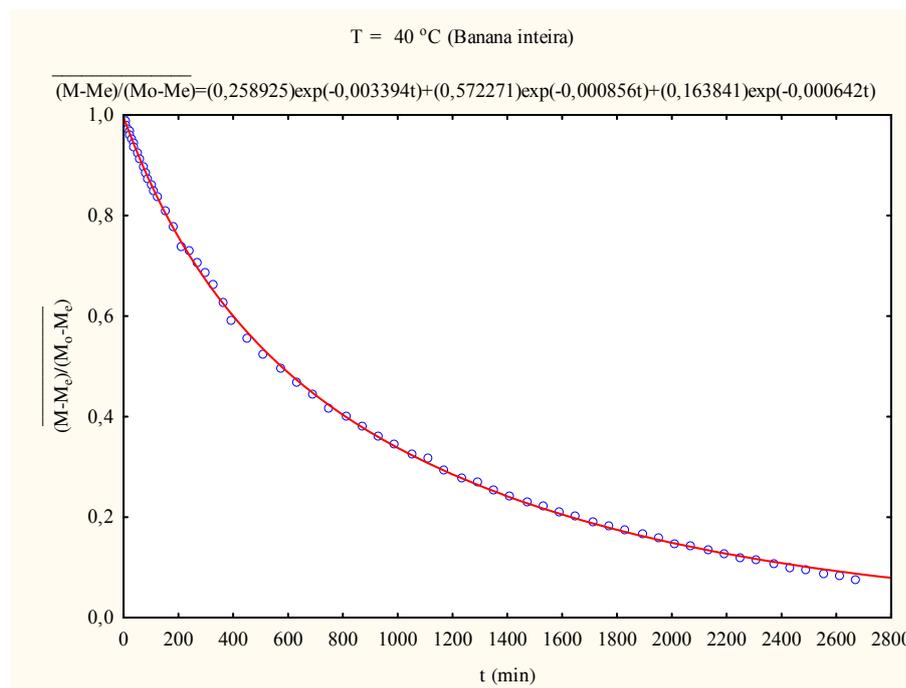


Figura 4.43 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana inteira, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 40°C.

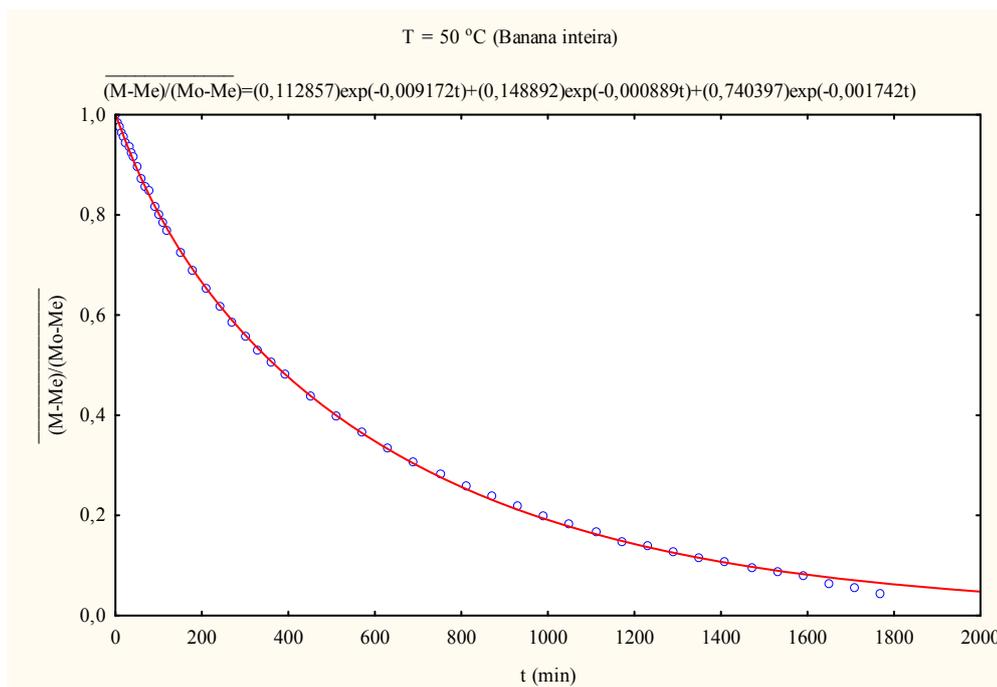


Figura 4.44 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

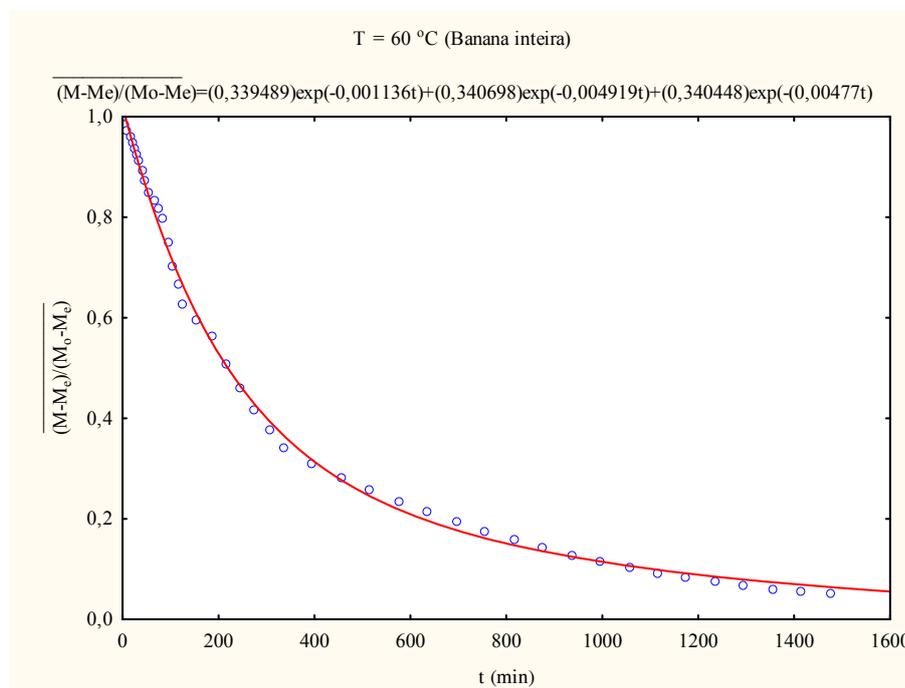


Figura 4.45 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

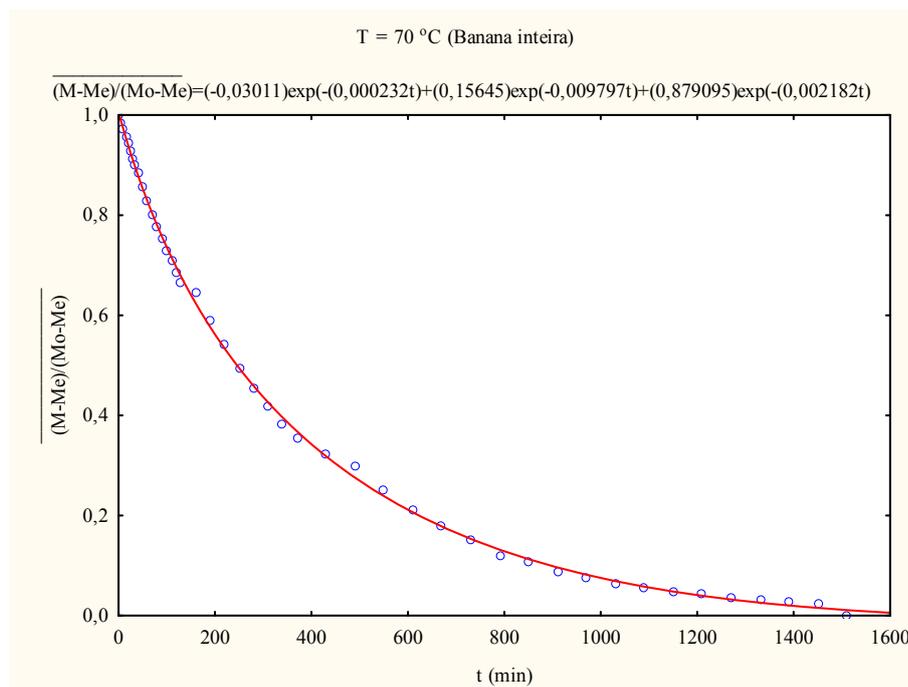


Figura 4.46 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana inteira, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

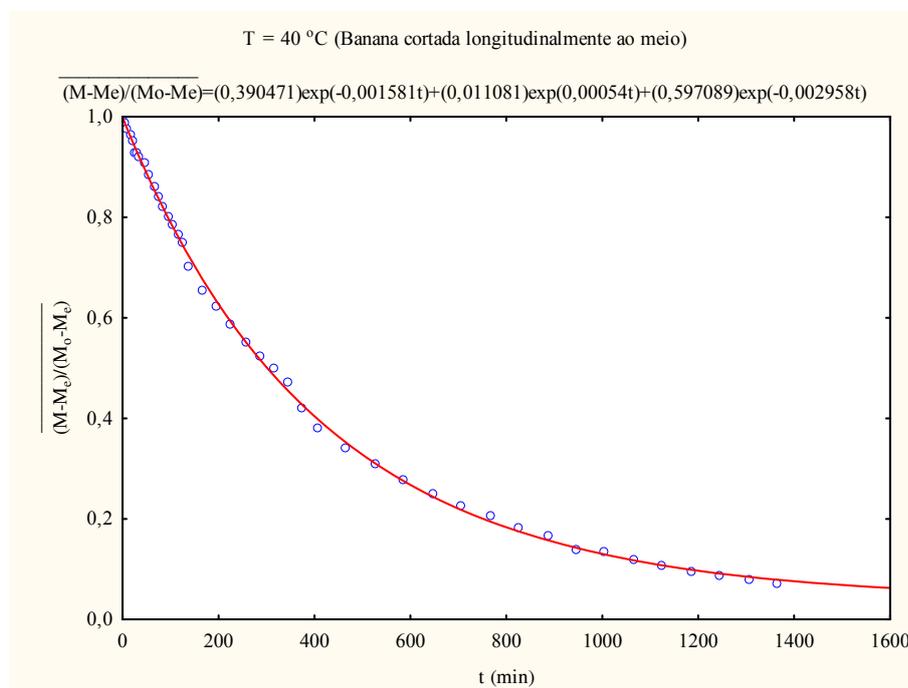


Figura 4.47 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 40°C.

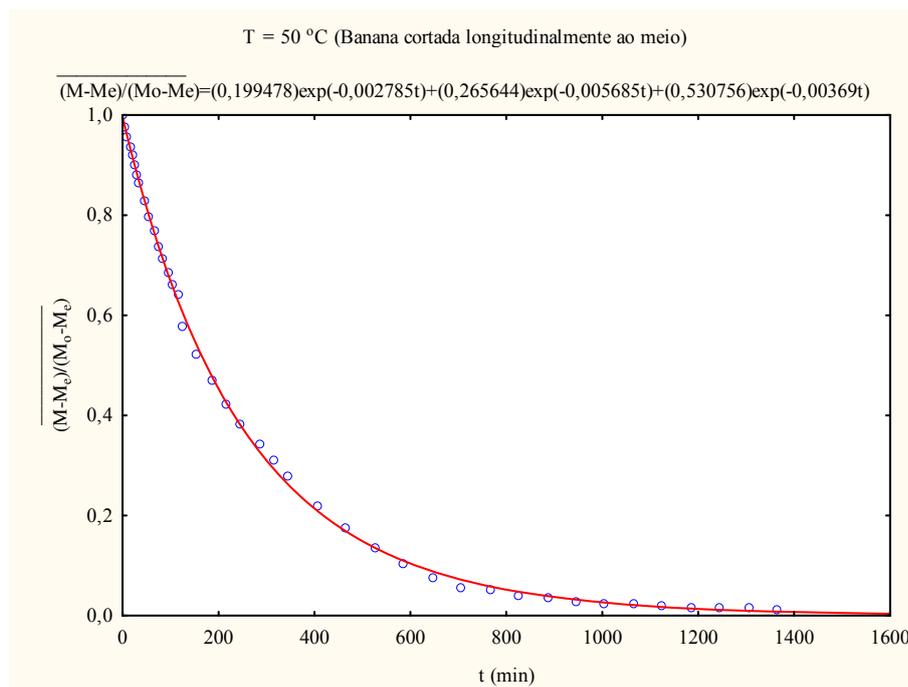


Figura 4.48 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

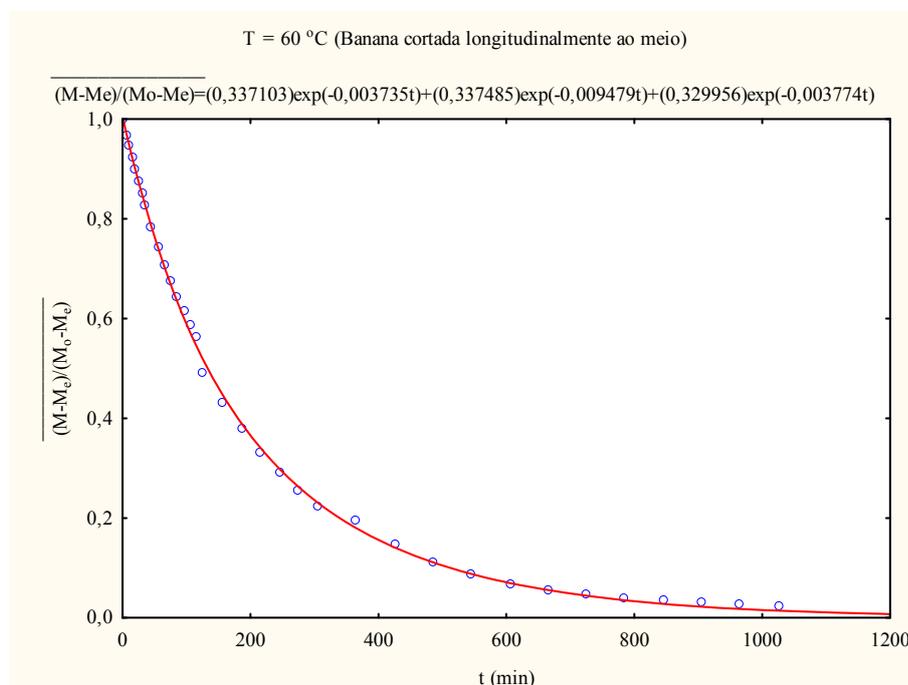


Figura 4.49 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

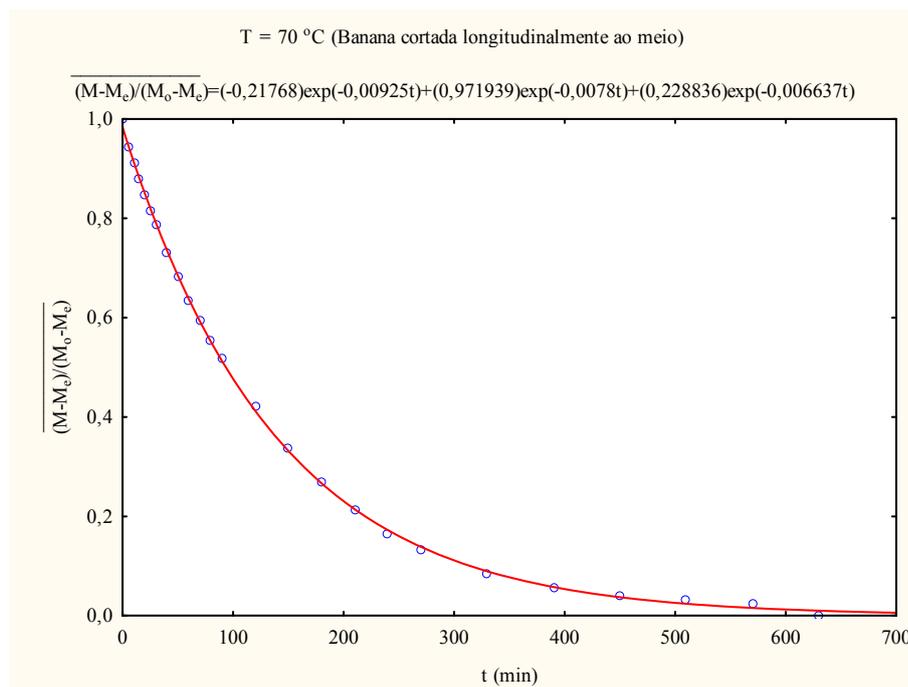


Figura 4.50 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C..

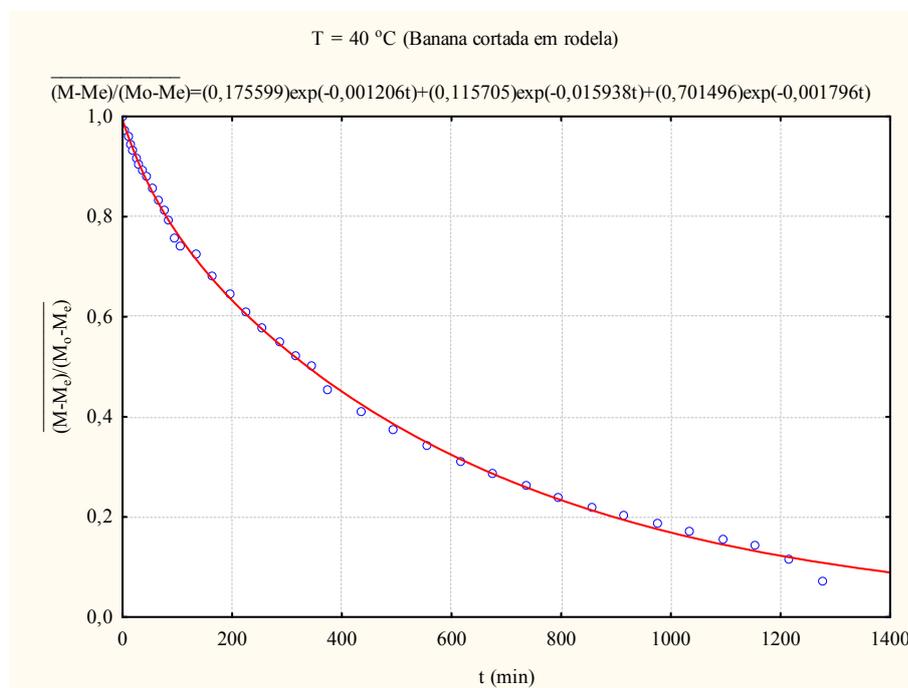


Figura 4.51 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C.

