UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia de Alimentos
Departamento de Engenharia de Alimentos

Estudo da aplicação de microondas na secagem de bananas tratadas osmoticamente

Nádia Rosa Pereira

Prof. Dr. Antônio Marsaioli Jr.
(Orientador)

Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Alimentos

Campinas – 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

Pereira, Nádia Rosa
P414e Estudo da aplicação de microondas na secagem de bananas tratadas osmoticamente / Nádia Rosa Pereira. -- Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Antônio Marsaioli Junior
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos

1. Secagem. 2. Microondas. 3. Desidratação osmótica. 4. Porosidade. 5. Encolhimento. I. Marsaioli Junior, Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

(cars/fea)

Titulo em inglês: Study on the application of microwaves to the drying of osmotically treated bananas
Palavras-chave em inglês (Keywords): Drying, Microwaves, Osmotic dehydration, Porosity, Shrinkage
Titulação: Doutor em Engenharia de Alimentos
Banca examinadora: Antônio Marsaioli Junior
Ana Maria da Silveira
Kil Jin Park
Lilia Maria Ahrné
Michele Nehemy Berteli
Miriam Dupas Hubinger
Programa de Pós Graduação: Programa em Engenharia de Alimentos

Estudo da aplicação de microondas na secagem de bananas pré-desidratadas osmoticamente

Por

Nádia Rosa Pereira
(*Mestre em Engenharia de Alimentos*)

Tese aprovada em _____ de _____ de 2007.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Marsaioli Jr.
(ORIENTADOR – DEA/FEA/UNICAMP)

Prof. Dr[a] Ana Maria da Silveira
(MEMBRO – PPG-EQ/UFSCar)

Prof. Dr Kil Jin Park
(MEMBRO – FEAGRI/UNICAMP)

Prof. Dr[a] Lilia Maria Ahrné
(MEMBRO – SIK)

Prof. Dr [a]. Michele Nehemy Berteli
(MEMBRO – GEPC/ITAL)

Prof. Dr [a]. Miriam Dupas Hubinger
(MEMBRO – DEA/FEA/UNICAMP)

Dedico este trabalho aos meus pais,

Lupercio e Silvina, meus eternos

mestres, que sempre me incentivaram

a não ter medo de realizar os sonhos e

me mostraram que a curiosidade e a

busca pelo novo é que movem e a vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Marsaioli pela amizade, orientação, boa vontade sempre que solicitado e por incentivar o uso da criatividade na solução dos problemas.

À Drª Lilia Ahrné por ter me recebido tão bem, tornando o período de desenvolvimento do estágio muito agradável e produtivo! A todo o pessoal do SIK pela cordialidade e simpatia que fizeram desse, um momento de prazer e de aprendizagem.

Ao André, eterno incentivador, amigo em todas as horas, que acalma, que alegra e que me ensina a aproveitar o máximo de cada momento!

À Michele e ao Flávio, pela parceria, conversas, cervejas ... e por fazerem do ambiente de trabalho um ambiente amigo!

À Vânia, Vaninha, Vanucha, Vânia Rosa, por ser além de minha irmã, minha amiga, meu consolo, minha cúmplice e companheira! Ao Amilcar, meu espelho de quando criança!

Ao Nivaldo, Eni, Renata e Farlei, por todo o carinho e o zêlo! Ao Murilo, por ter chegado e bagunçado o coreto!

À todos os amigos que fazem da vida, uma alegria!

Aos professores membros da banca, por todas as sugestões e discussões realizadas para o melhoramento do trabalho.

Ao Per O. Risman por todas as discussãoes realizadas sobre microondas e pelo valioso aprendizado!

À Kelly e à Michele, por compartilharem os momentos de altos e baixos durante a realização dos experimentos. À Renata, Ana Paula, Cristhiane e Leila pelas dicas e sugestões sobre desidratação osmótica!

À Eva, Norman e Anna, por dividirem os momentos, quando longe de casa, e pela amizade.

À Magário Comércio de Frutas Ltda., representado pelo Sr. Manoel, pelo fornecimento infinito de matéria-prima.

Aos professores Viotto, Miriam e Florência por terem aberto as portas dos laboratórios para a realização das análises.

Ao Prof. Vivaldo, por disponibilizar a câmara fria para o acondicionamento das bananas. Ao Daniel, Márcio, Silmar e Klicia pela inestimável ajuda para reconstituir o sistema de aquisição de dados e controle com extrema paciência!

À Priscila por toda a ajuda na realização dos experimentos e por ter sido a memória que me faltou inúmeras vezes! À Lauren por compartilhar essa dureza que é a vida experimental, por se aventurar na área de microondas e trazer vida nova ao laboratório.

Aos técnicos do DEA, Márcio, Izaías, Adélia e Joyce, por todos os quebra-galhos e pelo carinho e atenção sempre dispensados.

A todas as pessoas que devo, inevitavelmente, ter me esquecido, minhas desculpas e meu obrigada!

A todas as pessoas que mesmo indiretamente apoiaram o desenvolvimento desse trabalho. À Capes, diretamente, CNPq e Fapesp pelo financiamento. À PRPG e PRP, pelo apoio que permitiu a apresentação desse trabalho no IDS 2006!

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS ..... **vii**

ÍNDICE ..... **ix**

ÍNDICE DE TABELAS ..... **xiii**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xv**

LISTA DE SÍMBOLOS ..... **xix**

RESUMO ..... **xxii**

ABSTRACT ..... **xxiii**

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA **1**

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **5**

2.1 BANANA 5

2.2 MICROONDAS 9

2.2.1 Mecanismos de aquecimento por microondas *12*

2.2.2 Propriedades dielétricas *15*

2.3 DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA 18

2.4 SECAGEM 22

2.4.1 Secagem com aplicação de microondas *26*

2.4.2 Ajuste por modelos matemáticos *33*

2.5 PARÂMETROS DE QUALIDADE DO PRODUTO NA SECAGEM 36

CAPÍTULO 3 – RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA DE MICROONDAS E CONDIÇÕES DO AR NA SECAGEM DE BANANA OSMOTICAMENTE DESIDRATADA 39

3.1 INTRODUÇÃO 39

3.2 OBJETIVOS 40

3.3 MATERIAL E MÉTODOS 41

3.3.1 Seleção e preparação da matéria-prima 41

3.3.2 Caracterização da matéria-prima e dos produtos 41

3.3.3 Desidratação osmótica 45

3.3.4 Secagem assistida a microondas 46

3.3.4.1 Equipamento de secagem com aplicação de microondas 46

3.3.4.2 Procedimento experimental 48

3.3.4.3 Verificação da eficiência do secador 51

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS 52

3.4.1 Avaliação da cinética de secagem 52

3.4.2 Avaliação da qualidade do produto 68

3.5 CONCLUSÕES 76

CAPÍTULO 4 - PERÍODO INICIAL DA SECAGEM: INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE MICROONDAS E DA DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA 78

4.1 INTRODUÇÃO 78

4.2 OBJETIVOS 79

4.3 MATERIAL E MÉTODOS 80

4.3.1 Seleção e preparação da matéria-prima 80

4.3.2 Caracterização da matéria-prima e do produto 81

4.3.3 Desidratação osmótica *83*

4.3.4 Secagem assistida a microondas *85*

4.3.4.1 Forno de microondas adaptado 85

4.3.4.2 Procedimento experimental 87

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 88

4.4.1 Caracterização da matéria-prima *89*

4.4.2 Escolha dos tempos da desidratação osmótica *90*

4.4.3 Secagem com aplicação de microondas *92*

4.4.3.1 Cinética de secagem 92

4.4.3.2 Ajuste por modelos matemáticos 101

4.4.3.3 Características do produto parcialmente seco 106

4.5 CONCLUSÕES 114

CAPÍTULO 5 SECAGEM COMPLETA DE FATIAS DE BANANA PRÉ-DESIDRATADAS OSMOTICAMENTE 116

5.1 INTRODUÇÃO 116

5.2 OBJETIVOS 118

5.3 MATERIAL E MÉTODOS 119

5.3.1 Matéria-prima *119*

5.3.2 Caracterização da matéria-prima e do produto seco *119*

5.3.3 Desidratação osmótica *119*

5.3.4 Secagem assistida a microondas *120*

5.3.4.1 Forno de microondas adaptado 120

5.3.4.2 Procedimento experimental 122

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 123

5.4.1 Cinética de secagem 123

5.4.2 Ajuste por modelos matemáticos 131

5.4.3 Característica do produto seco 137

5.5 CONCLUSÕES 143

CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS 145

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 147

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 148

APÊNDICE I – CONDIÇÕES DA CALIBRAÇÃO E DE OPERAÇÃO DO ANALISADOR DE UMIDADE SMART 5 159

APÊNDICE II - DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE SECAGEM REFERENTES AO CAPÍTULO 4 160

APÊNDICE III - DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE SECAGEM REFERENTES AO CAPÍTULO 5 163

APÊNDICE IV – PUBLICAÇÕES RESULTANTES DO TRABALHO 165

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Composição química da polpa de banana nanica madura *in natura* 7
Tabela 3.1 - Tempo de secagem de fatias de banana osmoticamente desidratadas até o final da Fases II para as diferentes condições do escoamento do ar. 57
Tabela 3.2- Parâmetros do modelo exponencial ajustado aos dados da curva de secagem 61
Tabela 3.3 - Parâmetros do modelo exponencial ajustado aos dados da curva de secagem 65
Tabela 3.4 - Tempo de secagem de fatias de banana osmoticamente desidratadas da Fase III e tempo total final para as diferentes condições de secagem. 67
Tabela 3.5 - Composição da banana *in natura* e desidratada osmoticamente 68
Tabela 3.6 - Efeitos das condições de secagem com aplicação de microondas nos valores da atividade de água das fatias de banana previamente desidratadas osmoticamente. 69
Tabela 4.1 - Composição química da banana nanica *in natura* 89
Tabela 4.2 – Caracterização química das amostras de banana desidratadas osmoticamente 92
Tabela 4.3– Tempo de secagem e tempo total para o processo combinado de secagem com aplicacão de microondas e desidratação osmótica de fatias de banana 100
Tabela 4.4 - Parâmetros obtidos do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Lewis para a secagem com aplicação de microondas de fatias de banana com e sem pré-tratamento osmótico. 101
Tabela 4.5 - Parâmetros obtidos do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Page para a secagem de fatias de banana com aplicação de microondas 105
Tabela 4.6 – Valores de atividade de água atingidos pelas fatias de banana parcialmente secas com ar a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de microondas. 107
Tabela 5.1 - Parâmetros obtidos do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Fick simplificado para a secagem com ar a 70°C e 0,8m/s combinado com aplicação de microondas em dois estágios de fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente. 131
Tabela 5.2 - Valores de razão de volume, porosidade e capacidade de reidratação das fatias de banana desidratadas e secas com ar quente a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de microondas em dois estágios. 138
Tabela 5.3 – Valores de atividade de água e umidade final atingidos pelas fatias de banana desidratadas e secas com ar quente a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de microondas em dois estágios. 141
Tabela A 1 - Condições de operação calibradas para a análise de umidade de banana no medidor de umidade a microondas SMART 5 (CEM) 159
Tabela A 2 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana *in natura* secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 95W e ar a 70°C 160
Tabela A 3 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana *in natura* secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 188W e ar a 70°C 160

Tabela A 4 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana *in natura* secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 188W e ar a 70°C 160
Tabela A 5 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 95W e ar a 70°C 161
Tabela A 6 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 188W e ar a 70°C 161
Tabela A 7 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 188W e ar a 70°C 161
Tabela A 8 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 150 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 95W e ar a 70°C 162
Tabela A 9 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 150 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 188W e ar a 70°C 162
Tabela A 10- Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 150 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 279W e ar a 70°C 162
Tabela A 11 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 279W e o período final a 73W e ar a 70°C 163
Tabela A 12- Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 279W e o período final a 95W e ar a 70°C 163
Tabela A 13 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 279W e o período final a 188W e ar a 70°C 164

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Ilustração da classificação dos países produtores de banana da variedade Cavendish (ARIAS *et al*. 2003)..... 6
Figura 2.2 – Espectro eletromagnético (DATTA, 2001). 9
Figura 2.3 – Diagrama de um sistema genérico de aquecimento por microondas (CONFORTI & TEJO, 1976 citado por MARSAIOLI, 1991)..... 11
Figura 2.4 – Visualização da distribuição do campo elétrico em uma cavidade aplicadora de microondas (MARSAIOLI, 1991) 12
Figura 3.1 - Coloração característica da casca das frutas utilizadas nos experimentos. 41
Figura 3.2 – Padrão considerado para caracterização das amostras queimadas, (a) face superior e (b) face inferior. 44
Figura 3.3 – Esquema ilustrativo do escoamento do ar na cavidade de microondas (riscos amarelos representam as fatias de banana e flechas vermelhas, o caminho percorrido pelo ar). 46
Figura 3.4 - Equipamento de secagem assistido a microondas e sistema de ar quente acoplado. 47
Figura 3.5 - Posicionamento dos sensores de temperatura para monitoramento da evolução da temperatura interna do produto durante os experimentos de secagem de banana..... 49
Figura 3.6 - Esquema ilustrativo das condições experimentais testadas para secagem de fatias de banana osmoticamente desidratadas. 50
Figura 3.7 - Umidade em função do tempo de fatias de banana desidratadas osmoticamente secas com velocidade do ar de 3,3 m/s e temperatura do ar a 50 ou 70°C, com e sem aplicação de microondas na Fase III, englobando as três fases..... 52
Figura 3.8 –Taxa de secagem em função da umidade adimensional de fatias de banana desidratadas osmoticamente secas com velocidade do ar de 3,3 m/s e temperatura do ar a 50 ou 70°C, com e sem aplicação de microondas na Fase III, englobando as três fases. 53
Figura 3.9 – Temperatura interna de fatias de banana osmoticamente desidratadas em função do tempo para a secagem com velocidade do ar de 3,3 m/s e temperatura do ar a 50 ou 70°C, com e sem aplicação de microondas na Fase III, englobando as três fases. 54
Figura 3.10 - Temperatura interna do produto em função do tempo de fatias de banana desidratadas osmoticamente secas 760W e ar a 80°C e 5,7 m/s na Fase I e, na Fase II, com 380W e as três condições do escoamento do ar. 56
Figura 3.11 - Umidade adimensional em função do tempo de fatias de banana desidratadas osmoticamente secas 760W e ar a 80°C e 5,7 m/s na Fase I e, na Fase II, com 380W e as três condições do escoamento do ar. 56

Figura 3.12 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional de fatias de banana desidratadas osmoticamente secas 760W e ar a 80°C e 5,7 m/s na Fase I e, na Fase II, com 380W e as três condições do escoamento do ar. 57
Figura 3.13 - Evolução da temperatura interna de banana em função do tempo de secagem na Fase III com ar a 50°C e 3,3 m/s para as quatro potências de microondas aplicadas (0, 76, 150 e 230W). 59
Figura 3.14 - Evolução da temperatura interna de banana em função do tempo de secagem na Fase III com ar a 70°C e 3,3 m/s para as quatro potências de microondas aplicadas (0, 76, 150 e 230W) 60
Figura 3.15 - Evolução da temperatura interna de banana em função do tempo de secagem na Fase III com ar a 70°C e 5,7 m/s para as quatro potências de microondas aplicadas (0, 76, 150 e 230W). 60
Figura 3.16 – Taxa de secagem em função do adimensional de umidade da Fase III para secagem com ar a 70°C e 5,7 m/s e potência de microondas aplicada de 150W. 61
Figura 3.17 - Curvas de secagem e ajuste do modelo durante a secagem na Fase III em diferentes condições de escoamento do ar e potência de microondas. 63
Figura 3.18 - Curvas de taxa de secagem durante a secagem na Fase III em diferentes condições de escoamento do ar e potência de microondas 64
Figura 3.19 – Parâmetros de cor (*L*, *a**, *b* e ΔE*) das fatias de banana *in natura* e secas em função da potência de microondas aplicada para as três condições de escoamento do ar. 70
Figura 3.20 - Ilustração da mudança de coloração da fruta seca em relação à fruta *in natura* (*in natura*) 72
Figura 3.21 - Volume aparente e porosidade das fatias de banana secas em função da potência de microondas aplicada para as três condições de escoamento do ar. 73
Figura 3.22 - Fatias queimadas em função da potência de microondas aplicada para as três condições de temperatura e velocidade do ar de secagem. 75
Figura 4.1 - Sistema de secagem em forno de microondas adaptado: (1) célula de fluxo laminar; (2) manômetro "U"; (3) controlador de temperatura do ar de entrada; (4) ventilador centrífugo; (5) aquecedor por resistência elétrica; (6) difusor de ar; (7) tubulação auxiliar para exaustão do ar; (8) forno de microondas; (9) e (10) sistema de aquisição dos dados e controle. 85
Figura 4.2 - Disposição das fatias de banana na bandeja e da mesma dentro da cavidade para a secagem com assistência de microondas. 88
Figura 4.3 – Perda de água (PA), ganho de sólidos (GS) e perda de peso (PP) em função do tempo de desidratação osmótica de fatias de banana 90
Figura 4.4 - Adimensional de umidade em função do tempo, das fatias de banana sem pré-tratamento osmótico submetidas à secagem com aplicação de microondas. 93
Figura 4.5 - Adimensional de umidade em função do tempo, das fatias de banana desidratadas osmoticamente durante 60 minutos submetidas à secagem com aplicação de microondas. 94
Figura 4.6 - Adimensional de umidade em função do tempo, das fatias de banana desidratadas osmoticamente durante 150 minutos submetidas à secagem com aplicação de microondas. 94

Figura 4.7 - Adimensional de umidade em função do tempo, das fatias de banana submetidas a secagem com potência de microondas aplicada de 188 W (0,5W/g) para as três amostras..... 95
Figura 4.8 – Comportamento típico da temperatura superficial da banana (a) e da densidade de potência disponível disponível (b) ao longo da secagem com microondas para amostras pré-desidratadas por 150 minutos. 96
Figura 4.9 - Comportamento típico da temperatura superficial do produto em função do tempo para secagem com aplicação de 188W de potência de microondas, para as três amostras. 98
Figura 4.10 – Ajuste do modelo exponencial para os dados do processo de secagem de fatias de banana *in natura* (sem pré-tratamento) para as três potências de microondas aplicadas. 102
Figura 4.11 - Ajuste do modelo de Page para os dados do processo de secagem de fatias de banana *in natura* (sem pré-tratamento) para as três potências microondas aplicadas. 105
Figura 4.12 – Parâmetros k_P (a) e n (b) em função da potência de microondas aplicada na fase inicial da secagem, para as três amostras de fatias de banana. 106
Figura 4.13 –Razão de volume das amostras de banana parcialmente secas em função da potência de microondas aplicada (a) e em função do tempo de desidratação osmótica (b). 108
Figura 4.14 – Ilustração da mudança de forma do volume da fatia seca em relação à sua forma no início da secagem devido ao encolhimento do volume da mesma. 110
Figura 4.15 - Porosidade das amostras de banana parcialmente secas, em função da potência de microondas aplicada (a) e do tempo de desidratação osmótica (b). 110
Figura 4.16 - Capacidade de reidratação das amostras de banana parcialmente secas, em função da potência de microondas aplicada (a) e do tempo de desidratação osmótica (b). 112
Figura 5.1 – Adimensional de umidade em função do tempo das fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente submetidas à secagem com aplicação de microondas em dois estágios. 124
Figura 5.2 –Densidade de potência disponível de microondas (W/g) em função do tempo de secagem dos dois estágios, com aplicação fixa de 279W no período inicial. 126
Figura 5.3 – Temperaturas do produto, do ar de entrada e de saída em função do tempo de secagem das fatias de banana com aplicação de potência de microondas de 279W no período inicial e 73W no período final da secagem. 128
Figura 5.4 - Temperaturas do produto, do ar de entrada e de saída ao longo do tempo de secagem das fatias de banana com aplicação de potência de microondas de 279W no período inicial e 188W no período final da secagem. 128
Figura 5.5 - Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem com ar a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de potência de microondas de 279W no período inicial (PI) e 73W no período final (PII) de banana desidratadas osmoticamente. 134
Figura 5.6 - Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem com ar a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de potência de microondas de 279W no período inicial (PI) e 95W no período final (PII) de banana desidratadas osmoticamente. 134