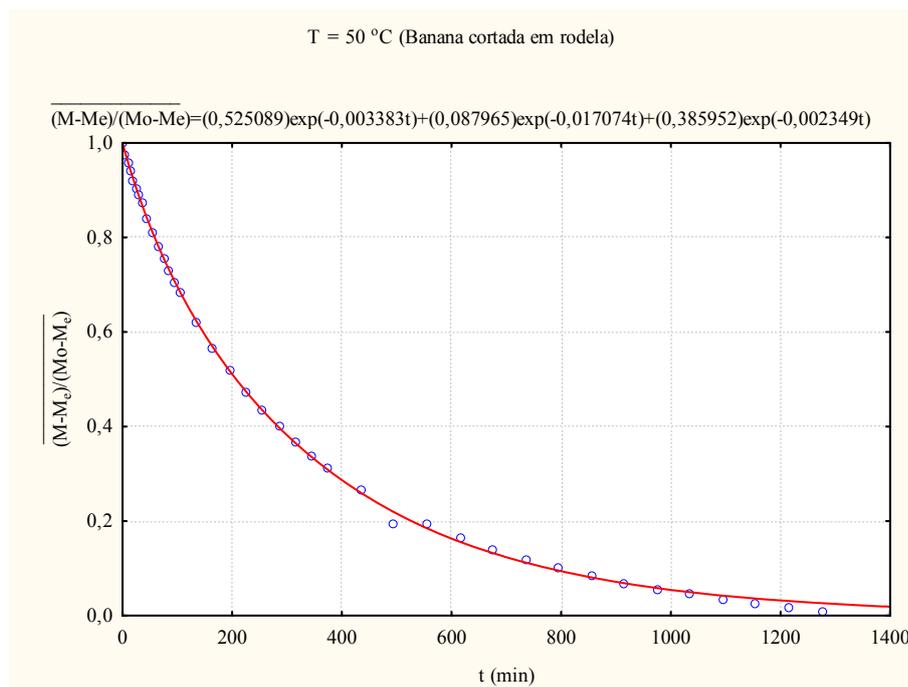


Figura 4.52 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

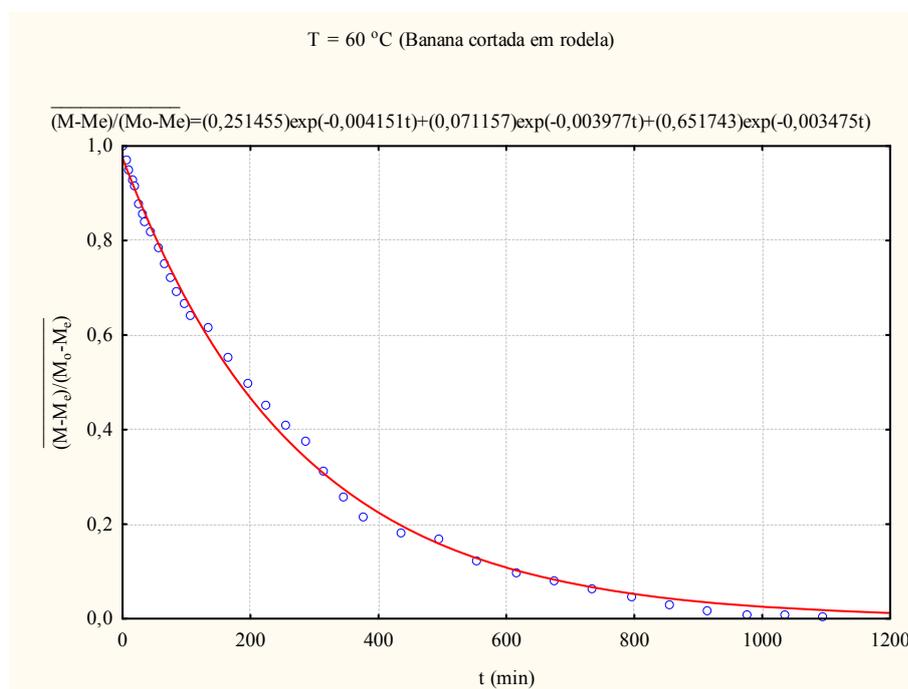


Figura 4.53 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

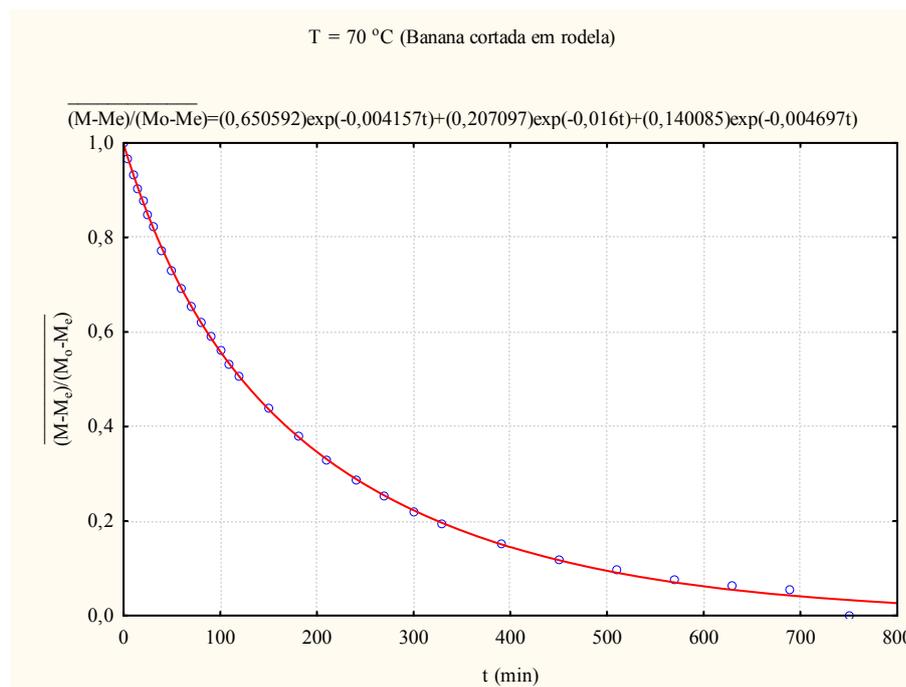


Figura 4.54 - Comparação entre os teores de umidade médios da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

As Tabelas 4.10 a 4.12 reportam os parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste com os dados experimentais, para cada condição de secagem.

Tabela 4.10 – Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana inteira

T (°C)	Parâmetros				R	Proporção da variância R ² (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	A ₁	A ₂	A ₃	K ₁			
40	0,037298	0,231240	0,660890	1,468379	0,93594	87,599	0,189783248
50	-0,377379	0,705872	3,384060	0,562854	0,99726	99,453	0,015139498
60	0,217534	0,231436	0,112654	0,979766	0,97340	94,750	0,084209603
70	-0,269941	0,364485	6,298940	1,066960	0,99712	99,425	0,017070671

Tabela 4.11 – Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana cortada longitudinalmente ao meio

T (°C)	Parâmetros				R	Proporção da variância R ² (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	A ₁	A ₂	A ₃	K ₁			
40	-1,41442	2,982499	2,995881	0,192878	0,99088	98,185	0,021580674
50	-0,513607	0,858278	4,222274	0,564710	0,99047	98,102	0,05496655
60	0,024190	0,293791	0,804804	1,062748	0,98751	97,118	0,04402912
70	-0,254919	0,598302	2,718189	0,724988	0,99572	99,145	0,01327251

Tabela 4.12 – Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana cortada em rodela

T (°C)	Parâmetros				R	Proporção da variância R ² (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	A ₁	A ₂	A ₃	K ₁			
40	-2,90426	4,421144	4,608435	0,152412	0,92034	84,703	0,23492345
50	-2,49256	2,421846	10,66322	0,382429	0,99424	98,825	0,029178606
60	0,199516	0,185784	0,082607	1,099154	0,92558	85,669	0,167104187
70	-2,632190	2,644556	10,084060	0,368001	0,99318	98,641	0,019152563

As Figuras 4.55 a 4.66 ilustram as curvas de ajuste da temperatura na superfície da banana versus tempo de secagem. É evidenciado nas tabelas e nos gráficos apresentados, a boa concordância entre os valores preditos e experimentais, caracterizados por coeficientes de correlação maiores que 0,92.

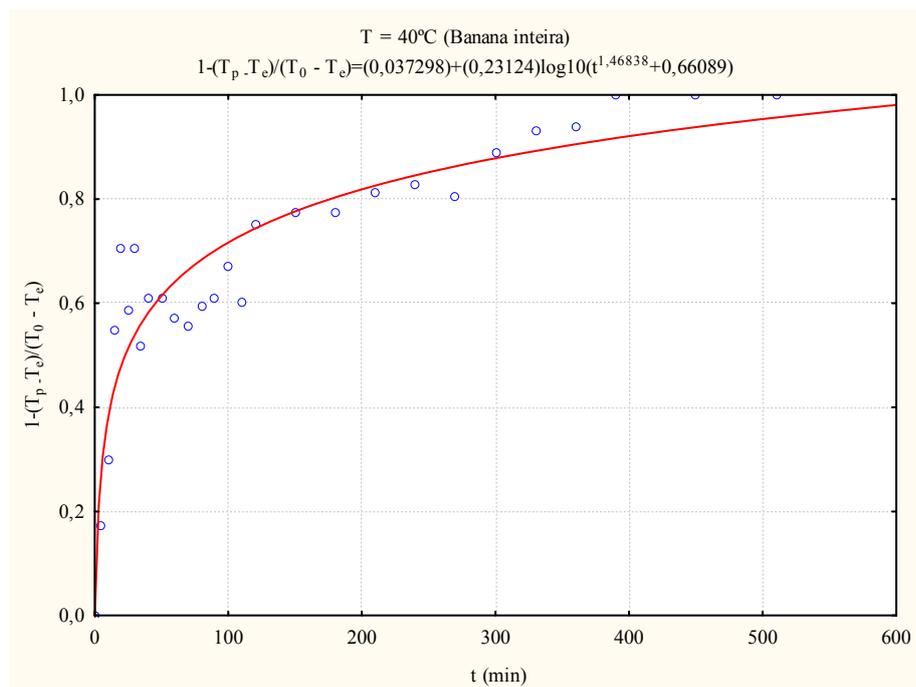


Figura 4.55 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C.

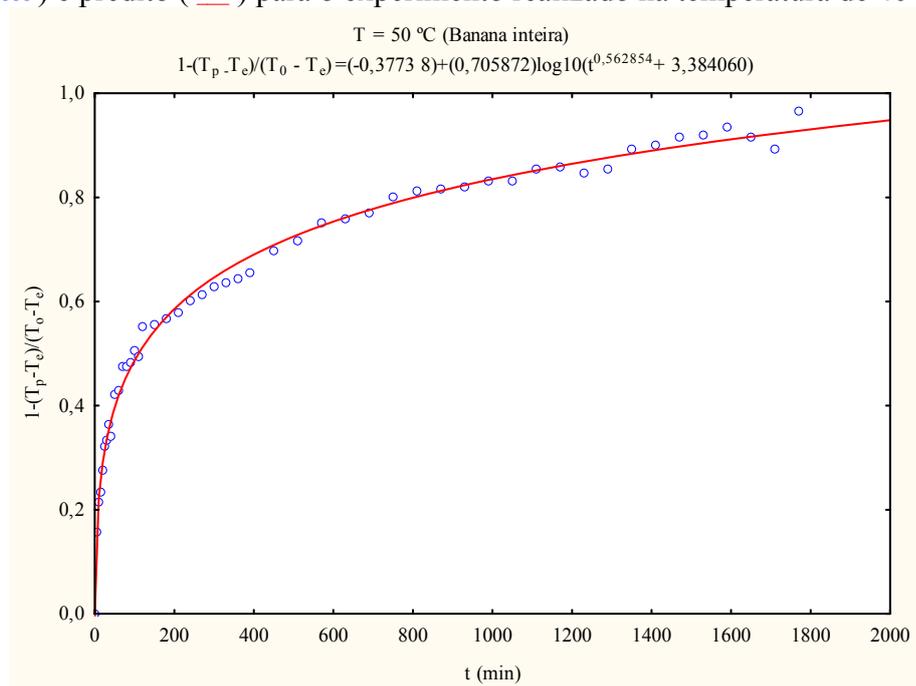


Figura 4.56 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana inteira, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

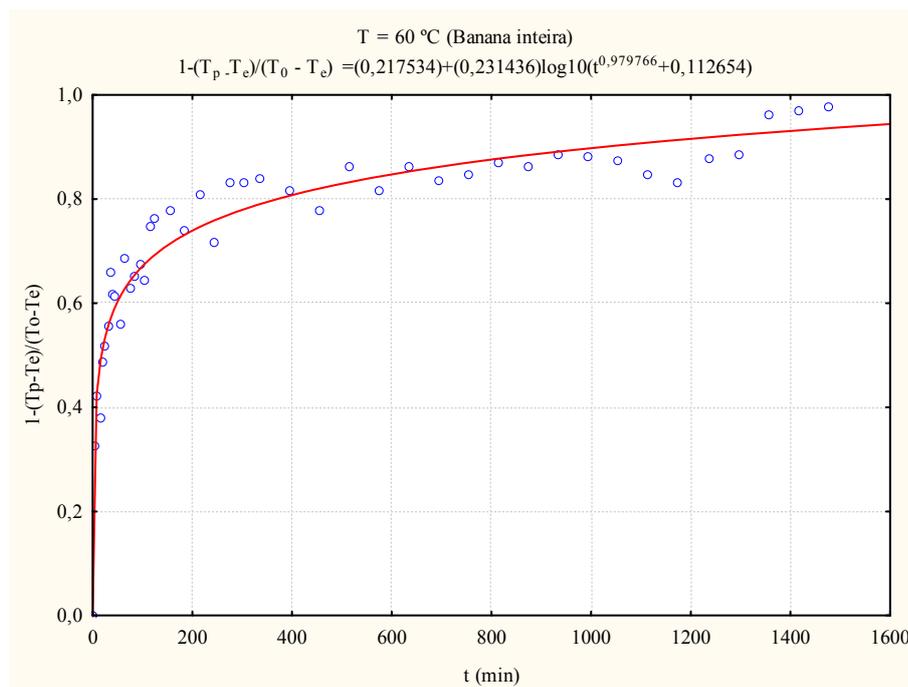


Figura 4.57 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana inteira, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

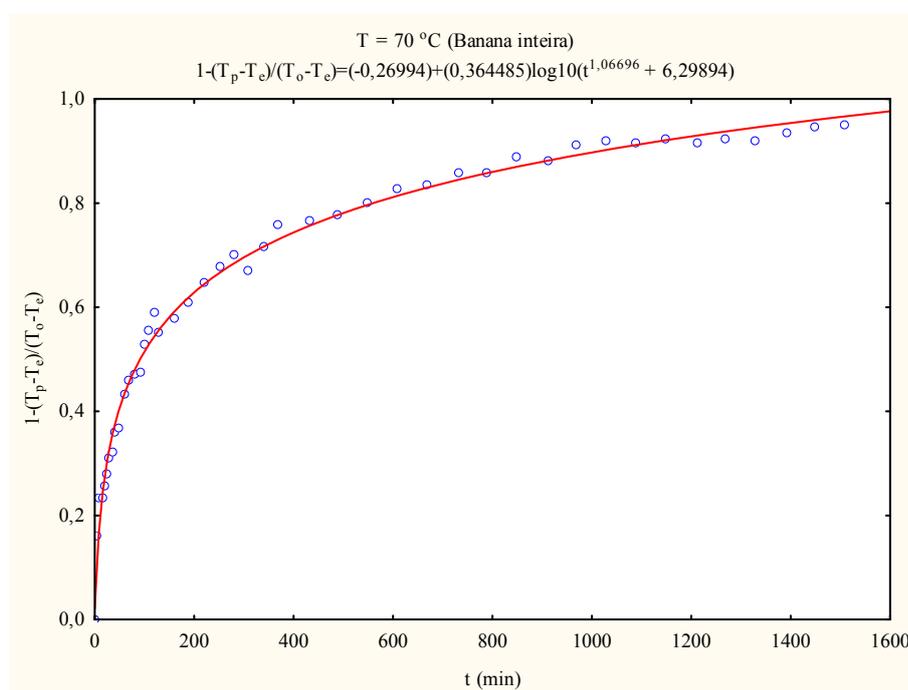


Figura 4.58 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana inteira, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

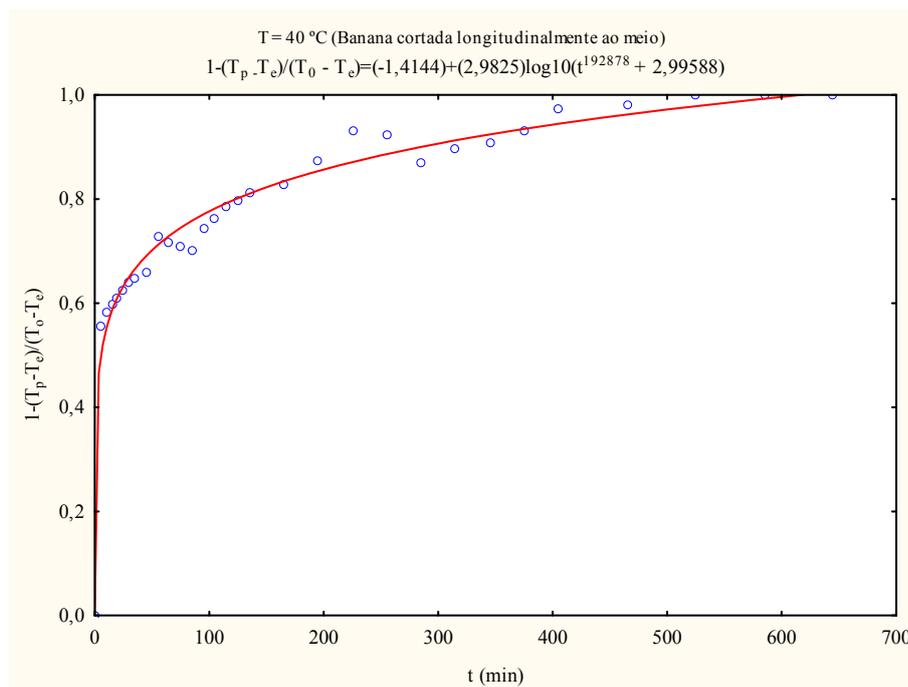


Figura 4.59 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C.