Figura 5.7 - Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem com ar a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de potência de microondas de 279W no período inicial (PI) e 188W no período final (PII) de banana desidratadas osmoticamente..... 135
Figura A 1 – Curva de calibração de umidade medida pelo equipamento de acordo com o método 934.06 (AOAC, 1997). 159

LISTA DE SÍMBOLOS

a_0 = índice de saturação vermelha da amostra *in natura*

AR = açúcares redutores (g/100g)

AT = açúcares totais (g/100g)

bu = base úmida

b^* = índice de saturação amarelo definido pela CIE (1976)

b_0 = índice de saturação amarelo da amostra *in natura*

CR = capacidade de reidratação (%)

c_p = calor específico (J/ kg K)

D = desvio do ajuste

DO = desidratação osmótica

DO 60 = amostra desidratada osmoticamente em solução de sacarose por 60 minutos

DO 150 = amostra desidratada osmoticamente em solução de sacarose por 150 minutos

DP_p = densidade de potência disponível (W/g)

D_{ef} = difusividade efetiva (m^2/s)

dp = profundidade de penetração (m)

E = campo elétrico (V/m)

E = energia (J)

E_{ar} = energia fornecida pelo aquecimento dielétrico (J)

$E_{evaporação}$ = energia necessária para evaporação de água (J)

E_M = energia fornecida pelo aquecimento dielétrico (J)

e = espessura do material (m)

f = freqüência (Hz)

GS = ganho de sólidos ($kg_{sólidos}/kg$)

k_1 *e* k_2 = constantes de secagem do modelo de duas exponenciais (min^{-1})

k_L = constante de secagem do modelo exponencial (min^{-1})

k_P = constante de secagem do modelo de Page (min^{-1})

L = meia espessura do material (m)

*L** = índice de luminosidade definido pela CIE (1976)

L_0 = índice de luminosidade da amostra *in natura*

$\dot{m}$ = vazão de água (kg/s)

ms = matéria seca

n = constante do modelo de Page

PA = perda de água (kg_a/kg)

PI = período inicial de secagem

PII = período final de secagem

PP = perda de peso (kg/kg)

P_{ab} = potência absorvida pela carga d'água (W)

P_{dis} = potência disponível para a carga (W)

P_e = potência efetiva (W)

R = raio da fatia de amostra (m)

SST = sólidos solúveis totais (°Brix)

T = temperatura (°C)

t_f = tempo de secagem total (min)

t_{II} = tempo de secagem de 2,3 até 0,67 kg_a /kg_{ms} (min)

t_{III} = tempo de secagem de 0,67 até 0,17 kg_a /kg_{ms} = t_f -t_{II} (min)

V = volume da amostra (mL)

v = velocidade do ar (m/s)

W = massa (kg)

Wa = massa de água (kg)

Ws = massa de sólidos (kg)

X = teor de umidade (base seca) [kg_a /kg_{ms}]

X_1 = teor de umidade associado com a constante de secagem k_1 (kg_a /kg_{ms})

X_2 = teor de umidade associado com a constante de secagem k_2 (kg_a /kg_{ms})

Letras gregas

$\tan\delta$ = fator tangente de perdas ou fator de dissipação

σ = condutividade dielétrica (S/m)

ΔE^* = variação de cor em relação a amostra *in natura*

ε = porosidade

ε^* = permissividade dielétrica relativa

ε' = constante dielétrica relativa

ε'' = fator de perdas relativo

ε_0 = permissividade dielétrica do espaço livre (ar) = $8,854 \times 10^{-12}$ (F/m)

κ'' = fator de perdas dielétricas (F/m)

ρ = densidade (g/ml)

λ_0 = comprimento de onda no espaço livre = 0,1224m (para 2450 MHz)

Subscritos

0 = referente à condição inicial

a = água

ap = aparente

cal = calculado

exp = experimental

g = gancho

ms = matéria seca

rei = amostra reidratada

s = amostra

sa = sólidos e água

RESUMO

A banana, da qual o Brasil é um dos maiores produtores mundiais, é predominantemente consumida no mercado interno, seja na forma de fruta *in natura* de mesa, seja processada. A implantação de métodos de transformação dessa matéria-prima se torna interessante porque favorece o aproveitamento do excesso de produção e a redução das perdas e possibilita a agregação de valor ao material primário.Tecnologias de processamento têm sido desenvolvidas para lhe assegurar maior tempo de duração, maior rendimento na produção e, principalmente, melhor qualidade dos produtos finais dela derivados. Neste trabalho, relacionado ao processo de transformação da banana, procura-se contribuir para a adoção de novas tecnologias de processamento de produtos, demonstrando-se que a aplicação de microondas na secagem de produtos agrícolas acelera a cinética de secagem e, se esta for bem controlada, o produto seco pode atingir qualidade comparável ou até superior àquela obtida pelos métodos convencionais. Por meio de uma combinação do processo de secagem por convecção a ar quente com energia de microondas, avalia-se a cinética de secagem e a qualidade do produto em termos de cor, volume aparente, encolhimento, capacidade de reidratação e porosidade da amostra seca. Estudando-se a influência da potência de microondas, da temperatura e velocidade do ar nos dois períodos de taxa de secagem decrescentes de banana previamente desidratada osmoticamente, considerou-se a possibilidade da utilização de microondas em estágios ao longo da secagem, buscando uma redução no tempo de processo. Conclui-se que o aumento da potência de microondas aplicada provocou uma aceleração na cinética de secagem tanto no período inicial como no final. A temperatura do ar, por sua vez, apresentou uma influência secundária na secagem quando microondas foram incorporadas ao processo, enquanto que a velocidade não apresentou influência na cinética de secagem. A desidratação osmótica apresentou pouca influência na cinética de secagem, embora tenha apresentado redução dos tempos de secagem, pela diminuição da umidade inicial, mas apresentou vantagens em relação à qualidade do produto em termos de aparência visual e encolhimento. Dessa maneira, este estudo pode ser útil para a exploração do desenvolvimento de processos de secagem acelerada que conjuguem o fornecimento de energia de acordo com a demanda do produto, buscando uma preservação das suas qualidades estruturais.

ABSTRACT

Brasil is one of the largest banana producer in the world, with the crop being predominantly consumed in the internal market, as table *in natura* fruit and as processed foods. The implementation of methods to transform such a raw material becomes attractive as long as it takes advantage of the production surplus, reduces the crop wastes and allows aggregating value to the raw material. Processing technologies have been developed in order to assure a longer shelf life, an increased process yield and most of all a better quality of the final banana products. As this work relates to the methods of processing banana, it aims at contributing to the adoption of new technologies of obtaining processed products, demonstrating that applying microwaves to drying agricultural products helps to accelerate the kinetics of drying. Furthermore, being the kinetics well controlled, the dried product can reach a quality level comparable or even superior to that obtainable by means of the conventional methods. By applying a combined process of drying using microwaves and hot air, it is possible to evaluate the drying kinetics and the product quality, expressed as color, apparent volume, shrinkage, re-hydration capability and porosity of the dried sample. By studying the influence of microwave power, air temperature and velocity on the two decreasing drying rate periods of the osmo-dehydrated bananas, it was cogitated on the possibility of applying microwaves into separate stages along the drying process, toward reducing the overall processing time. It could be concluded that increasing the applied microwave power resulted in accelerating the kinetics of both the initial and final drying periods. On the other hand, the air temperature showed a secondary effect on the drying operation when the microwaves were incorporated to the process, whereas the air velocity did not exhibit any influence on the drying kinetics. The osmotic dehydration did not affect the drying kinetics, although contributing to reduce the drying times through decreasing the initial moisture and to the advantage of the product quality in terms of visual appearance and shrinkage. In such a manner, this study can be useful to explore the development of accelarated drying processes that conjugate the energy provision to the requirements of the product, aiming to the preservation of its structural characteristics.

Capítulo 1 - Introdução e Justificativa

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de banana. Entretanto, sua produção ainda não visa exportação; o que predomina é o consumo interno na forma de fruta *in natura* de mesa e processada. Entre 30 e 40% da produção é perdida em razão da alta perecibilidade da fruta *in natura* e das condições de transporte e comercialização. Conseqüentemente, novas tecnologias de processamento têm sido desenvolvidas para lhe assegurar maior tempo de duração, maior rendimento na produção e, principalmente, melhor qualidade dos produtos finais dela derivados. O processamento também cria opções de produtos derivados com características similares às da fruta natural, com a vantagem de proporcionar maior praticidade de consumo. Atualmente, tem havido um crescente aumento na demanda por produtos processados de fruta, tais como iogurtes com pedaços de fruta, barras de frutas e cereais, frutas secas e cristalizadas, etc. À luz das novas concepções sobre a qualidade de vida, o consumidor apresenta-se cada vez mais exigente e procura produtos que apresentem boa qualidade sensorial, nutricional e sejam de baixo custo.

A desidratação osmótica é um processo alternativo de preservação e manutenção das qualidades nutricionais dos produtos agrícolas. Sua vantagem é incorporar solutos e retirar a água do alimento, criando um meio desfavorável às reações enzimáticas e ao crescimento biológico. Por diminuir o tempo de secagem e melhorar algumas

características do produto, essa técnica é muito utilizada em processos combinados, como pré-tratamento ao processo de secagem de frutas e vegetais.