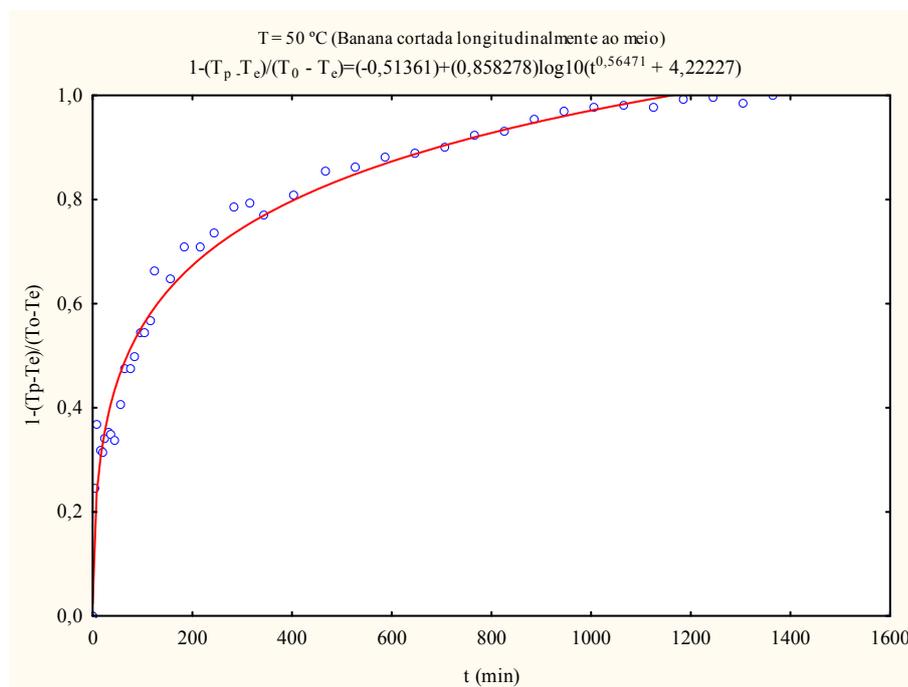


Figura 4.60 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

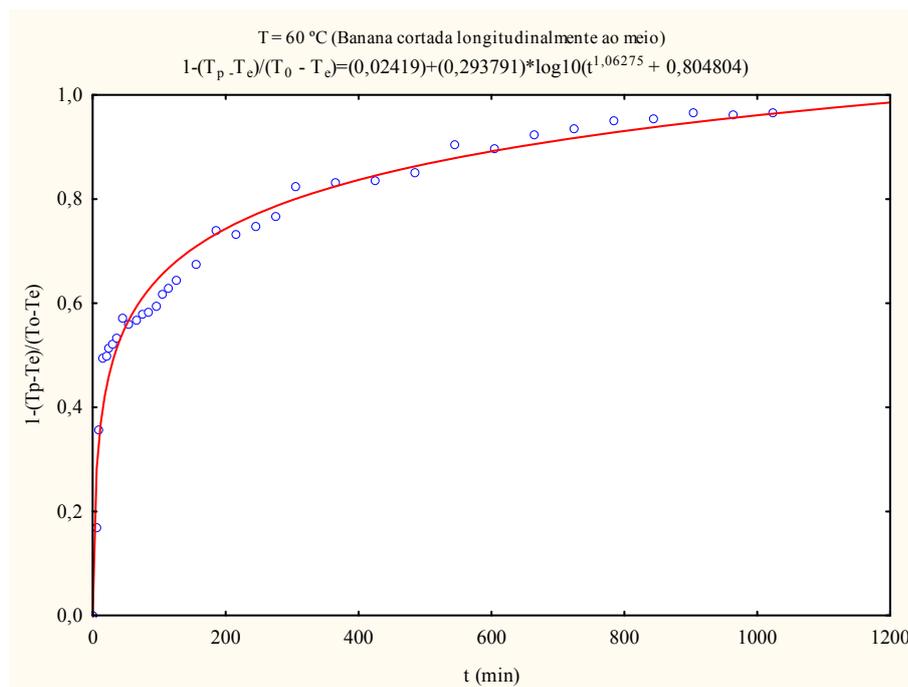


Figura 4.61 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

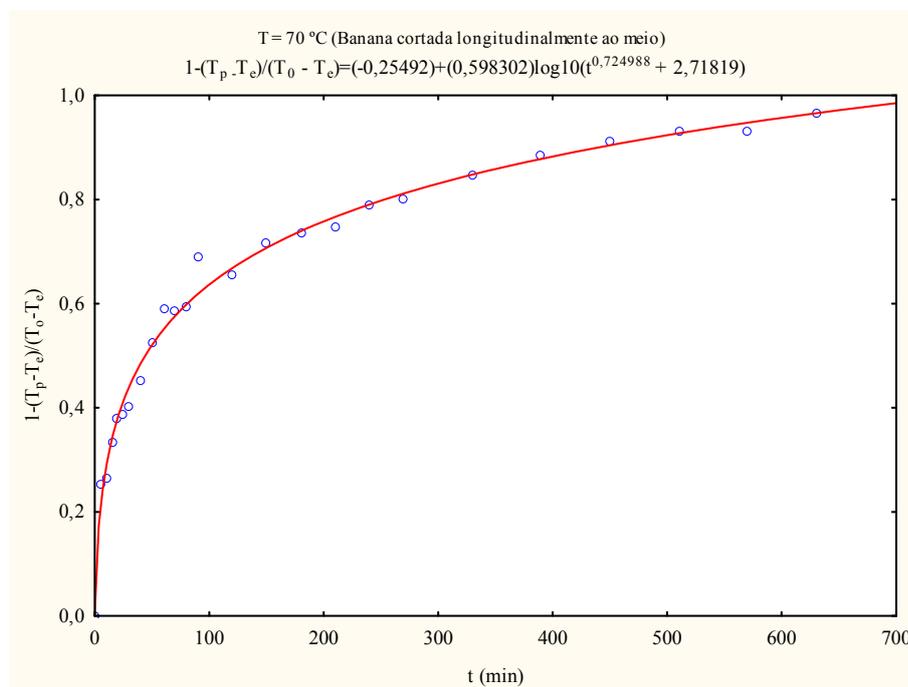


Figura 4.62 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada longitudinalmente, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

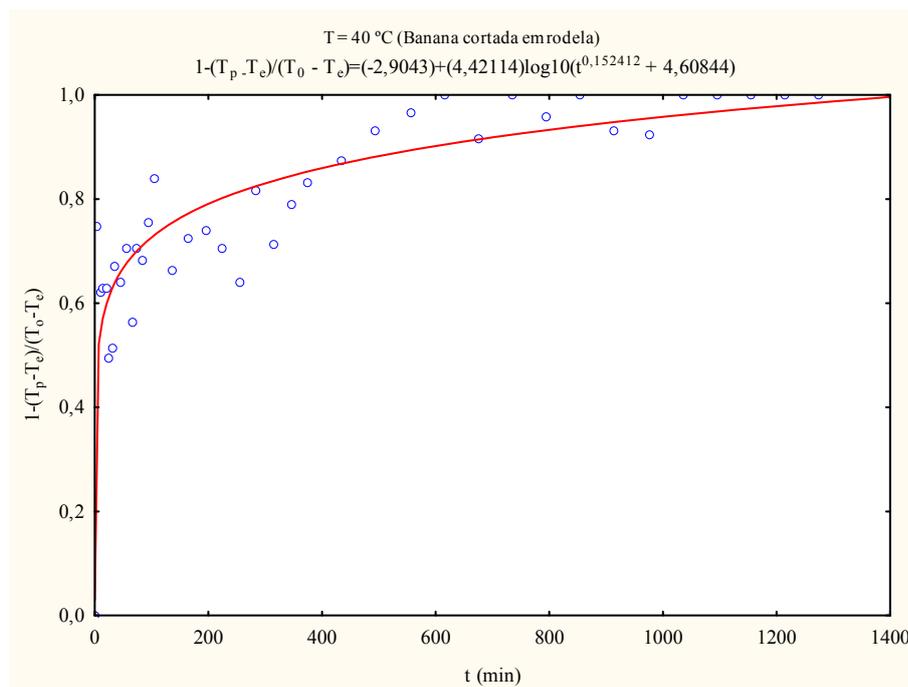


Figura 4.63 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 40°C.

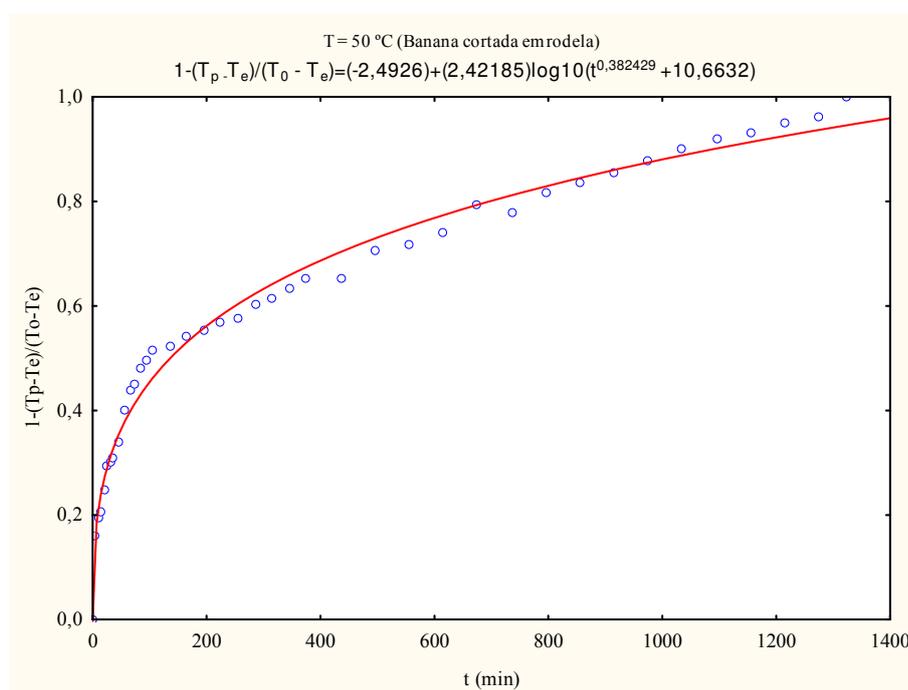


Figura 4.64 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

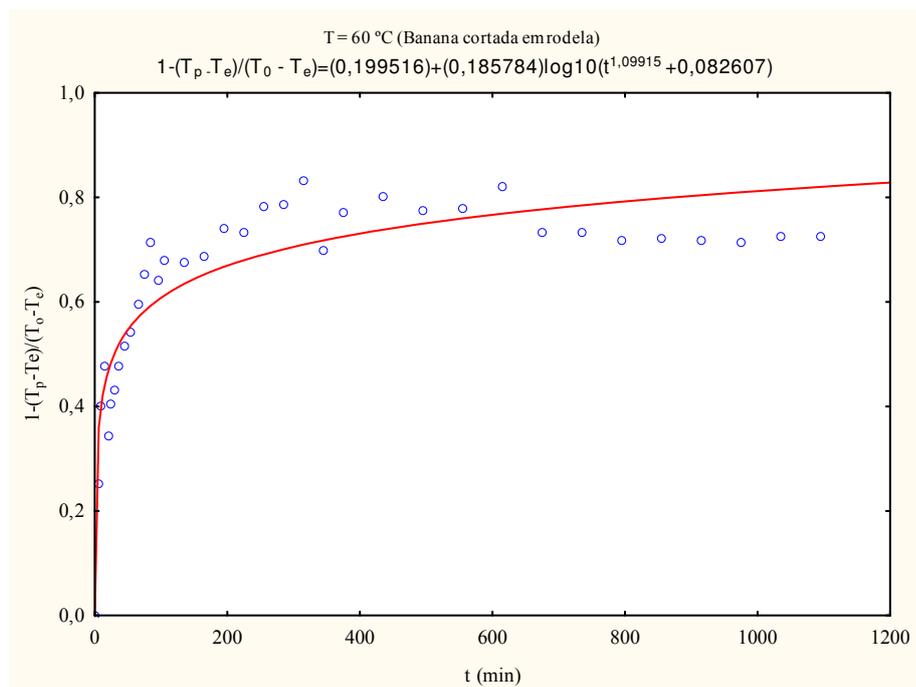


Figura 4.65 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

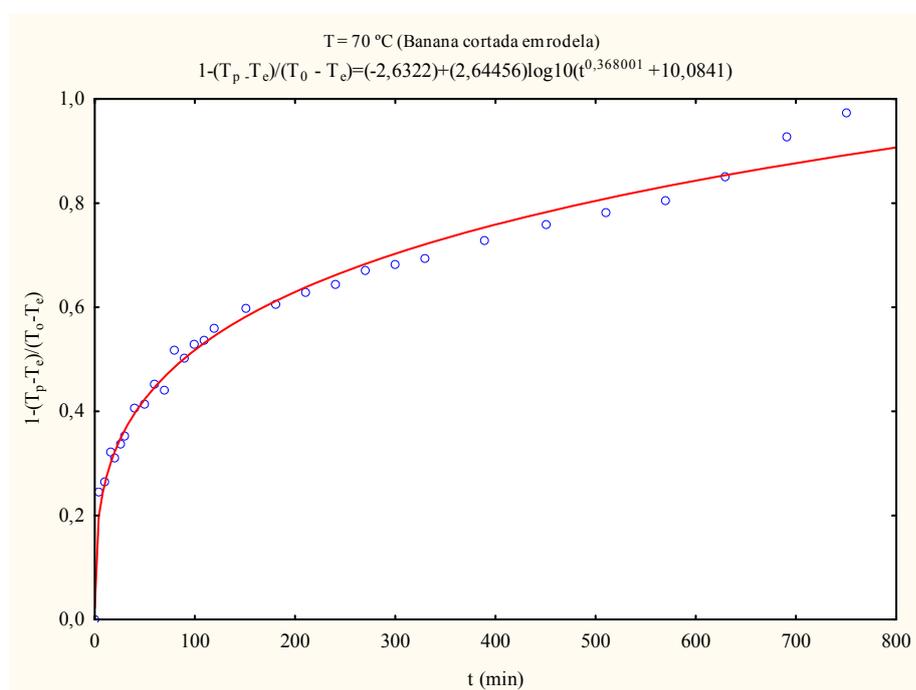


Figura 4.66 - Comparação entre as temperaturas na superfície da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

As Figuras 4.67 – 4.78 ilustram as curvas de ajuste da variação volumétrica versus teor de umidade em base seca. As Tabelas 4.13 a 4.15 apresentam os parâmetros da equação (3.14) onde se verifica que um bom ajuste foi obtido caracterizado por coeficientes de correlação próximos de 1,0.

Tabela 4.13 – Parâmetros da Equação (3.14) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana inteira

T (°C)	Parâmetro	R	Proporção da variância R ² (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	$\bar{\beta}_2$			
40	0,412683	0,98067	96,171	0,126891699
50	0,372281	0,83065	68,999	0,597055415
60	0,327661	0,94535	89,368	0,208851842
70	0,300195	0,98441	96,906	0,812330470

Tabela 4.14 – Parâmetros da Equação (3.14) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana inteira

T (°C)	Parâmetro	R	Proporção da Variância R ² (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	$\bar{\beta}_2$			
40	0,334924	0,98891	97,794	0,060536914
50	0,196130	0,97107	94,297	0,068090780
60	0,314111	0,99787	99,575	0,007497570
70	0,243372	0,94370	89,058	0,087679862

Tabela 4.15 – Parâmetros da Equação (3.14) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura superficial da banana inteira

T (°C)	Parâmetro	R	Proporção da Variância R ² (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	$\bar{\beta}_2$			
40	0,316187	0,96676	93,462	0,830685970
50	0,385461	0,97960	95,962	0,112538986
60	0,309656	0,92035	84,705	0,180772341
70	0,292444	0,98497	97,017	0,038917137

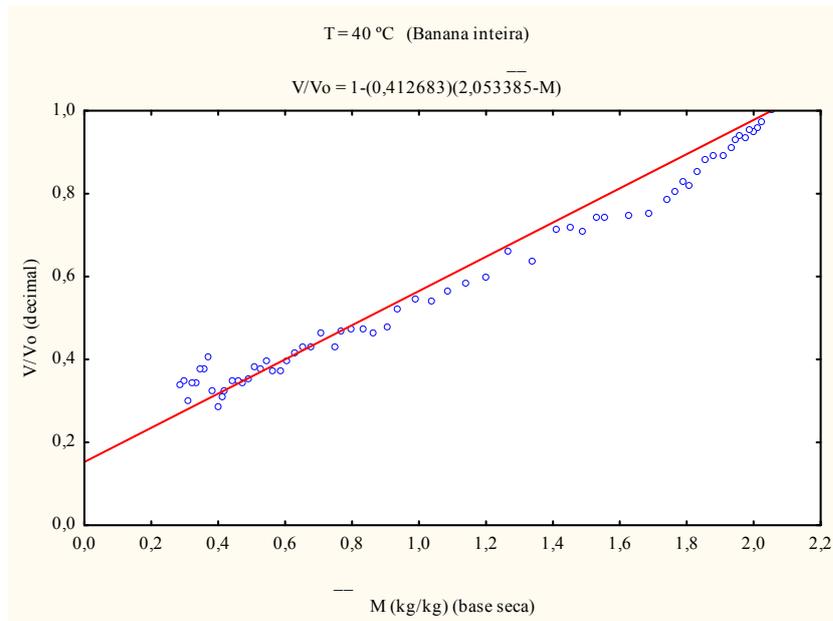


Figura 4.67 - Comparação entre o volume adimensional da banana inteira, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 40°C.

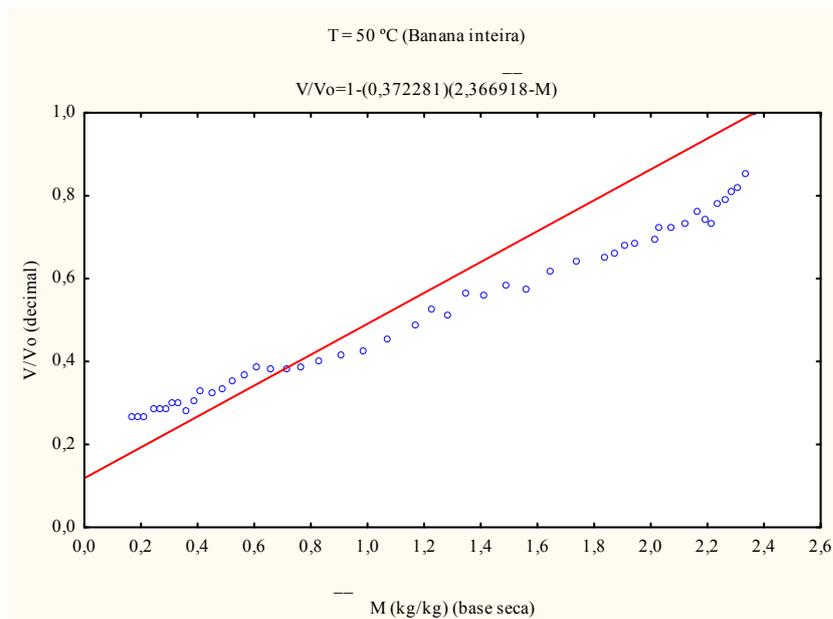


Figura 4.68 - Comparação entre o volume adimensional da banana inteira, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

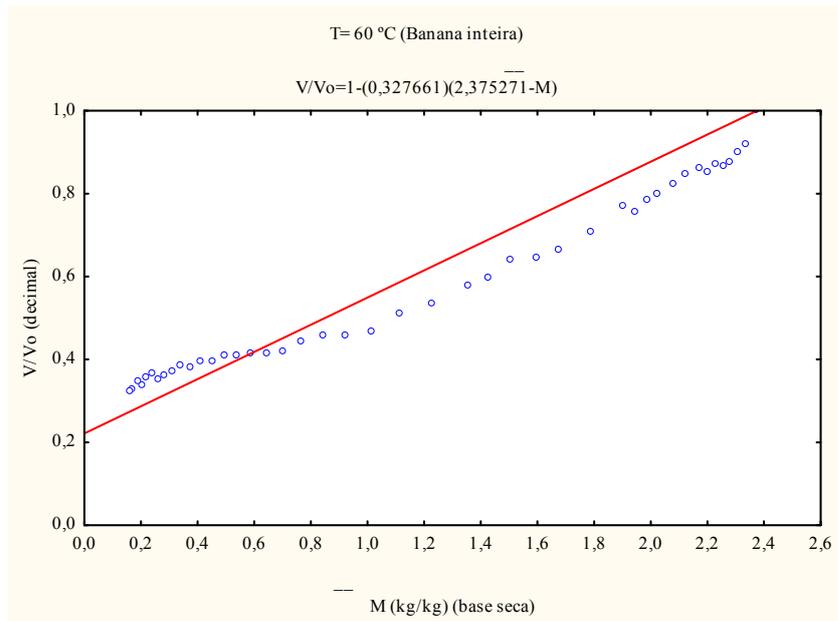


Figura 4.69 - Comparação entre o volume adimensional da banana inteira, experimental ($\circ\circ\circ$) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

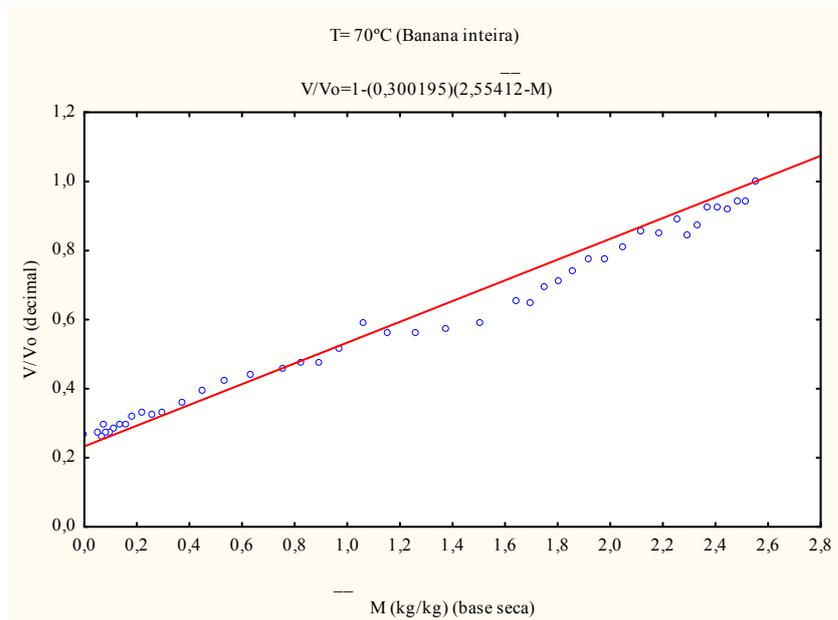


Figura 4.70 - Comparação entre o volume adimensional da banana inteira, experimental ($\circ\circ\circ$) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

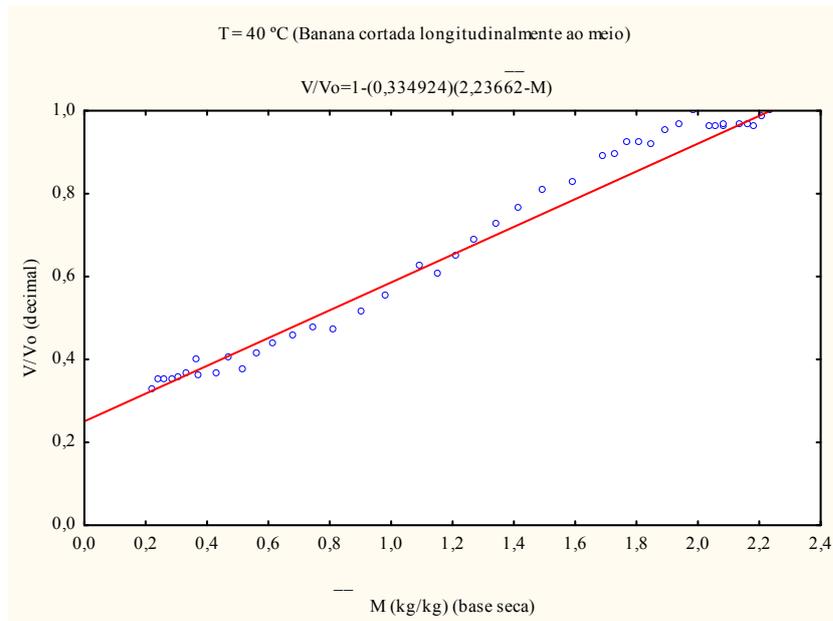


Figura 4.71 - Comparação entre o volume adimensional da banana cortada longitudinalmente ao meio, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 40°C.

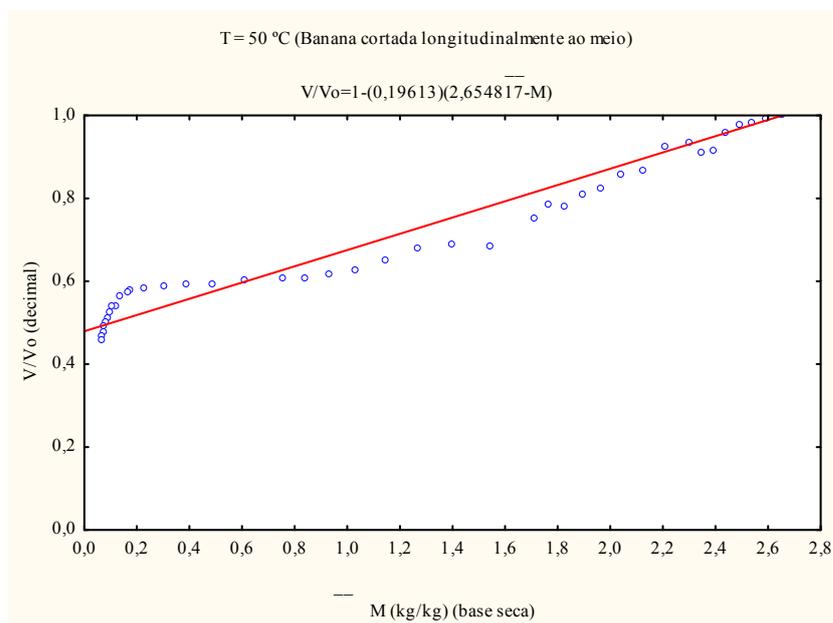


Figura 4.72 - Comparação entre o volume adimensional da banana cortada longitudinalmente ao meio, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

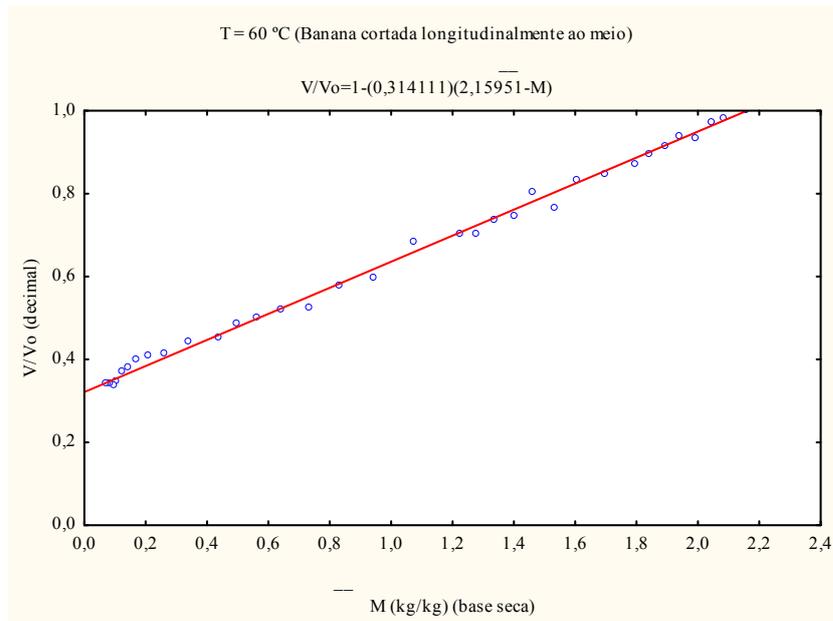


Figura 4.73 - Comparação entre o volume adimensional da banana cortada longitudinalmente ao meio, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

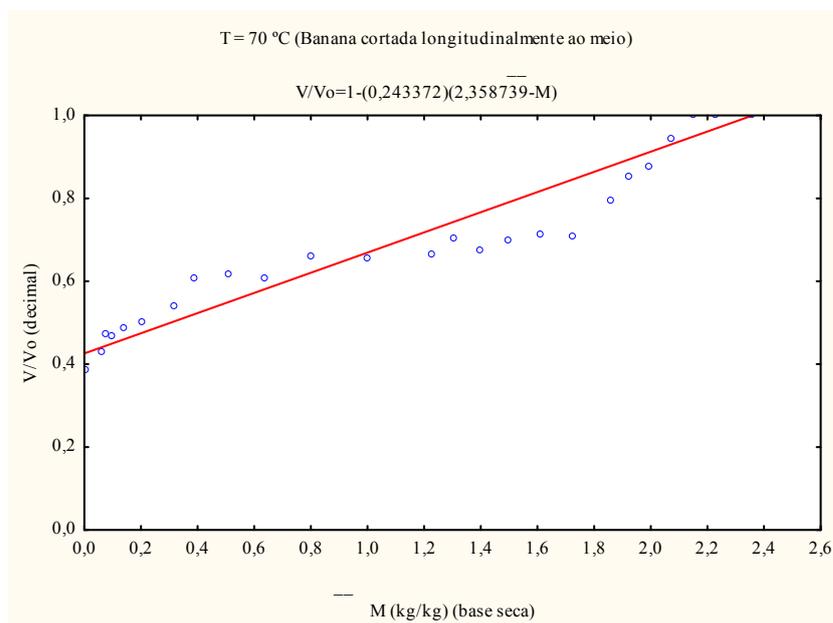


Figura 4.74 - Comparação entre o volume adimensional da banana cortada longitudinalmente ao meio, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

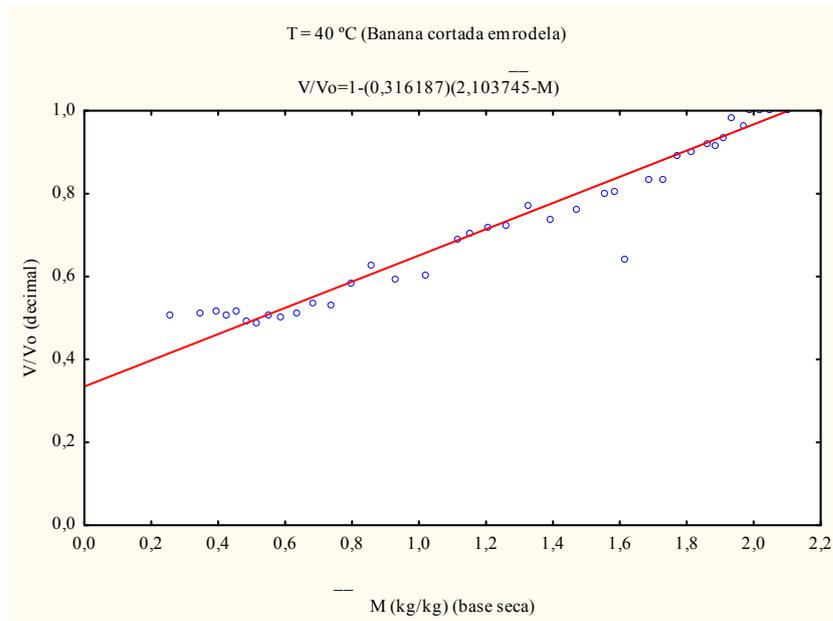


Figura 4.75 - Comparação entre o volume adimensional da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 40°C.

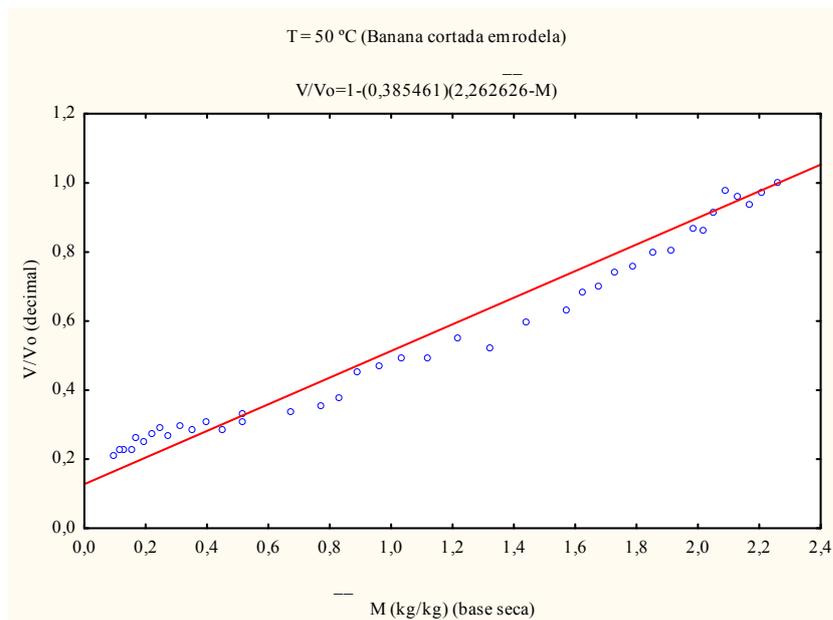


Figura 4.76 - Comparação entre o volume adimensional da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

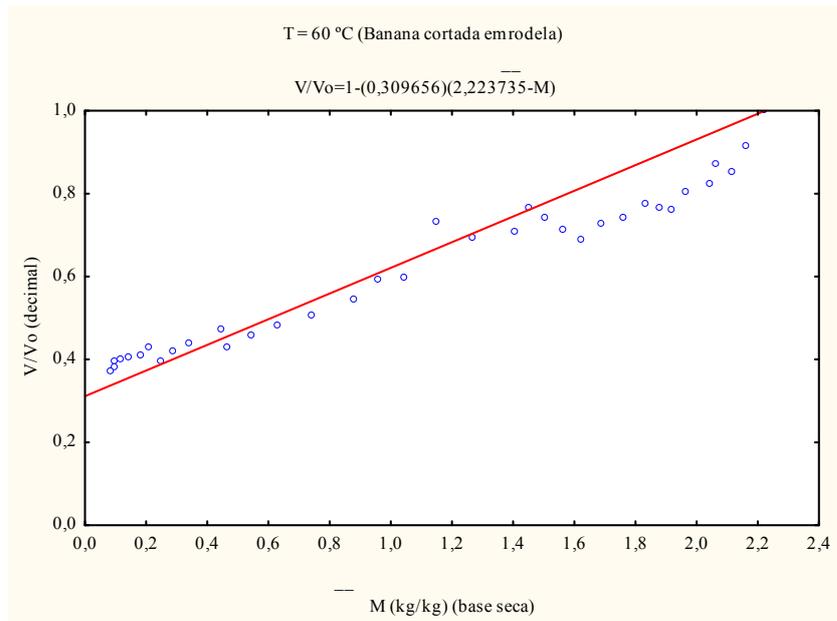


Figura 4.77 - Comparação entre o volume adimensional da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

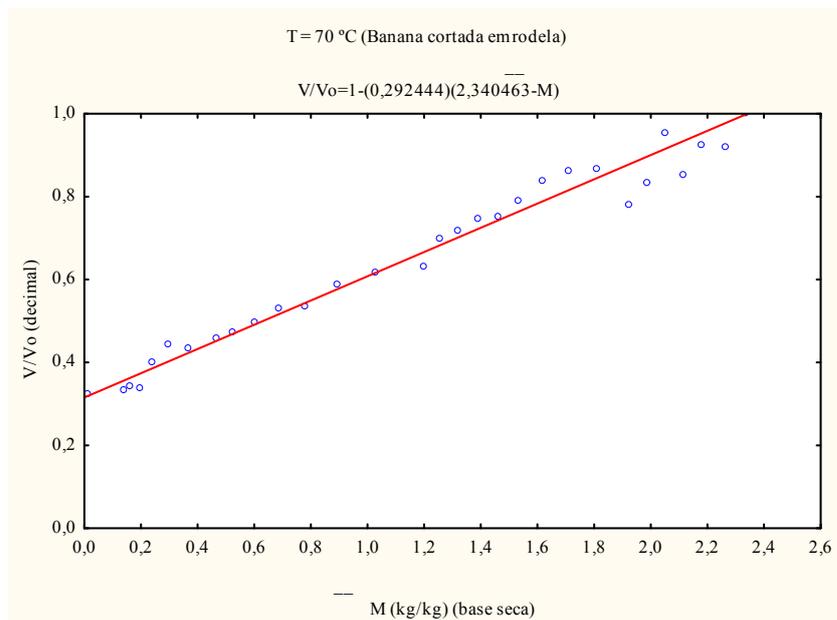


Figura 4.78 - Comparação entre o volume adimensional da banana cortada em rodela, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

Os modelos em nível de partícula baseados numa análise concentrada (gradientes de umidade e temperatura no interior do corpo desprezíveis) não podem dar clareza e precisão dos fundamentos da secagem, uma vez que não fornecem informações sobre a difusividade de

umidade no interior do material e o coeficiente de transferência de massa na superfície da mesma.

De acordo com Karim e Hawhader. (2005), se o modelo é muito simples desvia-se significativamente do processo real, por outro lado, se ele é muito complexo, as aplicações práticas são restritas. Assim, é essencial desenvolver modelos relativamente simples mas também que sejam significativamente precisos para predizer o processo adequadamente. Os modelos empíricos propostos tem essa característica de predizer acuradamente as variações de temperatura, umidade e volume durante a secagem.

A Tabela 4.16 sumariza o coeficiente de encolhimento adimensional da banana para todos os experimentos realizados.