É nesse sentido que se encaminha o presente trabalho. Focando-se no processo de transformação da banana, sua finalidade é contribuir para a adoção de novas tecnologias de processamento. Parte-se do princípio de que a aplicação de microondas na secagem de produtos agrícolas acelera a cinética de secagem e, se bem controlada, o produto seco pode atingir qualidade superior àquela obtida pelos métodos convencionais.

A banana apresenta, em geral, duas taxas de secagem decrescentes, com umidade crítica próxima de 0,67kg_a/kg_{ms}. Dessa forma acredita-se que a aplicação de microondas de forma diferenciada nesses dois períodos pode trazer vantagens tanto para a aceleração do processo de secagem, tornando-a mais econômica, como para a qualidade do produto seco.

Em síntese, a proposta deste trabalho é expor os resultados da pesquisa desenvolvida sobre a exploração do processo de secagem por convecção a ar quente combinado com energia de microondas. A aplicação desse tipo de energia foi dividida em estágios para complementar o processo de desidratação osmótica de frutas de uma forma mais eficiente e econômica do que outros processos de conservação, como os secadores a ar quente convencionais. Buscou-se, assim, abreviar o tempo global de obtenção de um produto seco final e conservar, em sua maioria, as características originais da fruta *in natura*.

No Capítulo 2 expõe-se a revisão da literatura sobre os temas explorados: descrição geral da matéria-prima; como funciona o aquecimento por microondas e quais os fenômenos nele envolvidos; princípios de secagem por convecção e com aplicação de microondas e quais modelos descrevem os fenômenos da secagem; descrição da

desidratação osmótica e como ela altera o material quando submetido à secagem e, por fim, quais alterações são sofridas pelos materiais submetidos à secagem.

No Capítulo 3 apresentam-se os resultados de uma investigação sobre a influência da aplicação de microondas combinada com a convecção por ar quente no processo de secagem de banana pré-desidratada osmoticamente. O processo de secagem foi dividido em três fases, com aplicação de potências distintas em cada uma, sendo que na última foram testadas 4 intensidades de potência distintas. As duas fases iniciais, I e II, compreenderam o primeiro período de taxa de secagem decrescente e a última, denominada fase III, compreendeu o segundo período de taxa decrescente. Foram avaliadas também as influências da temperatura e da velocidade do ar. O estudo foi desenvolvido em uma cavidade ressonante sem movimentação da carga, projetada para a secagem de frutas com capacidade para até um quilograma.

O Capítulo 4 consiste na apresentação dos resultados do estudo da influência da potência de microondas aplicada e do tempo de pré-tratamento osmótico na cinética da fase inicial de secagem de banana sob condições fixas do ar de secagem. Os objetivos nesta parte da pesquisa foram: encontrar as melhores condições de potência aplicada e do pré-tratamento osmótico durante o primeiro período da secagem de banana, com relação ao tempo de secagem e aos parâmetros de qualidade, caracterizados como porosidade, encolhimento e capacidade de reidratação, e determinar as constantes de secagem por modelos matemáticos empíricos.

O Capítulo 5 é dedicado ao estudo da combinação das condições mais favoráveis encontradas nos capítulos anteriores para obtenção de um produto seco com $0{,}18 kg_a/kg_{ms}$ com aplicação de potência de microondas diferenciada em cada estágio, utilizando uma cavidade ressonante com movimentação do material. Nessa etapa do trabalho, foram

determinadas separadamente as difusividades efetivas para cada estágio, com o objetivo de contribuir para futuros estudos sobre o desenho de equipamentos, considerando diferentes seções de acordo com as necessidades do processo.

O Capítulo 6 apresenta considerações gerais, englobando os três capítulos experimentais citados anteriormente.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

2.1 Banana

A banana (*Musa* spp.) é originária do Continente Asiático e, atualmente, vem sendo explorada na maioria dos países tropicais. A cultura dessa fruta, que é uma "commodity" mundial, tem sua produção situada em quarto lugar depois das culturas de arroz, trigo e amido de milho. O país que mais cultiva essa fruta é a Índia, atingindo 16,8 milhões de toneladas em 2005. A produção brasileira está entre as maiores do mundo, sendo responsável por aproximadamente 10% da produção mundial (6,7 milhões de toneladas em 2005). Dentro do contexto nacional, essa fruta é extremamente importante, pois é a segunda mais cultivada depois das cítricas. No entanto, a produtividade nacional é baixa em comparação à dos países líderes do mercado mundial (MATTHIESEN & BOTEON, 2003; FAO, 2005).

O Brasil representa apenas 0,5% do comércio mundial de exportação dessa cultura, que é liderado pelo Equador com 30% desse mercado. As exportações nacionais são inibidas pelo alto consumo interno, uma vez que o Brasil é o maior consumidor de banana, e também pela desqualificação das frutas para o mercado internacional. Da produção nacional em 2005, apenas 211,7 mil toneladas foram destinadas à exportação (FAO, 2005).

Apesar do grande número de variedades existentes no Brasil, são poucas as que apresentam potencial agronômico para exploração comercial, de acordo com os atributos de alta produtividade, ou seja, tolerância a pragas e doenças, porte reduzido, resistência ao frio

e à seca. Adicionalmente, as variedades com características para exportação são ainda mais reduzidas. Aquelas que satisfazem os requisitos deste mercado são as cultivares do grupo AAA, subgrupo Cavendish e Gros Michel (SILVA, 1995). A variedade Cavendish é responsável por 47% e a Gros Michel por 12% da produção mundial (ARIAS et al., 2003). Como pode ser observado na Figura 2.1, o Brasil fica em 5º lugar na classificação dos países produtores da variedade Cavendish, empatando com a Costa Rica com 5% da produção mundial. Vale ressaltar que essa variedade é a mais indicada para a industrialização.

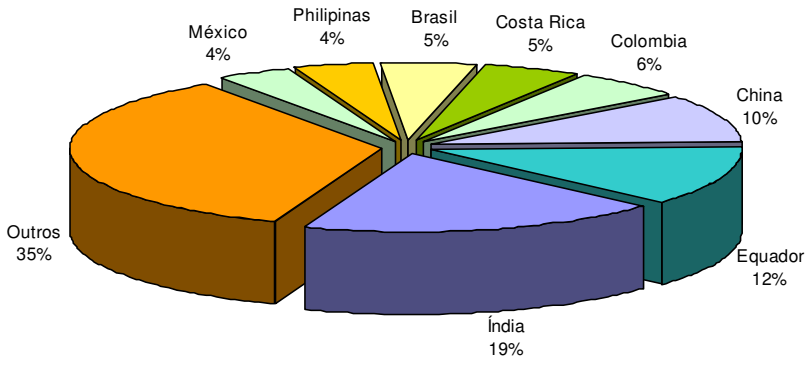


Figura 2.1- Ilustração da classificação dos países produtores de banana da variedade Cavendish (ARIAS *et al*. 2003).

A banana é um componente constante na dieta dos brasileiros, inclusive os de baixa renda, em virtude de suas características sensoriais, o seu alto valor nutritivo, praticidade de consumo e baixo custo. Apenas um fruto de banana pode conter um valor energético de 380kJ, além de fornecer quantidades significativas de vitaminas A, B e C, potássio e outros minerais, como sódio e fósforo (DANTAS E SOARES FILHO, 1995; TACO, 2006). A

Tabela 2.1 apresenta as características físicas e a composição química média da banana nanica madura.

Tabela 2.1- Composição química da polpa de banana nanica madura *in natura*

Composição química	1	2
Umidade (g/100g)	74,12	74
Amido (g/100g)	2,95	--
Glicose (g/100g)	13,44	--
Sacarose (g/100g)	5,72	--
Carboidrato (g/100g)	--	23,8
Lipídios (g/100g)	0,90	0,1
Proteína (g/100g)	1,31	1,4
Celulose (g/100g)	0,32	--
Taninos (g/100g)	0,63	--
Vitamina C (mg/100g)	--	5,9
Cinzas (g/100g)	0,61	0,8
Potássio (mg/100g)	--	376

Fonte: 1 - MEDINA (1985); 2 - TACO (2006).

As transformações que ocorrem na fruta durante todo o processo de maturação afetam constituintes como amido, açúcares, ácidos, ácido ascórbico, umidade, entre outros. Uma das mudanças bioquímicas mais importantes que ocorre durante o amadurecimento é a hidrólise do amido. Os açúcares solúveis provenientes dessa reação tornam a fruta mais macia e saborosa. O amolecimento da massa sólida da fruta, rica em amido quando verde, também é conseqüência da transformação da protopectina, principal componente da membrana celular, em pectina solúvel pela ação de enzimas. Na fruta madura, o pH varia de 4,4 a 4,6 (MATSUURA et al., 1999), a acidez de 0,22% a 0,57% de ácido málico (CHITARRA E CHITARRA, 1994), o teor de amido de 0,9% até 7% (MOTA et al., 1997), enquanto os sólidos solúveis totais podem atingir teores até de 28% (MATSUURA et al., 2002).

O tempo de duração da fruta *in natura* é curto devido à sua alta taxa respiratória durante a maturação, mesmo após a colheita, e, como conseqüência, as perdas na produção são consideráveis. Segundo ALVES et. al (1999), entre 30 e 40% das frutas colhidas podem ser perdidas no transporte, comercialização e maturação.

Dessa forma, a implantação de métodos de transformação dessa matéria-prima se torna interessante porque favorece o aproveitamento do excesso de produção e a redução das perdas e possibilita a agregação de valor ao material primário. Diversos são os produtos que podem ser obtidos a partir da banana: farinha de banana, polpa, suco, fruta em calda, doce de massa (mais conhecido como bananada), produtos desidratados (banana liofilizada, banana passa), bala e doces diversos.

A desidratação, que consiste na remoção completa ou parcial de água, é uma das técnicas mais empregadas para a preservação de produtos perecíveis, como as frutas. A produção de banana passa (ou banana seca) ocorre no Brasil ainda de forma precária, em geral em pequenas indústrias caseiras, e caracteriza-se pela utilização de técnicas rudimentares.