Talla et al. (2004) reportam sobre um coeficientes de encolhimento dimensional de 0,171; 0,223 e 0,258, para teores de umidade de 5,06; 3,93 e 3,16 kg/kg (em base seca), respectivamente para secagem a 40°C, de banana cortada em rodela com espessura de 6mm e diâmetro de 25mm. Estes mesmos autores fornecem os coeficientes de encolhimento dimensional de 0,192 e 0,215 nos teores de umidade inicial de 4,50 e 3,93 kg/kg (base seca), para secagem a 50 e 60°C, respectivamente.

Tabela 4.16 - Coeficiente de encolhimento adimensional da banana

T (°C)	$\bar{\beta} = \bar{\beta}_2(\bar{M}_o - \bar{M}_e)$		
	Banana inteira	Banana cortada longitudinalmente ao meio	Banana cortada em rodela
40	0,7879	0,7240	0,6278
50	0,8561	0,5143	0,8721
60	0,7634	0,6722	0,6638
70	0,7667	0,5740	0,6845

Lima (1999) e Lima et al. (2002) estudando secagem de banana inteira numericamente fornece em seu trabalho coeficiente de encolhimento adimensional (definidos conforme esta pesquisa) variando de 0,8345 a 0,7899, quando a temperatura do ar de secagem variam de 39,9 a 68,4°C, respectivamente, valores estes muito próximos dos obtidos neste trabalho (Tabela 4.16).

Lima (1999) em seu trabalho reporta um valor de $\bar{\beta}_2$ igual a 0,269 para o coeficiente de encolhimento dimensional da banana inteira secada a 70°C, valor este muito próximo do valor reportado na Tabela 4.13.

Como comentário final, pode ser dito que apesar do bom ajuste apresentado por este modelo, quando aplicado à banana, é necessário dar maior atenção ao estudo quantitativo das variações de área superficial e volume durante o processo de desidratação, especialmente com considerações mais complexas. Dentro destas considerações citam-se: deformações em várias direções e condições não-isotérmicas simultâneas. Deformações multidirecionais ocorrem por exemplo, na secagem para obtenção de uva-passa, onde no final da secagem o produto apresenta-se com uma textura totalmente enrugada, ao contrário do que este modelo assume.

4.3 Difusão para o transporte de água

A difusividade efetiva D e o coeficiente de transferência convectiva de massa h foram determinados por otimização, conforme a modelagem matemática detalhada nas Seções 3.5 e 3.6 Capítulo 3. A determinação destes parâmetros foi feita para cada geometria previamente definida, e para cada temperatura estipulada. O software denominado *Convective Adsorption and Desorption*, disponibilizado por Silva e Silva (2011) foi utilizado para determinar D e h . Uma vez determinados tais parâmetros, a simulação da cinética de secagem é apresentada para cada caso. Além disto, são apresentadas figuras e gráficos da distribuição de umidade no interior da banana, para cada caso estudado.

4.3.1 Cilindro infinito: bananas inteiras

Para bananas inteiras, representadas por um cilindro infinito, a distribuição radial de umidade em um tempo previamente estipulado, para cada temperatura do ar de secagem, é feita numa seção circular do cilindro, como é mostrado na Figura 4.79. Para esta geometria, um gráfico do teor de umidade adimensional em função da posição radial r é, também, apresentado.

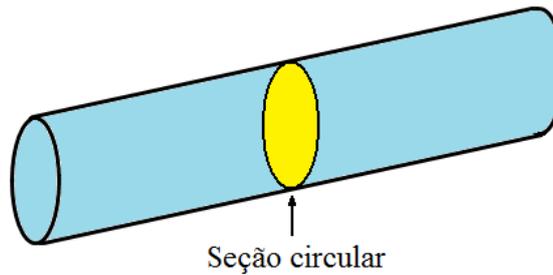


Figura 4.79 – Cilindro infinito de raio R destacando a seção circular onde a distribuição de umidade para cada temperatura é investigada.

O processo de otimização foi realizado pelo acoplamento da Equação (3.46) ao otimizador apresentado no item 3.2.2.4 do Capítulo 3. Uma vez que os parâmetros de secagem tenham sido calculados, a Equação (3.44) pode ser usada para determinar a distribuição espacial de umidade numa seção circular do cilindro infinito. Os resultados referentes à secagem de bananas inteiras, para todas as temperaturas estipuladas para o ar de secagem, são apresentados a seguir.

a) Temperatura do ar de secagem a 40°C

Para a temperatura de 40°C, após o processo de otimização realizado para os dados experimentais disponíveis, foram obtidos os resultados sumarizados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Resultados do processo de otimização para bananas inteiras, secas a 40°C.

Parâmetro	Valor
h (m s ⁻¹)	$3,2392 \times 10^{-7}$
D (m ² s ⁻¹)	$7,7610 \times 10^{-10}$
R^2	0,9990
χ^2	$6,7511 \times 10^{-3}$

Para os parâmetros obtidos na Tabela 4.17, a simulação da cinética de secagem é apresentada através da Figura 4.80.

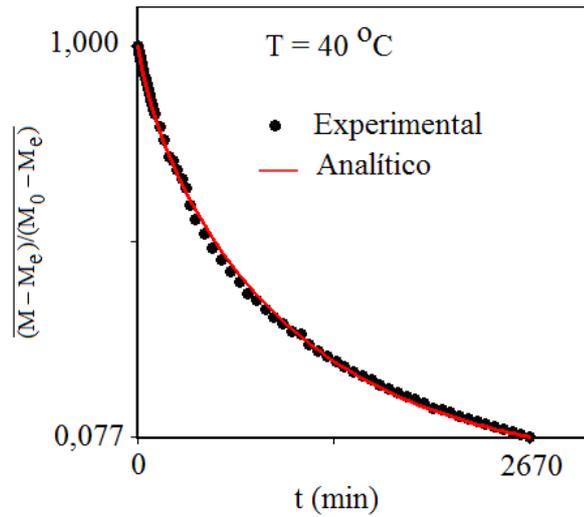


Figura 4.80 – Cinética de secagem de bananas inteiras para $T = 40^{\circ}\text{C}$.

A distribuição de umidade no interior do cilindro infinito que representa a banana inteira, por exemplo, para $t = 270$ min (aproximadamente 10% do tempo total de secagem na temperatura de 40°C) pode ser observada na Figura 4.81.

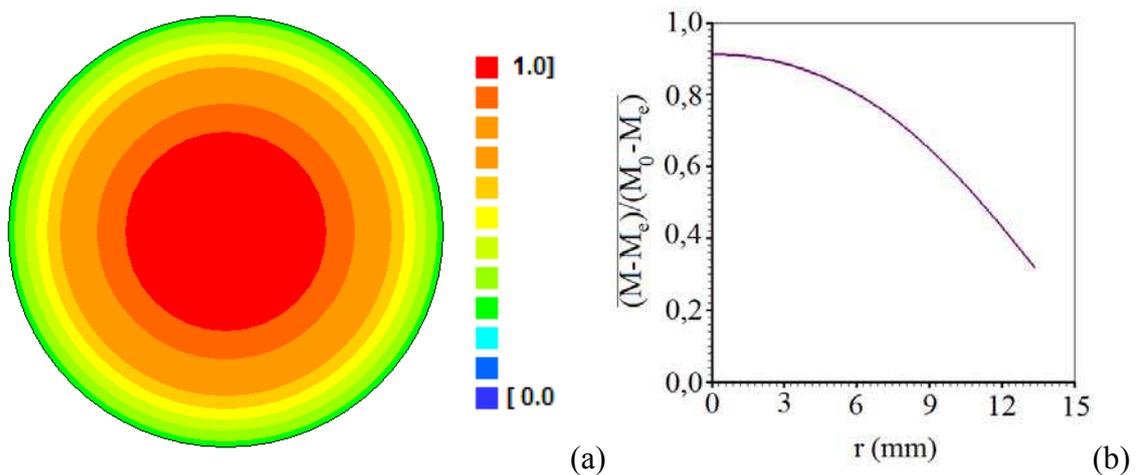


Figura 4.81 – Banana inteira, em $t = 270$ min, para $T = 40^{\circ}\text{C}$: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição radial.

b) Temperatura do ar de secagem a 50°C

Para a temperatura de 50°C, foram obtidos, por otimização, os resultados sumarizados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Resultados do processo de otimização para bananas inteiras, secas a 50°C.

Parâmetro	Valor
h (m s ⁻¹)	$3,3915 \times 10^{-7}$
D (m ² s ⁻¹)	$12,5177 \times 10^{-10}$
R^2	0,9996
χ^2	$2,4752 \times 10^{-3}$

Para os resultados obtidos na Tabela 4.18, a simulação da cinética de secagem para 50°C é apresentada através da Figura 4.82.

A distribuição de umidade no interior do cilindro infinito que representa a banana em $t = 270$ min pode ser observada através da Figura 4.83.

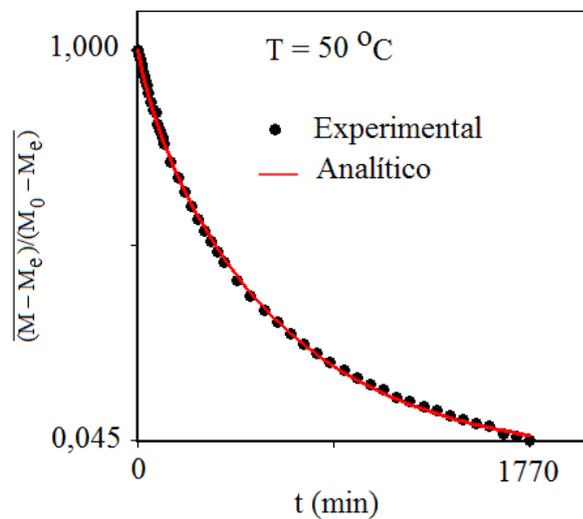


Figura 4.82 – Cinética de secagem de bananas inteiras para $T = 50^\circ\text{C}$.

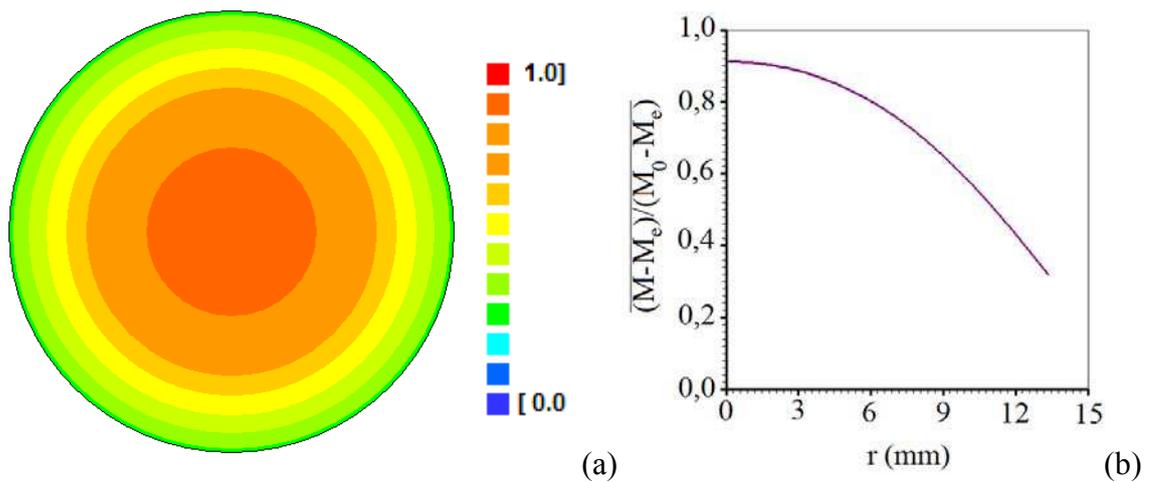


Figura 4.83 – Banana inteira em $t = 270$ min, para $T = 50^{\circ}\text{C}$: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição radial.

c) Temperatura do ar de secagem a 60°C

Para a temperatura de 60°C , foram obtidos os resultados sumarizados na Tabela 4.19. Com os resultados apresentados na Tabela 4.19, a simulação da cinética de secagem para 60°C é apresentada através da Figura 4.84.

Tabela 4.19 – Resultados do processo de otimização para bananas inteiras secas a 60°C .

Parâmetro	Valor
h (m s^{-1})	$7,2737 \times 10^{-7}$
D ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	$25,3932 \times 10^{-10}$
R^2	0,9924
χ^2	$4,1636 \times 10^{-2}$

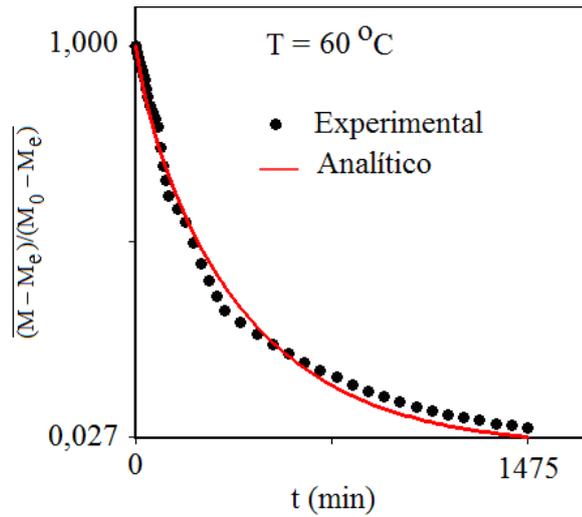


Figura 4.84 – Cinética de secagem de bananas inteiras para $T = 60^{\circ}\text{C}$.

Assim, a distribuição de umidade no interior do cilindro infinito em $t = 270$ min pode ser observada através da Figura 4.85.

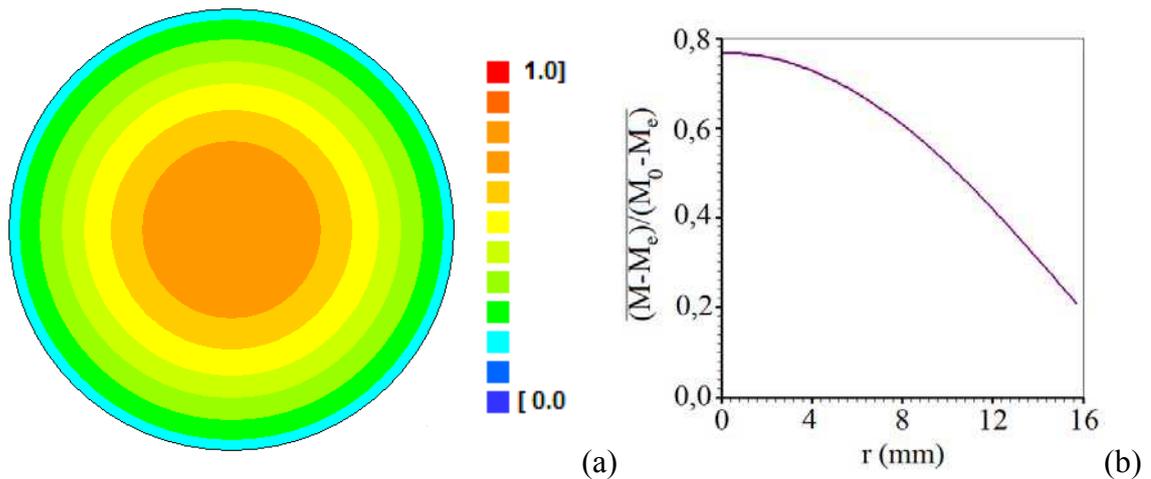


Figura 4.85 – Banana inteira em $t = 270$ min, para $T = 60^{\circ}\text{C}$: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição radial.

d) Temperatura do ar de secagem a 70°C

Para a temperatura de 70°C , após o processo de otimização realizado para os dados experimentais disponíveis nesta temperatura, foram obtidos os resultados sumarizados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Resultados do processo de otimização para bananas inteiras secas a 70°C.

Parâmetro	Valor
h (m s ⁻¹)	$4,9995 \times 10^{-7}$
D (m ² s ⁻¹)	$28,3947 \times 10^{-10}$
R^2	0,9992
χ^2	$4,4599 \times 10^{-3}$

Para os parâmetros obtidos na Tabela 4.20, a simulação da cinética de secagem é apresentada através da Figura 4.86.

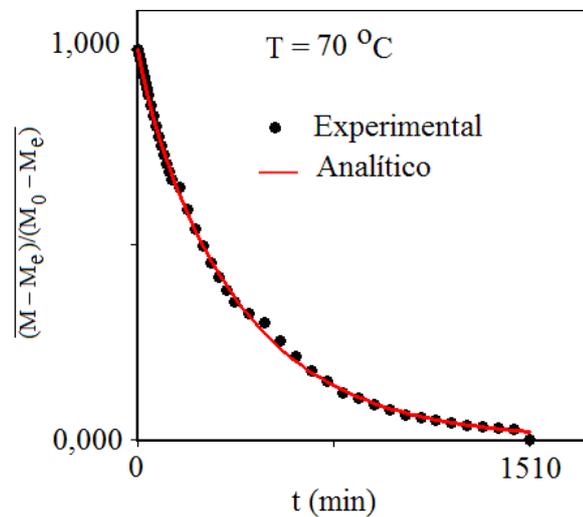


Figura 4.86 – Cinética de secagem de bananas inteiras para $T = 70^\circ\text{C}$.

Para a temperatura do ar de secagem igual a 70°C, a distribuição de umidade no interior do cilindro infinito em $t = 270$ min pode ser observada através da Figura 4.87.

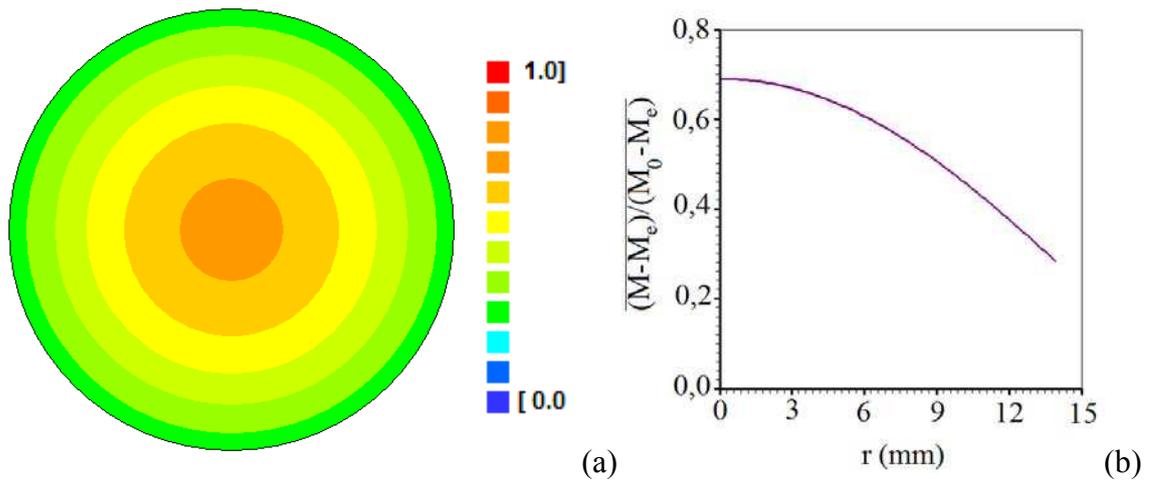


Figura 4.87 – Banana inteira em $t = 270$ min, para $T = 70^{\circ}\text{C}$: (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição radial.

Diante do que foi observado nas Figuras 4.81 a 4.105 (neste intervalo, observar as Figuras de números ímpares), fica evidente que para a temperatura de 70°C , encontramos os menores gradientes de umidade, o que favorece a trinca e deformação no produto, comprometendo sua qualidade.

4.3.2 Parede infinita: bananas cortadas longitudinalmente

Para bananas cortadas no sentido longitudinal, representadas por uma parede infinita equivalente as fatias de banana de espessura L_1 , a distribuição de umidade ao longo de x em um determinado instante, para cada temperatura do ar de secagem, é feita como é mostrado na Figura 4.88. Para esta geometria, um gráfico do teor de umidade adimensional em função da posição x é, também, apresentado.

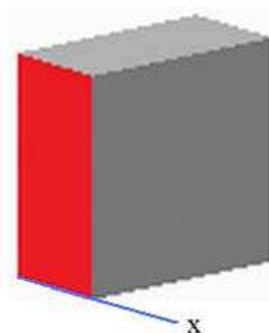


Figura 4.88 – Parede infinita de espessura L_1 onde a distribuição de umidade para cada temperatura é investigada.

Para esta geometria, o processo de otimização foi realizado pelo acoplamento da Equação (3.40) ao otimizador apresentado no ítem 3. Uma vez que os parâmetros de secagem tenham sido calculados, a Equação (3.35) pode ser usada para determinar a distribuição espacial de umidade ao longo da espessura da parede infinita. A espessura L_1 da parede infinita equivalente às fatias de banana foram calculadas através da expressão $L_1 = V / (LD)$, em que o volume V , o comprimento L e o diâmetro D das bananas são dados na Tabela 3.2. Os resultados referentes à secagem de bananas cortadas longitudinalmente, para todas as temperaturas estipuladas para o ar de secagem, são apresentados a seguir.

a) Temperatura do ar de secagem a 40°C

Para a temperatura de 40 °C, a espessura da parede infinita equivalente é $6,634 \times 10^{-3}$ m. Após o processo de otimização realizado com os dados experimentais disponíveis, foram obtidos os resultados sumarizados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21.– Resultados do processo de otimização para bananas cortadas longitudinalmente, secas em 40 °C.

Parâmetro	Valor
h (m s ⁻¹)	$2,0378 \times 10^{-7}$
D (m ² s ⁻¹)	$3,2188 \times 10^{-10}$
R^2	0,9983
χ^2	$8,2800 \times 10^{-3}$

Para os parâmetros obtidos na Tabela 4.21, a simulação da cinética de secagem é apresentada através da Figura 4.89.

A distribuição de umidade no interior da parede infinita que representa a banana cortada longitudinalmente, por exemplo, para $t = 100$ min pode ser observada na Figura 4.90.

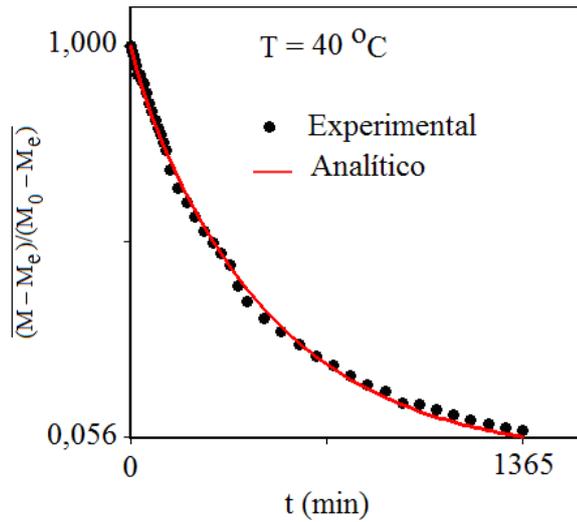


Figura 4.89 – Cinética de secagem de bananas cortadas em fatias longitudinais para $T = 40$ °C.

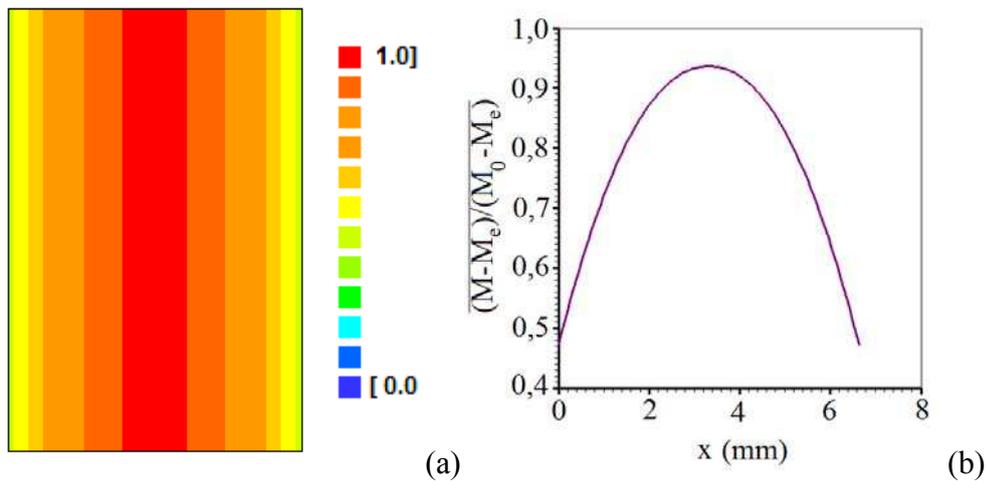


Figura 4.90 – Banana em fatias longitudinais em $t = 100$ min, para $T = 40$ °C:
 (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição x .

b) Temperatura do ar de secagem a 50°C

Para a temperatura de 50°C, a espessura da parede infinita equivalente é $6,134 \times 10^{-3}$ m. Após o processo de otimização, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Resultados do processo de otimização para bananas cortadas longitudinalmente, secas a 50°C.

Parâmetro	Valor
h (m s ⁻¹)	$2,8237 \times 10^{-7}$
D (m ² s ⁻¹)	$6,7923 \times 10^{-10}$
R^2	0,9994
χ^2	$3,2017 \times 10^{-3}$

Para os parâmetros obtidos na Tabela 4.22, a simulação da cinética de secagem é apresentada através da Figura 4.91.

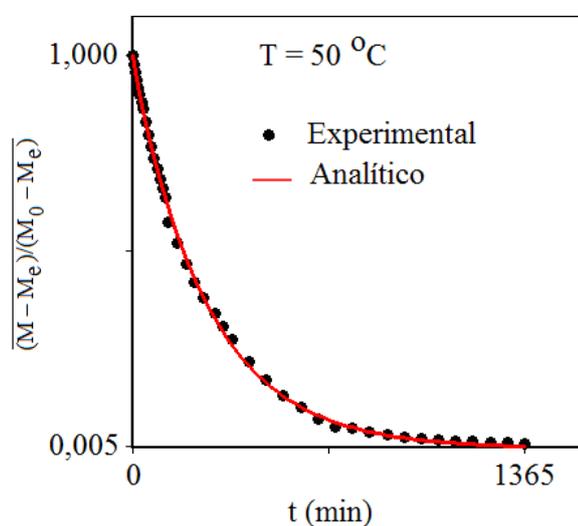


Figura 4.91 – Cinética de secagem de bananas cortadas em fatias longitudinais para $T = 50^\circ\text{C}$.

A distribuição de umidade no interior da parede infinita que representa a banana cortada longitudinalmente, em $t = 100$ min, pode ser observada na Figura 4.92.

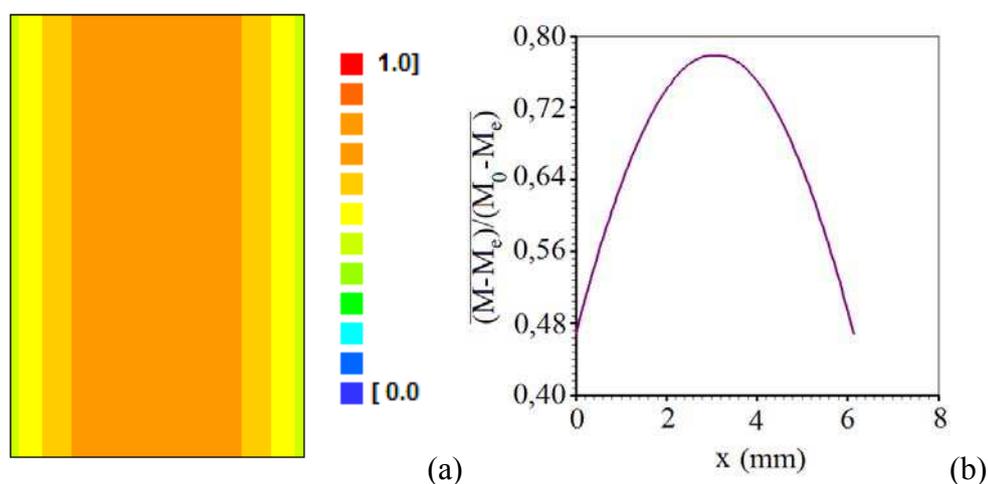


Figura 4.92 – Banana em fatias longitudinais em $t = 100$ min, para $T = 50^\circ\text{C}$:
 (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição x .

c) Temperatura do ar de secagem a 60°C

A espessura da parede infinita equivalente é $7,121 \times 10^{-3}$ m, para o experimento realizado na temperatura de 60°C . Após o processo de otimização, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Resultados do processo de otimização para bananas cortadas longitudinalmente, secas a 60°C .

Parâmetro	Valor
h (m s^{-1})	$4,9525 \times 10^{-7}$
D ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	$8,3968 \times 10^{-10}$
R^2	0,9984
χ^2	$7,9797 \times 10^{-3}$

A simulação da cinética de secagem referente aos parâmetros obtidos na Tabela 4.23 é apresentada através da Figura 4.93.

A distribuição de umidade em $t = 100$ min pode ser observada na Figura 4.94.

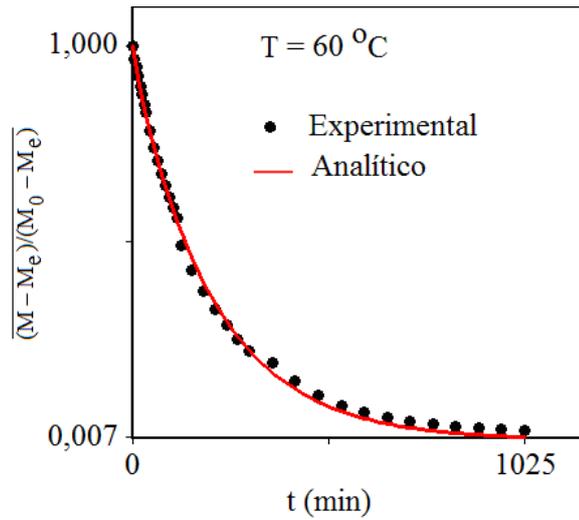


Figura 4.93 – Cinética de secagem de bananas cortadas em fatias longitudinais para $T = 60^{\circ}\text{C}$.

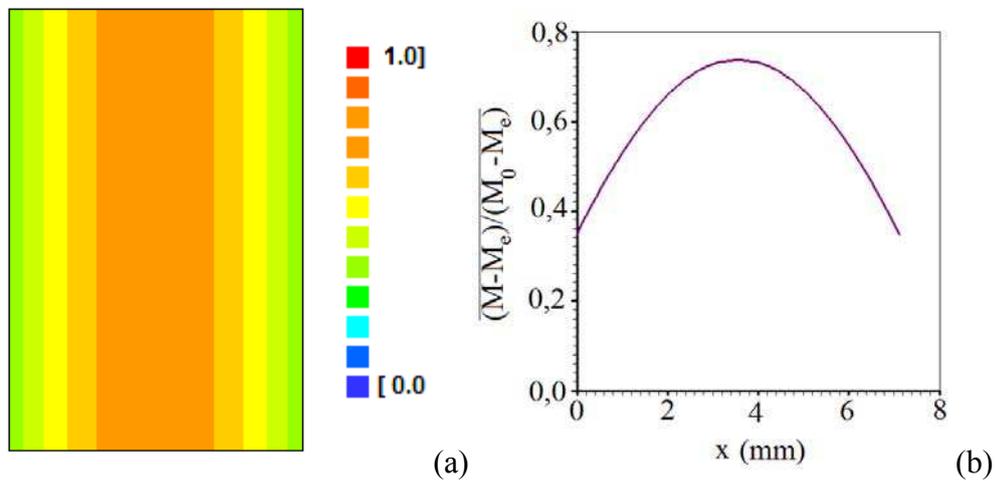


Figura 4.94 – Banana em fatias longitudinais em $t = 100$ min, para $T = 60^{\circ}\text{C}$:
 (a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus posição x .

d) Temperatura do ar de secagem a 70°C

Para o experimento realizado na temperatura de 70°C , a espessura da parede infinita equivalente às fatias de banana é $5,660 \times 10^{-3}$ m. Após o processo de otimização, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.24.

A simulação da cinética de secagem referente aos parâmetros obtidos na Tabela 4.24 é apresentada através da Figura 4.95. A distribuição de umidade em $t = 100$ min é dada através da Figura 4.96, para a temperatura de 70°C .

Tabela 4.24 – Resultados do processo de otimização para bananas cortadas longitudinalmente, secas a 70°C.

Parâmetro	Valor
h (m s ⁻¹)	$5,1843 \times 10^{-7}$
D (m ² s ⁻¹)	$9,7810 \times 10^{-10}$
R^2	0,9997
χ^2	$7,6010 \times 10^{-4}$

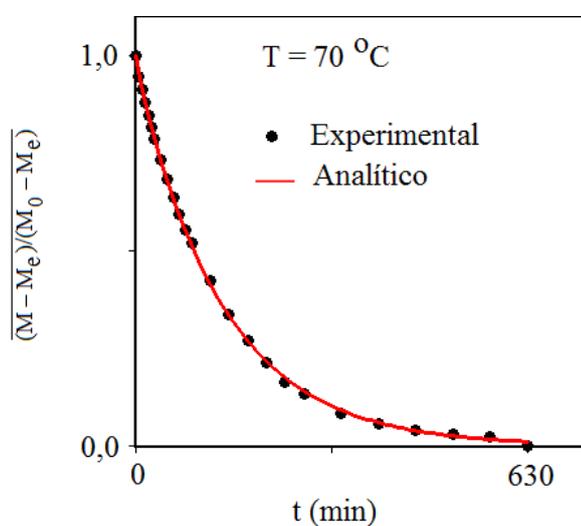


Figura 4.95 – Cinética de secagem de bananas cortadas em fatias longitudinais para $T = 70^\circ\text{C}$.

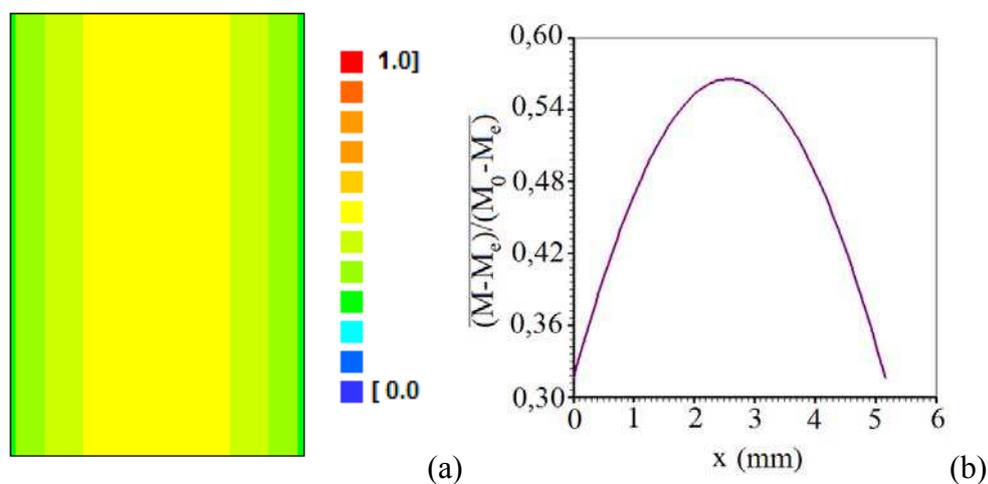


Figura 4.96 – Banana em fatias longitudinais em $t = 100$ min, para $T = 70^\circ\text{C}$:

(a) Distribuição de umidade; (b) Teor de umidade adimensional versus x .

4.3.3 Cilindro finito: bananas cortadas em rodelas

Para bananas em rodelas, representadas por um cilindro finito, a distribuição de umidade em um determinado instante, para cada temperatura do ar de secagem, é feita numa seção retangular do cilindro, como é destacado na Figura 4.97. Neste trabalho, tais distribuições são apresentadas em quatro instantes de tempo distintos.

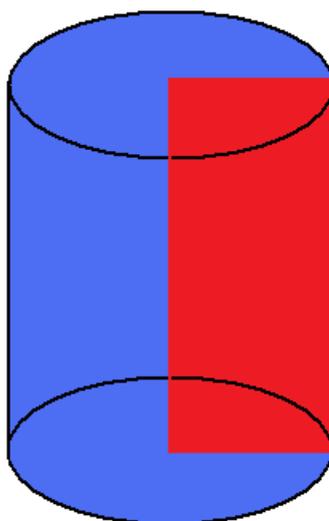


Figura 4.97 – Cilindro finito destacando a seção retangular de lados R e L onde a distribuição de umidade para cada temperatura é investigada.

O processo de otimização foi realizado pelo acoplamento da Equação (3.55) ao otimizador apresentado no Capítulo 3. Uma vez que os parâmetros de secagem tenham sido calculados, a Equação (3.54) pode ser usada para determinar a distribuição espacial de umidade numa seção retangular do cilindro finito, como a seção apresentada na figura anterior. Os resultados referentes à secagem de bananas em rodelas, para todas as temperaturas estipuladas para o ar de secagem, são apresentados a seguir.

a) Temperatura do ar de secagem a 40°C

Para a temperatura de 40°C, após o processo de otimização realizado para os dados experimentais disponíveis, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Resultados para bananas cortadas em rodela a 40°C.

Parâmetro	Valor
h (m s ⁻¹)	$2,6715 \times 10^{-7}$
D (m ² s ⁻¹)	$5,3820 \times 10^{-10}$
R^2	0,9988
χ^2	$4,3002 \times 10^{-3}$

Para os parâmetros obtidos na Tabela 4.25, a simulação da cinética de secagem é apresentada através da Figura 4.98.