Alguns trabalhos encontrados na literatura indicam a viabilidade econômica da produção e comercialização principalmente de banana passa em face de outros produtos dessa fruta (BITTENCOURT, 2001; BITTENCOURT, et al., 2004). Em vários trabalhos científicos cujo tema é a secagem para obtenção de banana passa (ou banana seca) tenta-se esclarecer e fornecer dados tanto sobre condições mais adequadas de processo e sobre as alterações nas características do produto. Dentre os métodos de secagem estudados, citam-se a secagem por convecção com ar quente, convecção combinada com microondas, vácuo combinado com microondas, além da combinação desses métodos com um pré-tratamento osmótico. Uma revisão mais completa desses trabalhos será abordada no item 2.4.

2.2 Microondas

A radiação é uma forma de energia que se propaga como uma onda eletromagnética. Dentro do espectro eletromagnético, a radiação de microondas é aquela caracterizada pelo intervalo de freqüências entre 300MHz e 300GHz (Figura 2.2). Ela se propaga através de objetos e pode apresentar fenômenos de reflexão, transmissão e absorção. As microondas são refletidas por superfícies metálicas (condutores) e refratadas por materiais dielétricos (pouco condutores). A propriedade intrínseca mais importante dessa forma de energia para a tecnologia de alimentos é a absorção volumétrica por materiais dielétricos, em forma de calor (ENGELDER & BUFFLER, 1991). Esta propriedade resulta em tempos de processamento mais curtos, maior rendimento do produto final e, usualmente, em qualidade superior à encontrada mediante técnicas convencionais do processamento (DECAREAU & PETERSON, 1986).

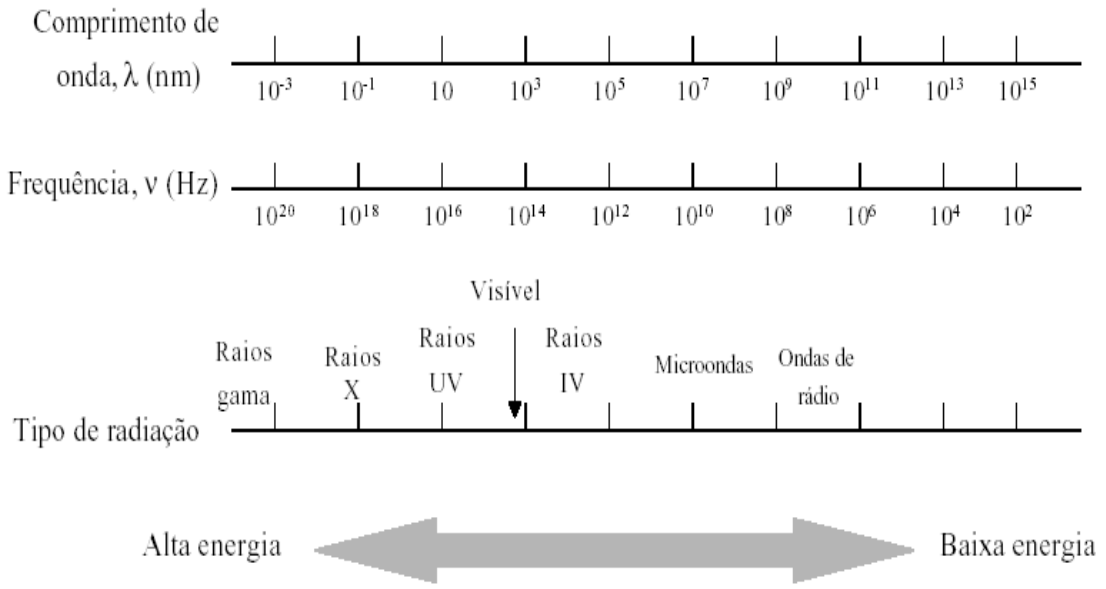


Figura 2.2 – Espectro eletromagnético (DATTA, 2001).

Um sistema de aplicação de energia de microondas é composto basicamente por componentes de geração da energia em uma determinada freqüência e de condução da mesma para um aplicador, no qual a potência pode ser dissipada no produto a ser aquecido.

A Figura 2.3 apresenta um esquema geral de um sistema de aquecimento por microondas. As partes principais de constituição deste sistema são descritas a seguir.

Sistema de geração de microondas - é composto pela fonte de alimentação que fornece as tensões e correntes necessárias para alimentar o gerador de microondas. O gerador é um oscilador que converte a potência fornecida pela fonte em energia nas freqüências de microondas. As freqüências mais utilizadas em eletrotermia industrial e doméstica são de 2,45 e 0,915 GHz e o oscilador mais usual é o do tipo magnetron.

Sistema de transmissão de microondas - a energia gerada pelo oscilador pode ser transferida de forma guiada por meio da propagação do campo eletromagnético em forma de onda eletromagnética em tubos metálicos altamente condutivos. As ondas são refletidas nas paredes metálicas do guia, apresentando uma distribuição de campos elétricos de maior intensidade no guia e campo elétrico zero nas paredes.

Sistema de aplicação - o aplicador, normalmente denominado cavidade, é um volume limitado por paredes metálicas no interior do qual se processa a interação entre o material dielétrico e a energia de microondas. O campo elétrico dentro de uma cavidade apresenta inúmeras reflexões nas suas paredes metálicas, de maneira que proporciona uma propagação de múltiplos modos na distribuição do campo eletromagnético no seu interior. Essa característica é uma das principais vilãs do aquecimento por microondas, pois as reflexões múltiplas promovem o fenômeno de interferência e apresentam como resultado regiões de maiores e de menores intensidades de campo eletromagnético no espaço. A

variação da intensidade de campo é estacionária no espaço e, portanto, é denominada padrão de onda estacionária. A razão de voltagem de onda estacionária (ROE) apresenta a relação entre as intensidades de campo elétrico máxima e mínima e é uma medida utilizada para verificação da reflexão da potência incidente pela carga. Isto porque o coeficiente de reflexão Γ pode ser expresso em função da ROE como:

$$\Gamma = \left|(ROE - 1)\right| / \left|(ROE + 1)\right| \qquad \text{Eq. 2-1}$$

Caso não haja reflexão (Γ = 0), o valor da ROE torna-se um, ou seja, a carga é dita casada com o guia de onda.

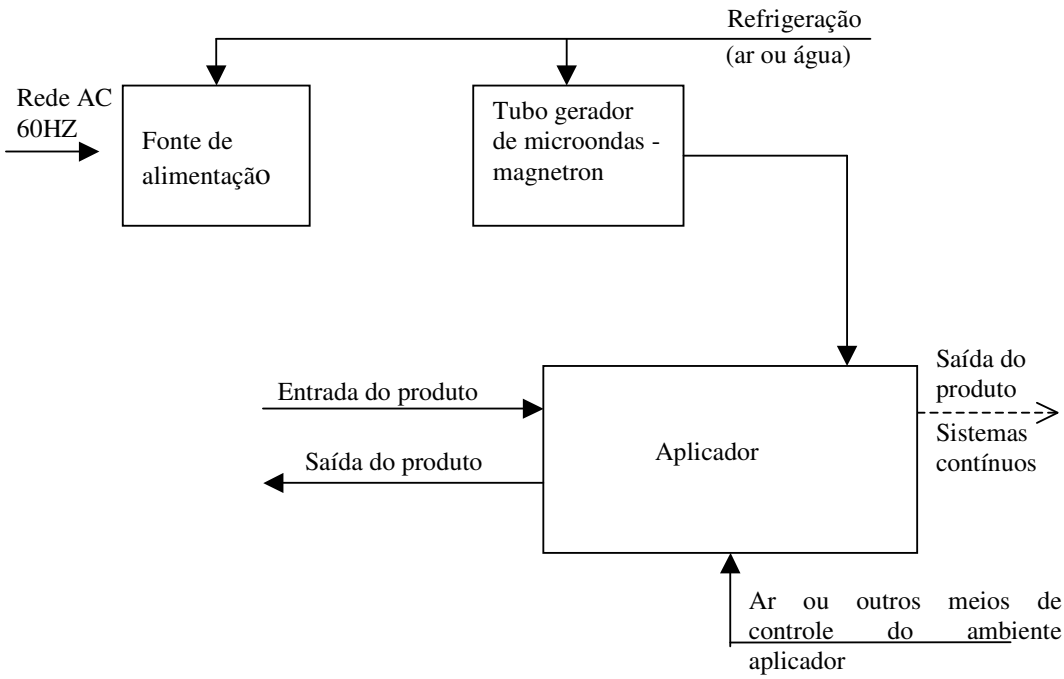


Figura 2.3 – Diagrama de um sistema genérico de aquecimento por microondas (MARSAIOLI, 1991).

Sistemas de movimentação da carga ou agitadores de campo (refletores metálicos giratórios) são utilizados, em geral, para minimizar os problemas de aquecimento heterogêneo causado pela formação de ondas estacionárias dentro das cavidades. A Figura 2.4 ilustra, por meio de uma descarga luminosa em um gás rarefeito, a visualização do fenômeno da interferência das microondas dentro de um forno. Nessa figura, são observadas zonas de reforço contrastando com zonas adjacentes de anulação da intensidade de campo elétrico.

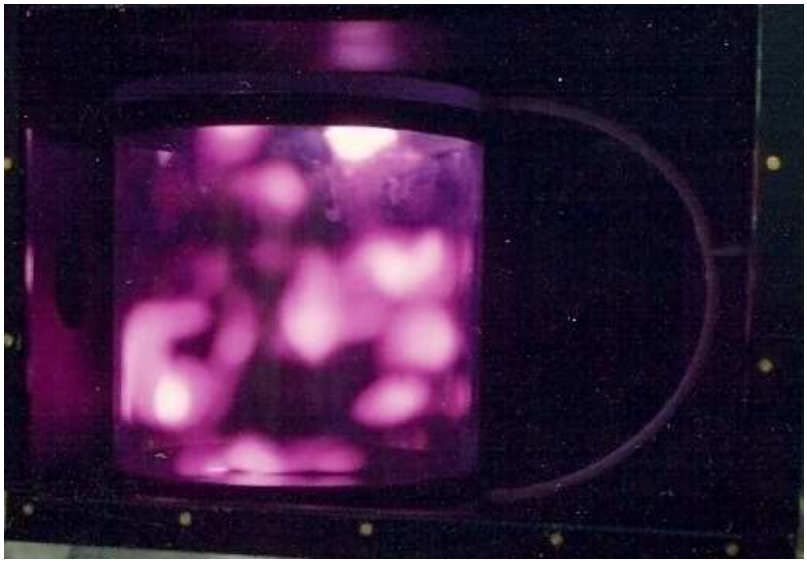


Figura 2.4 – Visualização da distribuição do campo elétrico em uma cavidade aplicadora de microondas (MARSAIOLI, 1991)

2.2.1 Mecanismos de aquecimento por microondas

As freqüências de microondas normalmente utilizadas no processamento industrial dos alimentos (915 e 2450 MHz) promovem interações entre os constituintes químicos dos

alimentos e o campo eletromagnético, gerando aquecimento instantâneo dentro do produto. Portanto, a utilização da energia de microondas soluciona alguns dos problemas enfrentados nos processos de aquecimento convencional. Neste último, a transferência de calor ocorre por meio da condução de energia da superfície do material para o seu interior. Por outro lado, as microondas, por meio da fricção intermolecular causada principalmente por rotação dipolar de moléculas polares, geram calor internamente ao material. Dessa forma, proporcionam gradiente de calor menos acentuado (CAMPOS, 1986).

Esse aquecimento deve-se inicialmente à ruptura das pontes de hidrogênio fracas associada com a rotação dos dipolos de moléculas de água livre e com a migração eletroforética de sais livres, em um campo elétrico de polaridade rapidamente variável. Portanto, os constituintes iônicos aquosos e polares dos alimentos e seus constituintes sólidos associados têm influência direta sobre como o aquecimento será conduzido (MARSAIOLI, 1991).

Os fenômenos básicos envolvidos no aquecimento por microondas são: o acoplamento da energia de um campo eletromagnético pelo produto e a atenuação da absorção da energia dentro do mesmo. As características do aquecimento de material, por sua vez, estão relacionadas não somente com as suas propriedades dielétricas, como também às propriedades de transmissão peculiares aos processos de aquecimento dielétrico e às propriedades térmicas e de transporte que afetam as transferências de calor e massa. A absorção volumétrica de potência (P_v) é proporcional à freqüência (f), ao fator de perdas dielétricas (κ'') e ao campo elétrico local (E):

$$P_V = \sigma E^2 = 2\pi f \kappa'' E^2 \qquad \text{Eq. 2-2}$$

sendo que

κ'' = fator de perdas dielétricas = $\varepsilon'' \varepsilon_0$, (F/m)

ε” = fator de perdas dielétricas relativo;

ε_0 = permissividade dielétrica do ar (F/m).

A taxa de elevação de temperatura do material, no aquecimento por microondas, é geralmente descrita pela relação

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_V}{\rho c_P} \qquad \text{Eq. 2-3}$$

onde

T = temperatura do material no tempo t, em K;

c_p = calor específico (J/ kg K);

ρ = densidade (kg/m^3).

Atualmente, uma das principais metas das pesquisas sobre as propriedades dielétricas dos alimentos é determinar mecanismos de interação entre os alimentos e a energia eletromagnética nas freqüências de microondas, para facilitar o desenvolvimento de processos e produtos alimentícios. Essas propriedades determinam a quantidade de energia acoplada por um produto alimentício, sua distribuição dentro do produto e, conseqüentemente, o tempo e a freqüência das microondas necessárias para o aquecimento dos alimentos em processos de transferência de energia por condução e radiação (MUDGETT, 1986).

SACHAROW & SCHIFFMANN (1992) destacam que as microondas podem produzir alimentos com melhor sabor, assim como manter os componentes nutricionais em níveis maiores do que outros tipos de tratamento térmico, especialmente por prevenir lixiviação dos nutrientes.

2.2.2 Propriedades dielétricas

As propriedades dielétricas afetam diretamente o mecanismo de interação entre o material e campo elétrico aplicado e é caracterizada pela permissividade complexa relativa (ε^*), que determina o armazenamento e a dissipação da energia elétrica. A parte real (ε'), constante dielétrica relativa, determina a capacidade de um material armazenar energia elétrica, por unidade de volume, e a parte imaginária (ε''), fator de perdas dielétricas relativo, indica a capacidade do material de dissipar energia elétrica na forma de calor, sendo definidas da seguinte maneira:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \qquad \text{Eq. 2-4}$$

$$\varepsilon^* = \left|\varepsilon^*\right| \cdot e^{-j\delta} \qquad \text{Eq. 2-5}$$

A tangente de perdas ou fator de dissipação, $\tan\delta$, que indica a capacidade do material para ser penetrado por um campo elétrico e para dissipar essa energia na forma de calor, é expressa pela equação:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \qquad \text{Eq. 2-6}$$

Desde que a energia eletromagnética penetre no material dielétrico, ocorre a transformação em calor por um conjunto de mecanismos em escala molecular e atômica, entre os quais se sobressaem a condução iônica e a rotação dipolar.

Um material dielétrico pode ser definido como aquele que interage com um campo elétrico, porque contém portadores de cargas que podem ser deslocados. Como todos os materiais, um material dielétrico compõe-se de um núcleo atômico positivo envolto por uma nuvem eletrônica negativa. Assim, quando um campo elétrico externo é aplicado, os elétrons são levemente deslocados com respeito ao núcleo e então momentos dipolos são

induzidos, causando o fenômeno conhecido como polarização eletrônica dos materiais. Em materiais dielétricos, as cargas locais se movem em resposta a um campo elétrico aplicado. Os materiais apresentam carga livre e carga ligada e o movimento das cargas ligadas resulta em polarização das mesmas. A polarização de cargas elétricas, na qual o movimento translacional é restrito, ou a rotação molecular, na qual o movimento rotacional é restrito, resultam em um retardo entre o campo elétrico e a polarização. O vetor polarização retarda-se em relação ao campo elétrico aplicado, fazendo com que a corrente resultante tenha um componente em fase com o campo elétrico aplicado, resultando na dissipação de potência dentro do material. Esse tempo de retardo é conhecido como tempo de relaxação e ocorre por causa da dissipação de energia na forma de energia térmica no material (JONES, 1986; THOSTENSON & CHOU, 1999; MARSAIOLI, 2001).

As propriedades dielétricas são dependentes da freqüência do campo aplicado, da temperatura, da composição e da estrutura do material. Portanto, no caso de alimentos, essa propriedade é fortemente afetada pelo teor de água e pela estrutura do material, como porosidade e volume dos poros. A absorção preferencial das microondas, pelas moléculas de água, promove um aquecimento focalizado, o que torna a aplicação dessa fonte de energia interessante em processo de secagem de alimentos, por exemplo.

Segundo MUDGETT (1986), materiais biológicos agem como maus isoladores, isto é, como capacitores não ideais, em termos de sua habilidade para armazenar e dissipar energia elétrica de uma aplicação de campo eletromagnético para transferência por irradiação. SENISE (1985) relata que as radiofreqüências e as microondas são empregadas para o aquecimento de materiais dielétricos (maus condutores elétricos), como os alimentos, que, geralmente, também são maus condutores térmicos.

Em sua grande maioria, as aplicações de radiofreqüência e microondas na indústria relacionam-se com a água. A água, no estado líquido, está incluída entre os dielétricos com valores mais elevados de ε' e tan δ, o que permite dizer que materiais com água são "fáceis de aquecer" por microondas.

Quando as propriedades dielétricas de um produto alimentício são consideradas como um todo, três mecanismos estruturais que ocorrem em diferentes níveis contribuem para o comportamento dielétrico. O primeiro mecanismo ocorre pela interação com a matriz aquosa, que contém colóides ou sais dissolvidos, metabólitos, enzimas, açúcares, ácidos nucléicos, e organelas incluindo materiais de reserva, como amido ou glicogênio. Um segundo mecanismo ocorre na região próxima de paredes e membranas celulares. Essas são carregadas por ionização da superfície e arredores por uma camada de íons de carga oposta. As membranas contêm lipídios e proteínas e a permeabilidade dos mesmos está sujeita ao controle bioquímico. O terceiro ocorre na região extracelular na qual a água extracelular contém sal, nutrientes e outros produtos. (PONNE & BARTELS, 1995).

A profundidade de penetração (d_p) é definida como a distância na qual 63% da potência de microondas aplicada é absorvida e está associada com as propriedades dielétricas do material e com o comprimento de onda no espaço vazio (λ_0) do campo eletromagnético aplicado de acordo com a equação:

$$d_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{2\varepsilon'}}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2}-1\right]^{-1/2} \qquad \text{Eq. 2-7}$$

A extensão na penetração das microondas no interior do material influencia os fenômenos de reflexão, refração e absorção do material, os quais, por sua vez, determinam,

juntamente com outros fatores, os perfis de temperatura dentro do material (DIBBEN, 2001).

A distribuição do aquecimento por microondas pode ser alterada de acordo com a geometria, tamanho, volume e composição do material, sendo que esta última está diretamente relacionada com a permissividade dielétrica do mesmo. Vários são os autores que apresentam estudos sobre a distribuição de temperatura e potência absorvida por materiais alimentícios para diferentes geometrias (REMMEN et. al, 1996; KHRAISHEH et. al, 1997a; YANG & GUNASEKARAN, 2004; RYYNÄNEN et. al, 2004).

Objetos cilíndricos e esféricos menores (da ordem de 3 a 4 mm) apresentam densidade de potência volumétrica absorvida maior e aquecimento mais centralizado, ao passo que objetos retangulares apresentam superaquecimento nos cantos e arestas (OHLSSON & RISMAN, 1978; YANG & GUNASEKARAN, 2004; RYYNÄNEN et. al, 2004).