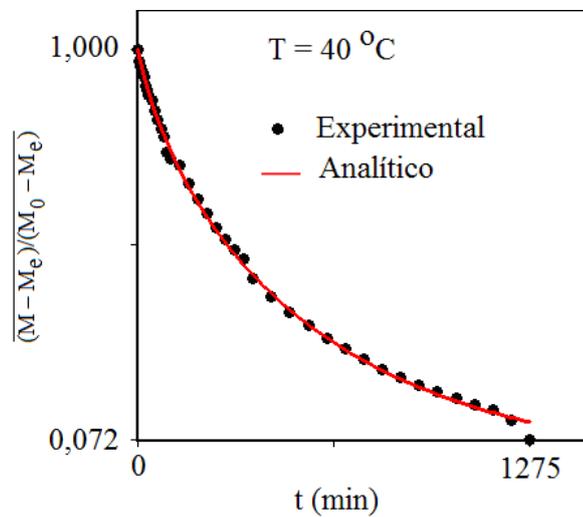


Figura 4.98 – Cinética de secagem de bananas em rodela para T = 40°C.

A distribuição de umidade em quatro instantes de tempo distintos (35, 50, 70 e 130 minutos) pode ser observada através da Figura 4.99.

b) Temperatura do ar de secagem a 50°C

Após o processo de otimização para a temperatura de 50°C, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.26.

Para os parâmetros obtidos na Tabela 4.26, a simulação da cinética de secagem é apresentada através da Figura 4.100.

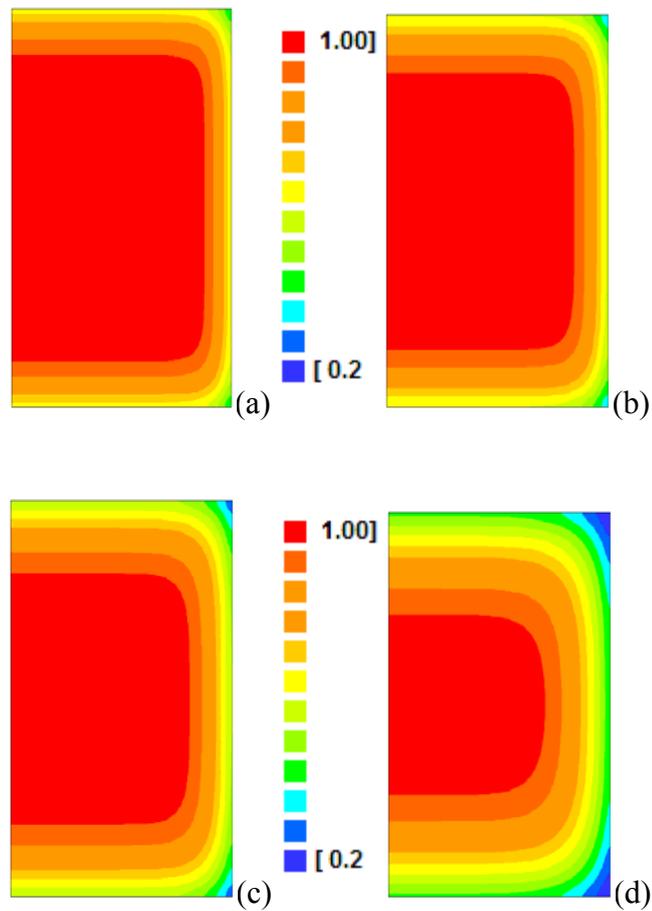


Figura 4.99 – Gráficos de contorno de bananas em rodela para $T = 40^{\circ}\text{C}$ nos instantes:
 (a) 35 min; (b) 50 min; (c) 70 min e (d) 130 min.

Tabela 4.26 – Resultados para bananas cortadas rodela, secas a 50°C .

Parâmetro	Valor
$h \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	$3,2790 \times 10^{-7}$
$D \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$14,7192 \times 10^{-10}$
R^2	0,9997
χ^2	$1,5937 \times 10^{-3}$

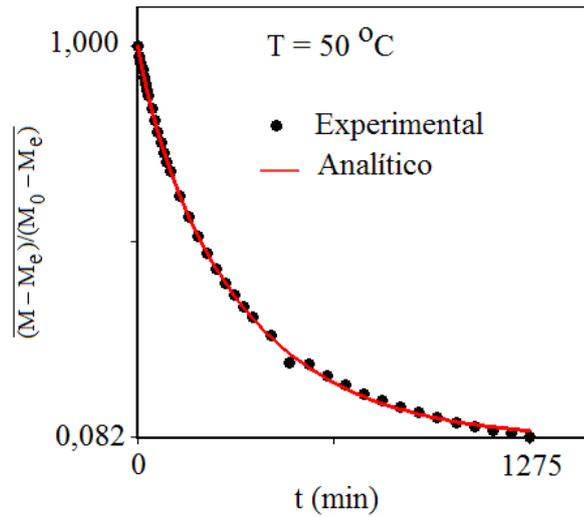


Figura 4.100 – Cinética de secagem de bananas cortadas em rodela para $T = 50^{\circ}\text{C}$.

A distribuição de umidade na seção retangular pode ser observada na Figura 4.101.

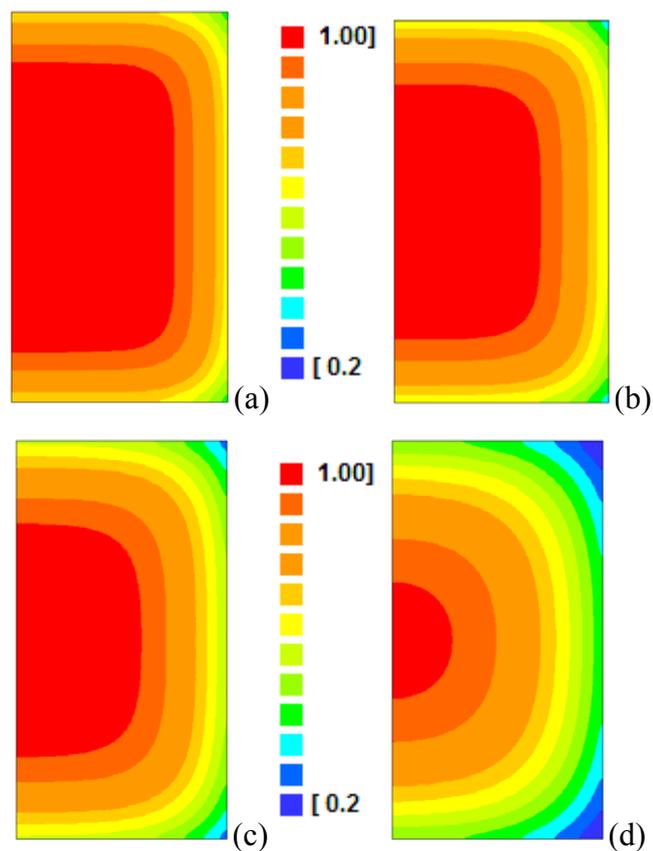


Figura 4.101 – Gráficos de contornos de bananas cortadas em rodela para $T = 50^{\circ}\text{C}$ nos instantes: (a) 35 min; (b) 50 min; (c) 70 min e (d) 130 min.

c) Temperatura do ar de secagem a 60 °C

Para a temperatura de 60 °C, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 – Resultados do processo de otimização para bananas cortadas em rodela, secas a 60°C.

Parâmetro	Valor
h (m s ⁻¹)	$3,6818 \times 10^{-7}$
D (m ² s ⁻¹)	$30,3963 \times 10^{-10}$
R^2	0,9977
χ^2	$1,0540 \times 10^{-2}$

Para os parâmetros obtidos na Tabela 4.27, a simulação da cinética de secagem é apresentada através da Figura 4.102.

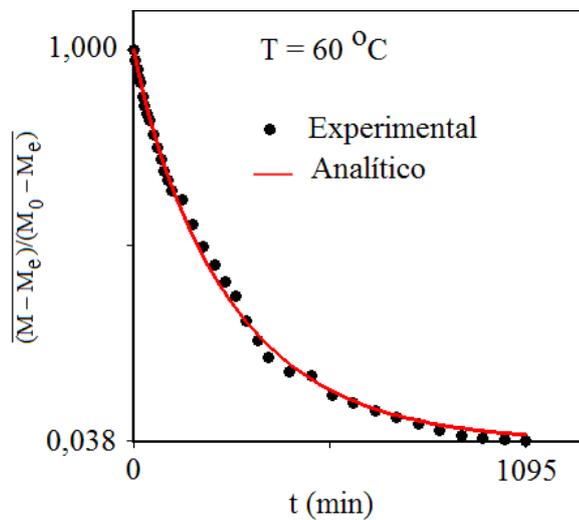


Figura 4.102 – Cinética de secagem de bananas cortadas em rodela para T = 60°C.

A distribuição de umidade em quatro instantes de tempo distintos (35 min; 50 min; 70 min; e 130 min) pode ser observada através da Figura 4.103.

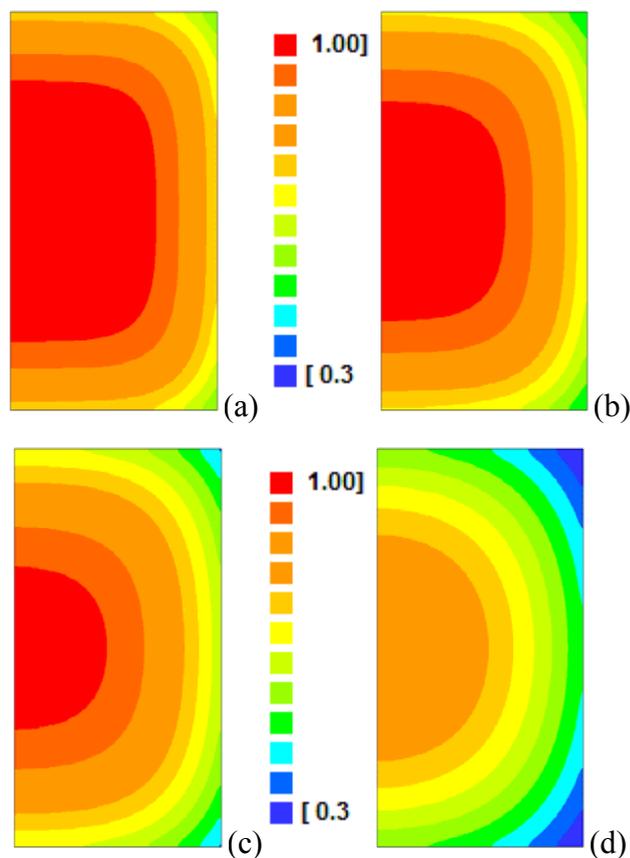


Figura 4.103 – Gráficos de contornos de bananas cortadas em rodela para $T = 60^{\circ}\text{C}$ nos instantes: (a) 35 min; (b) 50 min; (c) 70 min e (d) 130 min.

d) Temperatura do ar de secagem a 70°C

Para o ar de secagem na temperatura de 70°C , foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 – Resultados para bananas cortadas em rodela, secas a 70°C .

Parâmetro	Valor
$h \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	$6,1077 \times 10^{-7}$
$D \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$21,1333 \times 10^{-10}$
R^2	0,9994
χ^2	$1,9861 \times 10^{-3}$

Para os parâmetros obtidos na Tabela 4.28, a simulação da cinética de secagem e a distribuição de umidade são apresentadas através das Figuras 4.104 e 4.105.

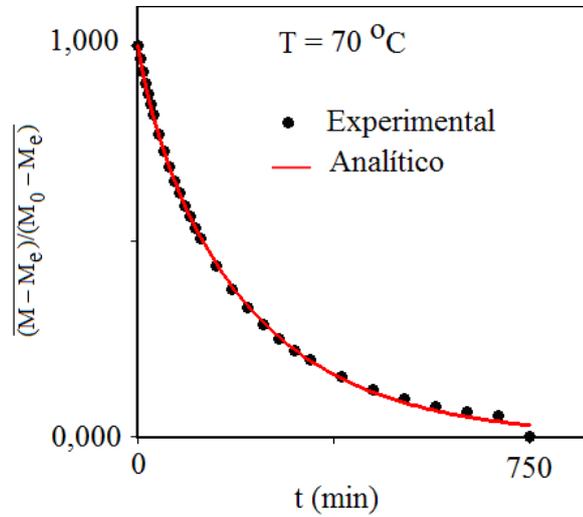


Figura 4.104 – Cinética de secagem de bananas cortadas em rodela para $T = 70^{\circ}\text{C}$.

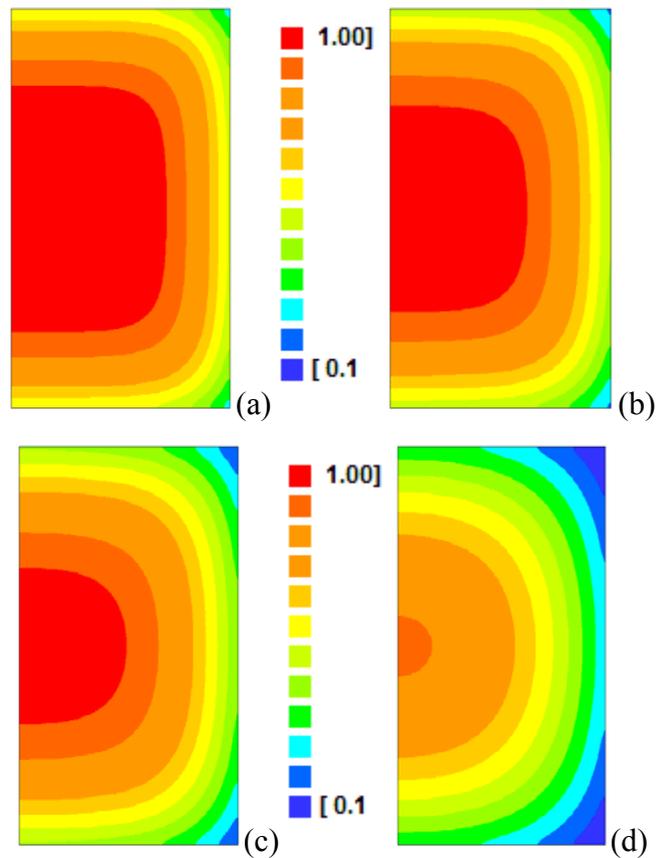


Figura 4.105 – Gráficos de contornos de bananas cortadas em rodela para $T = 70^{\circ}\text{C}$ nos instantes: (a) 35 min; (b) 50 min; (c) 70 min e (d) 130 min.

Analisando os resultados fornecidos nas Tabelas 4.17 a 4.28, verifica-se um excelente ajuste do modelo difusivo aos dados experimentais, fornecendo coeficientes de transporte de massa com valores tendendo a aumentar fortemente com o aumento da temperatura e levemente com o decréscimo de umidade relativa do ar de secagem, para todas as geometrias. Comportamento similar foi verificado por diversos pesquisadores, os quais pode-se citar: Lima (1999), Demirel e Turhan (2003), Nguyen e Price (2007), Silva et al. (2009)a e Fernando et al. (2011). A análise das figuras de números ímpares no intervalo de (4.81 a 4.105) representativas da distribuição de umidade no interior do material evidencia que a água na fase líquida migra do centro para a superfície do material e que nas regiões pontiagudas, a fruta seca mais rápido. Portanto, nestas regiões, a secagem afeta com maior intensidade o material, o que é esperado, conforme trabalho da literatura.

Em geral a comparação entre as difusividades de massa reportadas na literatura é muito difícil em virtude dos diferentes métodos de estimação, considerações adotadas nos modelos matemáticos, variação na composição química do alimento e suas estruturas física e química. Apesar disto a difusividade de massa do sistema banana-água, obtidos nesta pesquisa comparada com aquelas reportadas na literatura e que estão fornecidas na Tabela 2.5, evidencia a eficácia da metodologia utilizada. Como o modelo difusivo (Lei de Fick), foi usado em todos os casos listados nas Tabelas 3.1 a 3.3, as diferenças no coeficiente de difusão de massa podem ser atribuídas principalmente aos seguintes fatores:

- Variedade do produto;
- Condições geométricas diferentes;
- Teor de umidade inicial e de equilíbrio diferente;
- Condições de contorno consideradas;
- Variações na estrutura física do produto;
- Variações dimensionais do produto;
- Provável formação de poros, por evaporação de água.

Para finalizar, pode-se tecer os seguintes comentários:

- a) No começo da secagem, as bananas inteiras, cortada em rodela e longitudinalmente têm diâmetros aproximadamente iguais. Os comprimentos e espessura para as bananas inteiras e em rodelas, também apresentam valores próximos.
- b) Como verificado, a taxa de secagem das bananas foi bastante afetada por ambas temperatura de secagem e geometria da fruta. A taxa de secagem decrescente nas bananas desde o início do processo a uma temperatura constante indica que resistência interna ao fluxo de umidade controle a secagem como apontado por outros pesquisadores (Lima, 1999).
- c) O encolhimento durante a secagem é um fator contrário as considerações feitas para utilizar as Equações (3.40), (3.46) e (3.55), uma vez que a literatura reporta que este fenômeno afeta a taxa de secagem (Lima, 1999).
- d) O teor de umidade inicial da banana colhida em diferentes épocas do ano variou durante este estudo. As bananas foram secadas entre os meses de abril e dezembro de 2010. É conhecido na literatura que o teor de umidade inicial da fruta influencia a taxa de secagem inicial (Sabarez et al., 1999; Sabarez e Price, 1997) e com isto o tempo de secagem (Nguyen e Price (2007)). Isto ocorre em qualquer temperatura, contudo é mais visível em baixa temperatura de secagem. Quanto maior o teor de umidade inicial, maior o gradiente de umidade estabelecido no produto, mais alto será o potencial para a transferência de massa, e com isto o coeficiente de difusão é diferenciado.
- e) Segundo Nguyen e Price, (2007), a maturidade da fruta não afeta significativamente o coeficiente de difusão na faixa de 50 a 70°C, para espessura da amostra de 1 e 2 cm, no entanto, variações químicas, especialmente a quantidade de açúcar na banana madura pode contribuir na redução da taxa de perda de massa nesta fruta.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Em função do trabalho realizado nesta pesquisa, pode-se concluir que:

- A secagem de banana ocorre em um período de taxa decrescente, independente da temperatura e geometria da amostra;
- A temperatura e geometria da banana tem forte efeito na cinética de secagem. Quanto maior a temperatura mais rápido ocorre a secagem, fixado em menos de 100% a umidade relativa do ar;
- Quanto maior a relação área/volume, mais rápido ocorre à secagem, fixado as demais condições experimentais e para umidade relativa do ar de secagem menores que 100%;
- O encolhimento volumétrico e superficial da banana apresentam uma tendência de decréscimo linear com a perda de água do produto;
- A banana encolheu durante a secagem na média das três geometrias (inteira, cortada em rodela e cortada longitudinalmente) 39,12; 31,00; 34,49 e 37,76%, em volume, quando as temperaturas foram de 40, 50, 60 e 70°C, respectivamente;

- Os modelos empíricos de secagem, aquecimento e encolhimento da banana; propostos adequaram-se muito bem aos dados experimentais, apresentando coeficientes de determinação maiores que 0,998, 0,920 e 0,920, respectivamente, em todas as condições experimentais;
- Os coeficientes de transporte de massa difusivo no interior e convectivo na superfície da banana mostram-se dependentes da temperatura de secagem, para as geometrias inteiras, cortadas longitudinalmente ao meio e cortada em rodela.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Aplicar os modelos apresentados neste trabalho a secagem de outros produtos biológicos;
- Estudar a secagem de banana em outras condições experimentais;
- Avaliar a secagem de banana submetida a pré-tratamentos e outras técnicas de aquecimento, como micro-ondas e radiação infravermelha;
- Desenvolver novos modelos matemáticos e utilizar os dados experimentais desta pesquisa para validá-los.