2.3 Desidratação Osmótica

O processo de desidratação osmótica tem ganhado popularidade como uma etapa complementar na cadeia de processamento integrado de alimentos, devido às suas vantagens em termos energéticos e de qualidade do produto. É uma técnica utilizada para concentrar e desidratar parcialmente frutas e vegetais de forma branda e sem mudança de fases. Adicionalmente, outra aplicação, associada com a desidratação, é a redução da atividade de água dos alimentos com conseqüente inibição do crescimento microbiano (RASTOGI et al., 2002).

O processo de desidratação osmótica consiste na imersão de um alimento fatiado ou inteiro em uma solução hipertônica de açúcar, sal, sorbitol, glicerol, entre outros, havendo, assim, uma transferência simultânea de soluto da solução para a amostra e de água da amostra para o meio, através da membrana celular. Essa transferência é gerada pela diferença de potencial criado pelo meio osmótico (RAOULT-WACK et al., 1994). Há, em segundo plano, uma transferência de sólidos naturais da fruta (açúcares, minerais e nutrientes) para a solução. Embora esse fluxo seja de caráter secundário em termos quantitativos, é de primordial importância para a qualidade sensorial e nutritiva do produto final. Este fenômeno de transferência de massa é fortemente afetado tanto pela natureza da matéria-prima quanto pelas variáveis do processo: pré-tratamento da matéria-prima, natureza, composição e concentração de soluto, relação meio/produto, agitação do meio, temperatura, superfície e tempo de contato do processo (TORREGIANI, 1993; LAZARIDES et al., 1997).

Um importante aspecto do processo de desidratação osmótica, em face de outros métodos de desidratação, é a seletividade da incorporação de solutos. A membrana e a parede celular podem influenciar o fenômeno de transferência de massa. A redução de peso, devido à relação entre perda de água e ganho de sólidos, ocorre em função da ação específica de membranas da célula.

A transferência de massa, durante o tratamento osmótico, ocorre através da parede celular semipermeável presente nos materiais biológicos, que oferece uma resistência dominante no processamento. A membrana celular pode mudar do estado semipermeável para totalmente permeável, acarretando mudanças significativas na estrutura do tecido. Durante o processo de troca osmótica, a “frente” de desidratação se move da superfície que

está em contato com a solução hipertônica para o centro do material e o "stress" osmótico associado resulta na desintegração celular.

A cinética de desidratação osmótica pode ser estudada através dos cálculos realizados por balanço de massa de perda de água (PA), ganho de sólidos (GS) e perda de peso (PP), sofridos pelo material durante o processamento, de acordo com as equações:

$$PA(\%) = 100 \times \frac{(Wa_0 - Wa_t)}{W_0} \qquad \text{Eq. 2-8}$$

$$GS(\%) = 100 \times \frac{(Ws_t - Ws_0)}{W_0} \qquad \text{Eq. 2-9}$$

$$PP(\%) = PA - GS \qquad \text{Eq. 2-10}$$

em que:

Wa_0 = massa de água do material inicial (t=0);

Wa_t = massa de água do material no tempo t;

Ws_0 = massa de sólidos do material inicial (t=0);

Ws_0 = massa de sólidos do material no tempo t;

W_0 = massa do material inicial.

Vários autores estudaram o efeito das condições da desidratação osmótica na cinética de perda de água e ganho de sólidos e na estrutura celular em banana. MAURO & MENEGALLI (1995) e ARAÚJO (2000) afirmam que as difusividades da água e da sacarose diminuem com o incremento da concentração da solução, mas aumentam com o aumento da temperatura. De acordo com ANTONIO (2002), amostras de banana cortadas em placas desidratadas a 60°C mostraram rompimento da parede e membrana celular e conseqüente perda de seletividade durante a troca osmótica.

SACCHETTI et al. (2001) estudaram, mediante o emprego da metodologia de superfície de resposta, o efeito da concentração de açúcar (44,6 a 64,6%p/p) e de sal (0,0 a 2,0%p/p) sobre a concentração de equilíbrio de sólidos em maçãs submetidas à desidratação osmótica e constataram que havia um efeito negativo entre eles, ou seja, a concentração de sólidos no produto em equilíbrio era diminuída quando se utilizava a solução ternária (açúcar, sal e água).

PANADÉS et al. (2003) também utilizaram a metodologia da superfície de resposta para avaliar a influência da temperatura da solução (30, 40, 50ºC), tempo de processo (120 a 180 min) e pressão do sistema (pressão atmosférica, vácuo pulsado e vácuo contínuo) na qualidade sensorial de goiaba desidratada osmoticamente. Essas três variáveis estudadas mostraram-se influentes no sabor do produto desidratado, mas nenhuma mostrou efeito na cor e firmeza da fruta. A melhor amostra verificada foi tratada a 40ºC por 60 minutos no sistema de vácuo pulsado e a análise micro-estrutural da mesma não mostrou alteração das paredes celulares.

A desidratação osmótica, seguida de uma secagem com ar quente, liofilização, congelamento ou outro processo de conservação, é um processo que tem sido empregado na produção de frutas desidratadas e parcialmente desidratadas. Vários pesquisadores constataram que este processo em alimentos diminui consideravelmente o tempo de secagem, melhora as características finais do produto e viabiliza a utilização de frutas que apresentam acidez elevada para serem consumidas como frutas de mesa, pois torna o produto mais aceitável sensorialmente (MAZZA & LEMAGUER, 1980; SKILIUTAS, 2002, SILVEIRA, et. al., 1984).

KROKIDA et al. (2000) afirmam que processos de desidratação de frutas utilizando soluções de açúcares ajudam na manutenção da coloração das mesmas. Nesse trabalho, foi

estudada a influência do pré-tratamento osmótico na cor de maçãs e bananas submetidos à secagem e foi verificado que as reações de escurecimento das frutas durante a secagem foram inibidas pela desidratação osmótica.

Frutas desidratadas osmoticamente com solução de sacarose apresentam fatores de perdas (ε'') menores e profundidades de penetração (d_p) de um campo eletromagnético maiores em relação àqueles da fruta *in natura.* No caso da utilização de soluções salinas, o efeito é contrário, há um aumento dos fatores de perdas e diminuição das profundidades de penetração do material desidratado em relação àquele que não sofreu nenhum tratamento. Portanto, pode-se melhorar o desempenho do processo de secagem subseqüente por meio da modificação nas características dielétricas do alimento obtidas pela desidratação osmótica (DE LOS REYES et al., 2007; HEREDIA et al., 2007).

2.4 Secagem

O processo de secagem é uma das operações unitárias mais antigas realizada pelo homem. Os alimentos são desidratados ou secos visando atender a vários propósitos, tais como: preservação contra deterioração; conservação de suas condições durante estocagem; diminuição dos custos e dificuldade de acondicionamento, manipulação, armazenamento e transporte do material. O princípio dessa técnica, de maneira simplificada, consiste na remoção de umidade de um material por evaporação.

As mudanças do conteúdo de umidade e da temperatura de um material submetido à secagem são controladas pelas transferências de calor e massa entre a sua superfície, a sua vizinhança e o seu interior. A taxa de evaporação de água é determinada pelas condições dos parâmetros do processo: temperatura, umidade, pressão e/ou velocidade do ar.

Conjuntamente, a composição e a estrutura do alimento também influenciam no movimento da umidade que está sendo removida (WALLACE & VAN ARSDEL, 1964, STRUMILO & KUDRA, 1986; SINGH & HELDMAN, 2001).

A secagem consiste no processo de transferência simultânea de calor e de massa, englobando os fenômenos de migração e evaporação de umidade, ou seja, é acompanhado por mudança de fase. Inicialmente, uma quantidade de umidade é retirada através do calor latente de evaporação, por uma fonte de calor, resultando em uma evaporação de água da superfície do material para o ar ambiente e na difusão de umidade, que ocorre por um gradiente de concentração entre o interior do alimento e a superfície (AL-DURI & MC INTYRE, 1992; PARK, 2001).

Os principais mecanismos de transferência de massa de água do interior do alimento (sólido) até a superfície são (STRUMILO & KUDRA, 1986; PARK, 2001):

- difusão líquida que ocorre devido ao gradiente de concentração;
- difusão de vapor que ocorre devido ao gradiente de pressão parcial de vapor, causado pelo gradiente de temperatura;
- fluxo de líquido e de vapor que ocorre devido à diferença de pressão total (causada pela pressão externa), de concentração, capilaridade, encolhimento e altas temperaturas.

Em geral, a secagem engloba três etapas distintas que são esquematicamente definidas de acordo com a evolução das transferências de calor e de massa ao longo do processo:

1) período de indução (ou período até entrar em regime operacional) que ocorre no início, quando o produto se encontra numa temperatura inferior à do ar de

entrada e, conseqüentemente, a transferência de massa e a velocidade de secagem são pequenas;

2) período de taxa constante de secagem no qual a água é evaporada em forma de água livre e as transferências de calor e de massa se compensam;
3) período de taxa decrescente de secagem quando o teor de água na superfície do produto começa a ser deficiente e a velocidade de secagem diminui (PARK, 2001).

A secagem de banana por convecção a ar quente tem sido amplamente estudada ao longo dos anos por parte da comunidade científica. De acordo com alguns autores, a curva de taxa de secagem de banana apresenta dois períodos de taxa de secagem decrescentes, com umidade crítica de transição próxima de 0,4 kg_a/kg. Comparativamente a outras frutas, a banana apresenta uma secagem mais lenta, provavelmente pela sua composição físico-química e estrutural (SANKAT et al., 1996; DEMIREL & TURHAN, 2003; BAINI & LANGRISH, 2006). O tempo de secagem da banana, até a obtenção da umidade de equilíbrio, pode chegar até 30 horas, mesmo para temperaturas de 70°C, que é uma temperatura limite para a secagem dessa fruta. Para a secagem em temperaturas inferiores, o tempo do processo pode chegar a 120 horas (LIMA et al., 2002).