REFERÊNCIAS

- AGRIANUAL. **Anuário da Agricultura Brasileira**. São Paulo. FNP. Consultoria & Comércio. 512 p. ano 2003.
- ALTEMANI, C. A. C. **Estudo de aquecedores solares de convecção natural para secagem**. Campinas: UNICAMP/FEC. (Dissertação de Mestrado). 87 p. 1976.
- AZOUBEL, P. M.; BAIMA, M. A. M.; AMORIM, M. R.; OLIVEIRA, S. S. B. Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v.97, p.194-198, 2010.
- AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; BELGUITH, A. Experimental analysis of heat and mass transfer during grape air drying. In: International drying Symposium (IDS'96), Krakow. **Proceedings...**, v.B, p.881-887, 1996.
- BAINI, R.; LANGRISH, T. A. G. An assessment of the mechanisms for diffusion in the drying of banana. **Journal of Food Engineering**, v.85, p.201-214, 2008.
- BIALOBREWSKI, i.; MAGDALENA, Z.; MUJUMDAR, A. S.; MAREK, M. heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles – simulation for carrot cubes dried in a spot-fluidized-bed drier. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.51, n.19-20, p.4704-4716, 2008.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena**. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001, 912p.
- BOUDHRIOUA, N.; MICHOU, C.; CURELIER, G.; BONAZZI, C. Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying. **Journal of Food Engineering**, v.55, p.115-121, 2002.
- CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Estimativa da área tecnificada nas principais regiões produtoras**. In: ALMEIDA, C. A. Banana: mercado atual e perspectivas no setor. Novembro/2007. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/Palestra_banana.pdf>. Acesso em: 10/05/2010.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**, Clarendon Press, Oxford, UK, 1992, 414p.

- DANDAMRONGRAK, R.; YOUNG G.; MASON, R. Evaluation of pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. **Journal of Food Engineering**, v.55, p.139-146, 2002.
- DEMIREL, D.; TURHAN, M. Air-drying behavior of cavendish and gros michel banana slices. **Journal of Food Engineering**, v.59, p.1-11, 2003.
- DISNC - Distrito de Irrigação Senador Nilo Coelho. **Evolução de área plantada e área em produção bananeira.** 2006. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Banana/BananeiraIrrigada/socioeconomia.htm>>. Acesso em: 12/04/2010.
- DONATO, S. L. R.; SILVA, S. O.; LUCCA FILHO, O. A.; LIMA, M. B.; DOMIGUES, H.; ALVES, J. S. Comportamento de variedades e híbridos de bananeira (*Musa spp.*) em dois ciclos de produção no sudoeste da Bahia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.28, n. 1, p. 139-144 ,2006.
- DROUZAS, A. E.; SCHUBERT, H. Microwave application in vacuum drying of fruits. **Journal of Food Engineering**, v.28, p.203-209, 1996.
- EHABE, E. E.; EYABI, G. D.; NUMFOR, F. A. Effect of sugar and NaCl soaking treatments on the quality of sweet banana figs. **Journal of Food Engineering**, v.76, n.4, p.573-578, 2006.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema de produção da bananeira irrigada.** Versão eletrônica. 2009. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Banana/BananeiraIrrigada/socioeconomia.htm>>. Acesso em: 10/08/2011, FAO (2006).
- FARKAS, J. Combination of irradiation with mild heat treatment. **Food Technology**, v.1, n.4, p.223-229, 1990.
- FERNANDO, W.J. N.; LOW, H.C.; AHMAD, A. L. The effect of infrared on diffusion coefficients and activation energies in convective drying: a case study for banana, cassava and pumpkin. **Journal of Applied Sciences**, p.1-5, 2011.
- FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. **Journal of Food Engineering**. v.82, p.261-267, 2007.
- FITO, P.; CHIRALT, A.; BARAT, J. M.; ANDRÉS, A.; MARTINEZ, MONZÓ. J.; MARTINEZ, N. N. Vacuum impregnation for development of new dehydrated products. **Journal of Food Engineering**, v.49, n.4, p.297-302. 2001.
- FUSCO, A. J.; AGUERRE, R. J.; GABITTO, J. F. A diffusional model for drying with volume change. **Drying Technology**, v. 9, n.2, p.397-417, 1991.
- GARCIA, R.; LEAL, F.; ROLZ, C. Drying of bananas using microwave and air ovens. **International Journal of Food Science and Technology**, v.23, p.73-80, 1988.

- HAMMOND, J. B.; EGG, R.; DIGGINS, D.; COBLE, C. G. Alcohol from banana. **Bioresource Technology**, n.56, p.125-130, 1996.
- HONG, Y. C.; BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Finite element modelling of moisture transfer during storage of mixed multicomponent dried foods. **Journal of Food Science**, v.51, n.3, p. 554-558, 1986.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção de banana**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/cgi-bin/prtab1>>. Acesso em: 28 de 2010.
- JIANG, HAO.; ZHANG, M.; MJUMDAR, ARUN. S. Microwave Freeze-Drying Characteristics of Banana Crisps. **Drying Technology**, v.28, p.1377-1384, 2010.
- JOMAA, W.; PUIGGALI, J. R. Drying of shrinkage materials: modelling with shrinkage velocity. **Drying Technology**, v.9, n.5, p.1271-1293, 1991.
- KARIM, A. M. D.; HAWLADER, M. N. A. Drying characteristics of banana: Theoretical modeling and experimental validation. **Journal of Food Engineering**, v.70, p.35-45, 2005.
- KECHAOU, N.; MAALEJ, M. Evaluation of diffusion coefficient in the case of banana drying. In: International Drying Symposium (IDS'94), 1994, Gold Coast: **Proceedings...** v. B, p. 841-848.
- KEEY, R. B. **Drying of loose and particulate materials**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992. 502p.
- KOSTAROPOULOS, A. E.; SARAVACOS, G. D. Transport properties in processing of fruits and vegetables. **Food Technology**, p.99-105, 1995.
- KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v.15, n.10, p.2441-2458, 1997.
- KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Effect of drying methods on physical properties of dehydrated products. In: International drying Symposium (IDS'98), Halkidiki. **Proceedings...** v.A, p.809-816, 1998a.
- LEITE, J. B.; MANCINI, M. C.; BORGES, S. V. Effect of drying temperature on the quality of dried bananas cv. prata and d'água. **Lebensmittel Wissenschaft und Technology**, v. 40, n.2, p.319-323, 2007.
- LIMA, A. G. B., **Estudo da secagem e dimensionamento de secador de casulos do bicho-da-seda**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1995. 190p.
- LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UNICAMP, São Paulo, 1999, 244p.

- LIMA, A. G. B.; MATA, S. F. Secagem de casulos do bicho-da-seda: modelagem e simulação. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola/ Congresso Latinoamericano de Ingenieria Agrícola, 1996. Bauru: **Anais... (1996)**.
- LIMA, A. G. B.; NEBRA, S. A., MATA, S. F. Equação de secagem em camada fina para casulos do bicho-da-seda (*Bombix mori* L.), In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 1998. Poços de Caldas: **Anais...**, v. IV, p. 1-3.
- LIMA, A. G. B.; NEBRA, S. A.; QUEIROZ, M. R. Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration. **Chemical Engineering Journal**, v.86, p.85-93, 2002.
- LUCCAS, V. **Obtenção de fatias de banana desidratada crocantes através da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado**. Campinas: UNICAMP/FEQ, Campinas, 1996. 104 p. (Dissertação de Mestrado).
- LUIKOV, A. V. **Analytical heat diffusion theory**, Academic Press, Inc. Ltd, London 1968, 685 p.
- MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. LTC Editora S.A., Rio de Janeiro, 2004, 453p.
- MARIANI, V. C.; LIMA, A. G. B.; COELHO, L. S. Apparent thermal diffusivity estimation of the banana during drying using inverse method. **Journal of Food Engineering**. v.85, p. 569-579, 2008.
- MASKAN, M. Microwave/air and microwave finish drying of banana. **Journal of Food Engineering** v.44, p.71-78, 2000.
- MAURO, M. A. **Cinética de desidratação osmótica de banana nanica**. Campinas: UNICAMP/FEA, 1992. 184 p. (Dissertação de Mestrado).
- MISRA, R. N., YOUNG, J. H. Numerical solution of simultaneous moisture diffusion and shrinkage during soybean drying. **Transactions of the ASAE**, v.23, p.1277-1282, 1980.
- MOWLAH, G.; TAKANO, K.; KAMOL, I.; OBARA, T. Water transport mechanism and some aspects of quality changes during air dehydration of bananas. **Lebensmittel – Wissenschaft - Technology**, v.16, p.103-107. 1982.
- NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de Caso: Secagem de materiais cerâmicos**, 2002. 207p. (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica). DTM/CT/UFPB.
- NGUYEN, M. H.; PRICE, W. E. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. **Journal of Food Engineering**, v.79, n.1, p.200-207, 2007.
- NIESTERUK, R. Changes of thermal properties of fruits and vegetables during drying. **Drying Technology**, v.14, n.2, p.415-422, 1996.

- NIMMOL, C.; DEVAHASTIN, S.; SWASDISEV, T.; SOPOURONNARIT, S. Drying of Slices Banana Usind Combined Lau-Pressure Superheated Steam end Far- Infrared Radiation. **Journal of Food Engineering**. v.81, p.624-633, 2007.
- NOGUEIRA, R. I. **Processo de secagem de banana (*Musa acuminata* subgrupo Cavendish cultivar nanica) parâmetros ótimos na obtenção de banana-passa**. Campinas: UNICAMP/FEA, 1991. 154 p. (Dissertação de Mestrado).
- NOGUEIRA, R. I.; PARK, K. J. Drying parameters to obtain “banana-passa”. In: International Drying Symposium (IDS’92), 1992, Montreal: **Proceedings...** part A, p. 874-883.
- OLEK, W.; WERES, J. Effects of the method of identification of the diffusion coefficient on accuracy of modeling bound water transfer in wood. **Transport in Porous Media**, v.66, n.1 e 2, p.135-144, 2007.
- PAN, Z.; SHIH, C.; MCHUGH, T. H.; HIRSCHBERG, E.. Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying. **LTW – Food Science and Technology** v.41, p.194-195, 2008.
- PANAGIOTOU, N. M.; KARATHANOS, V. T.; MAROULIS, Z. B. Modelling of osmotic dehydration of fruits. In: International drying Symposium (IDS’98), 1998, Halkidiki. **Proceedings...** v.A, p.954-961.
- PÉREZ, V. H. **Estudo do comportamento da temperatura da banana durante o processo de secagem**. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1998, 127p. (Dissertação de Mestrado).
- PHOUNGCHANDANG, S.; WOODS, J. L. Moisture diffusion and desorption isotherms for banana. **Journal of Food Science** v.65, p.651-657, 2000.
- PLANTEC - Tecnologia Agrícola. **Evolução de área plantada e área em produção bananeira**. 2008. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Banana/BananeiraIrrigada/socioeconomia.htm>>. Acesso em: 11/04/2010.
- PRACHAYAWARAKORN, S.; TIA, W.; PLYTO, N.; SOPONRONNARIT, S. Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. **Journal of Food Engineering**, v.85, p.509-517, 2008.
- QUEIROZ, M. R. **Estudo teórico-experimental da cinética de secagem de bananas**. Campinas: UNICAMP/FEM, 1994. 176p. (Tese de Doutorado).
- QUEIROZ, M. R.; NEBRA, S. A. Modelo de difusão aplicado à secagem de banana: análise da condição de contorno convectiva. In: Congresso Ibero-Americano de ingeniería de Alimentos, Campinas. **Anais...** Tomo II, p. 301-311, 1995.
- QUEIROZ, M. R.; NEBRA, S. A. Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. In: International Drying Symposium (IDS’96), 1996, Krakow: **Proceedings...** Part B, p. 1045-1052.

- QUEIROZ, M. R.; NEBRA, S. A. Soluções analítica e numérica do modelo de difusão aplicadas à secagem de bananas. **Revista de Engenharia Agrícola**, v.17, n.1, p.74-83, 1997.
- QUEIROZ, M. R.; NEBRA, S. A. Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. **Journal of Food Engineering**, v.47, p.127-132, 2001.
- RAHMAN, M. S.; CHEN, X. D.; PERERA, C. O. An improved thermal conductivity prediction model for fruits and vegetables as a function of temperature, water content and porosity. **Journal of Food Engineering**, v.31, p.163-170, 1997.
- RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. **Food Science and Technology International**, v.9, n.3 p. 201-206, 2003.
- RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S.; NIRANJAN, K. Mass transfer during osmotic dehydration of banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration. **Journal of Food Engineering**, v.31, p.423-432, 1997.
- ROVEDO, C. O.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E. Drying simulation of a solid slab with three dimensional shrinkage. **Drying Technology**, v.13, n.1-2, p.371-393, 1995.
- SABAREZ, H.; PRICE, W. E.; BACK, P. J.; WOOLF, L. A. Modelling the kinetics of drying of D'Aggen Plums (*Prunus domestica*). **Food Chemistry**, v.60, n. 3, p.371-382, 1997
- SABAREZ, H. T.; PRICE, W. E. A diffusion model for prune dehydration. **Journal of Food Engineering**, v.42, n.3, p.167-172, 1999.
- SANKAT, C. K.; CASTAIGNE, F. Banana dehydration: osmotic, air and solar effect. In: International Drying Symposium (IDS'92), Montreal: **Proceedings...** Part B, p. 1679-1688, 1992.
- SANKAT, C. K.; CASTAIGNE, MAHARAJ, R. The air drying behavior of fresh and osmotically dehydrated banana slices. **International Journal of Food Science and Technology**, v.31, p.123-135, 1996.
- SARAVACOS, G. D. **Engineering properties of foods**. New York: Marcel Dekker, Inc., Chapter. Mass transfer properties of foods, p.169-221, 1995.
- SATIN, M. **La irradiación de los alimentos**. Zaragoza: Acribia. 175p.1997.
- SCHIRMER, P.; JANJAI, S.; ESPER, A.; SMITABHINDU, R.; MÜHLBAUER, W. Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying bananas. **Renewable Energy**, v.7, n.2, p.119-129, 1996.
- SILVA, C. M. D. P. S. **Difusão de massa em corpos cilíndricos: modelagem, soluções analíticas e numéricas e aplicação na secagem de bananas**. 2010. 129 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola. Centro de Tecnologia e Recurso Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

- SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Tratamento de dados experimentais**. João Pessoa: UFPB/Editora Universitária, Edição, 1998. 197p.
- SILVA, W. P.; PRECKER, W. J.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, D. D. P. S.; Determination of the effective via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea. **Journal of Food Engineering**, v.95, n. 2, p. 298-304, 2009a.
- SILVA, W. P.; PRECKER, J. W.; SILVA, C. M. D. P. S.; GOMES, J. P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: application to the drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, v.98, n.3, p.302-308, 2010.
- SILVA, W. P.; PRECKER, J. W.; LIMA, A. G. B.. Drying kinetics of lima bean (*phaseolus lunatus*.) experimental determination and prediction by diffusion models. **International Journal of Food Engineering**, v.5, n.3, p.1-21, 2009b.
- SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Convective Adsorption and Desorption Software** (2011), online, disponível no endereço eletrônico: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Convective.htm>, data de acesso: agosto/2011.
- SINGH, R. P. **Heating and cooling processes for foods**. In: Handbook of Food Engineering. New York: Marcel Dekker, Inc. 1982. Chapter 5: p.247-276.
- SMITABHINDU, R.; JANJAI, S.; CHANKONG, V. Optimization of a solar-assisted for drying banana. **Renewable energy**, v.33, p. 1523-1531, 2008.
- SOKHANSANJ, S.; PATIL, R. T. Kinetics of dehydration of green alfalfa. **Drying Technology**, v. 14, n. 5, p. 1197-1234, 1996.
- SOTHORNVIT, R.; PITAK, N. Oxygen permeability and mechanical properties of banana - **Food Research International**, v.40, p.365-370, 2007.
- SWASDISEVI, R.; DEVAHASTIN, S.; SA-ADCHOM, P.; SOPONRONNARIT, S. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. **Journal of Food Engineering**, v.92, p.100-106, 2007.
- SWEAT, V. E. **Thermal properties of foods, engineering properties of foods**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1995. Chapter 3: p.99-138.
- TALLA, A.; PUIGGASLI, J R.; JOMAA, W.; JANNOT, Y. Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. **Journal of Food Engineering**, v.64, 103-109, 2004.
- TANADA. P. S. **Obtenção de extrato de (*Musa Cavendishi*) isenta de polifenol oxidase por ultra-infiltração e concentrado por osmose inversa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Campinas. Universidade Estadual de Campinas. 1996. 101p,
- THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKRON, S.; SOPONRONNARIT, S. Drying characteristics and quality of banana foam mat. **Journal of Food Engineering**, v.86, p.573-583, 2008.

TRAVAGLINI, D. A.; PINTO NETO, M.; BLEINROTH, E. W.; LEITÃO, M. F. F. **Banana-passa: Princípios de secagem, conservação e produção industrial**. Campinas: ITAL/Rede de Núcleos de Informação Tecnológica, 1993, 73 p. (Manual Técnico 12).

UNCTAD Market. Disponível em <http://www.unctad.org/infocomm/anglais/banana/market.htm>. Acesso em: 10/08/2011.

USDA (Nutrient Database for Standard Reference). Release 14 (Julho 2001). **Composição química dos principais componentes da banana**. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Banana/BananeiraIrrigada/socioeconomia.htm>>. Acesso em: 15/04/2010.

WALISZEWSKI, K. N.; SALGADO, M. A.; GARCIA, M. A. Mass transfer in banana chips during osmotic dehydration ski. **Drying Technology**, v.15, n.10, p.2597-2607, 1997.

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

YAN, Z.; SOUSA-GALLAHER, M. J.; OLIVEIRA, F. A. R. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. **Journal of Food Engineering**, v.84, p.430-440, 2008.