A taxa de secagem aumentou com o aumento da temperatura do ar de secagem até 70°C e diminuiu para fluxo de ar a 80°C. SANKAT et al. (1996) relacionaram essa tendência com o "fenômeno" do endurecimento superficial. Durante a secagem a altas temperaturas, o endurecimento é esperado para alimentos que contenham solutos dissolvidos em altas concentrações, como a banana. No caso de materiais que foram submetidos a um pré-tratamento (como branqueamento/inativação enzimática,

congelamento, etc.) o decréscimo da taxa de secagem pode ocorrer mesmo a 70°C. Nesses casos, adicionalmente ao endurecimento superficial, pode ocorrer uma rápida gelatinização do amido na superfície da fruta, que ocorre a aproximadamente 65°C. A taxa de secagem é alta inicialmente o que, provavelmente, provoca ruptura da estrutura celular e, como conseqüência, os grânulos de amido são liberados nos espaços intercelulares. Quando o material atinge 65°C, o amido muda para o estado gelatinoso e aumenta de volume. Isso causa uma diminuição da porosidade do material com conseqüente diminuição da taxa de transferência de água, promovendo o endurecimento superficial (DEMIREL & TURHAN, 2003).

A realização de desidratação osmótica com soluções de açúcares promove uma redução na difusão de água, o que significa uma redução na taxa de secagem, mas promove uma melhoria na textura e na cor da fruta seca (SANKAT et al., 1996; ARAÚJO, 2000; FERNANDES et al., 2005). A época de colheita influencia de forma marcante a cinética de secagem, em razão da variação no conteúdo de umidade inicial, ao passo que a influência do grau de maturação das frutas não é muito grande (NGUYEN & PRICE, 2006). Pré-tratamentos, como branqueamento, resfriamento e congelamento, também podem ser aplicados para melhorar a taxa de secagem de banana (DANDAMRONGRAK, et al., 2002).

A secagem por convecção com ar quente de produtos alimentícios é amplamente empregada em processos industriais; no entanto, os avanços mais recentes dessa tecnologia incluem a utilização de vácuo, fluidização com alto vácuo, dentre outras técnicas, assim como a aplicação de freqüências de microondas e de rádio como fontes energéticas.

Uma das maiores desvantagens do processo convencional de secagem de alimentos e materiais biológicos por convecção forçada com ar quente é a baixa eficiência energética

causada pelo longo período de taxa decrescente de secagem, cujas causas são a baixa condutividade térmica dos materiais biológicos em geral e a alta resistência interna à transferência de água. Nessa etapa do processamento, a transferência de calor nas seções mais internas desses materiais durante o processo de aquecimento é baixa (ADU & OTTEN, 1996; FENG & TANG, 1998). O desejo de eliminar esses problemas e a manutenção das propriedades nutritivas e sensoriais do produto, além de um rápido e eficiente processo térmico têm provocado o aumento do uso da energia das microondas no processamento de materiais biológicos, especificamente no processo de secagem. Como já foi afirmado, uma das vantagens das microondas é a absorção diferenciada pelas moléculas de água, facilitando o transporte das mesmas das regiões mais úmidas para as mais secas.

2.4.1 Secagem com aplicação de microondas

A utilização de microondas soluciona alguns dos problemas enfrentados nos processos de aquecimento convencional. Neste último, a transferência de calor ocorre por meio da condução de energia da superfície do material para o seu interior. Por outro lado, as microondas, por meio da fricção intermolecular causada principalmente por rotação dipolar de moléculas polares, geram calor internamente ao material. Dessa forma, proporciona gradiente de calor menos acentuado e temperatura mais uniforme através de todo o material e as condições convectivas externas provenientes do ar aquecido são necessárias apenas para o arraste do vapor de água gerado internamente (CAMPOS, 1986). O gradiente térmico e de umidade estão na mesma direção.

Portanto, a secagem por microondas é rápida, mais uniforme (em termos da absorção diferenciada pelas regiões mais úmidas) e eficiente energeticamente[1], em comparação ao processo convencional; a remoção de umidade é acelerada, uma vez que a água presente é o principal componente responsável pela geração de calor interna. Há de se levar em consideração também que, quando da utilização do processamento por microondas em comparação ao processo convencional de secagem, para a mesma eficiência energética, é suficiente que apenas 20 a 35% do espaço físico seja destinado a equipamentos (METAXAS & MEREDITH, 1983; MARSAIOLI, 1991; MASKAN, 2000).

Produtos processados por microondas têm sido reportados como de boa qualidade, em termos de potencial de reidratação, textura, menores perdas de vitaminas, aroma e cor, e podem ser obtidos sob considerável economia energética, com reduzido tempo de processamento em comparação ao processo convencional de secagem (MASKAN, 2000; KHRAISHEH et al., 2004; VARITH et al., 2007). Entretanto, o processo de secagem por microondas também é conhecido por produzir produtos de baixa qualidade para condições não adequadas de potência de microondas aplicadas. Essas condições são específicas para cada produto, ou classe de produtos, e dependem das características requeridas para o mesmo (YONGSAWATDIGUL & GUNASEKARAN, 1996; ADU & OTTEN, 1996; DROUZAS & SCHUBERT, 1996).

Em anos recentes, a secagem por microondas tem sido bastante pesquisada como método alternativo para uma grande variedade de produtos alimentícios, tais como frutas, hortaliças, temperos e cereais. Produtos alimentícios têm sido processados com sucesso,

[1] A definição de eficiência energética utilizada pelos autores é a razão entre o consumo de potência elétrica pela quantidade de água evaporada.

combinando-se vácuo com microondas ou microondas com processo tradicional por convecção a ar quente. Entre os trabalhos analisados, destacamos MASKAN (2000), GARCIA et al. (1988), DROUZAS & SCHUBERT (1996), NIJHUIS et al. (1998) para secagem de banana, LIN et al. (1998), PRABHANJAN et al. (1995) para secagem de cenoura, KHRAISHEH et al. (1997b) para batata, TULASIDAS et al. (1996) para uvas, FUNEBO & OHLSSON (1998) para maçã e cogumelo, REN & CHEN (1998) para ginseng da variedade americana (*Panax quinquefolium*). Os autores dos trabalhos mencionados relataram, na maioria das vezes, comparativamente ao processo convencional de secagem, a obtenção de produtos de qualidade superior quanto a cor, aroma, sabor e textura. No entanto, pode-se verificar que esses autores se basearam exclusivamente em avaliações instrumentais de colorimetria e perfil de textura; quanto a aroma e sabor, eles se basearam em opiniões subjetivas e individuais. Portanto, deve-se ter em conta que eles não consideraram os testes sensoriais.

Um grupo de pesquisadores estudou de maneira mais extensiva e sistemática o perfil sensorial das amostras secas por microondas (SOUSA, 2002; SOUSA et al., 2004 e 2006). Nesses trabalhos, os autores desenvolveram e otimizaram o processo de secagem de bananas por microondas, utilizando forno doméstico adaptado para experimentos de secagem (sistema de injeção de ar aquecido com velocidade variável), determinaram os parâmetros de secagem (tempo, curvas e taxas de secagem) assim como a densidade de potência de microondas aplicada. Bananas-passa foram obtidas com tempo de processamento de 3 a 4 horas (10 vezes menos que no processo convencional). As amostras processadas por microondas foram analisadas sensorialmente e comparadas a uma amostra comercial, seus perfis sensoriais foram traçados utilizando a técnica da Análise Descritiva Quantitativa, tendo sido identificados e quantificados vários atributos sensoriais

(*Aparência*: brilho, cor, rugosidade, seco; *Aroma*: caramelo, frutoso, fumaça; *Sabor*: ácido cítrico, amargo, caramelo, doçura, fruta, fumaça; *Textura*: adesividade, dureza e elasticidade). Testes de consumidor (afetivos) demonstraram que as amostras processadas por microondas obtiveram excelente nível de aceitação e intenção de compra, apresentando também coloração/sabor doce/textura ideais, enquanto a amostra comercial apresentou baixo índice de aceitação e intenção de compra e sabor doce inferior ao ideal, coloração escura e elevada dureza. Análises instrumentais de textura e cor confirmaram os dados sensoriais, demonstrando que as amostras obtidas por microondas apresentaram coloração mais clara, menor dureza e maior elasticidade, com a amostra comercial apresentando coloração mais escura, maior dureza e menor elasticidade.

De acordo com o trabalho realizado por KHRAISHEH et al. (2004), produtos ricos em amido secos com a aplicação de microondas apresentam menor encolhimento volumétrico em relação ao produto seco com ar quente. No entanto, embora a cinética de secagem seja bastante acelerada com a aplicação de potências de microondas elevadas, o produto seco apresenta maior encolhimento em relação à aplicação de potências menores (RAGHAVAN & SILVEIRA, 2001).

A secagem convencional de alimentos apresenta três fases: indução, período de taxa constante e período de taxa decrescente. No entanto, em alguns casos o terceiro período pode apresentar dois períodos de taxa decrescente. A aplicação de microondas apresenta diferença quanto à aceleração da secagem nos períodos de taxa decrescente, provocando um aquecimento volumétrico em materiais dielétricos e são absorvidas mais intensamente nas regiões mais úmidas em comparação às regiões mais secas. Dessa forma, o gradiente de temperatura convencional é invertido, de forma que o centro apresenta temperaturas mais altas que a superfície. Esse efeito acelera a transferência de massa devido ao aumento da

pressão interna causada por uma maior taxa de evaporação de água livre no interior do produto. (ERLE, 2005).

Os estudos sobre a secagem de frutas e hortaliças com aplicação de energia de microondas têm crescido nos últimos anos. Vários trabalhos tratam dos efeitos das condições de secagem, incluindo a potência de microondas aplicada, na qualidade do produto final, avaliada em termos de cor, porosidade, encolhimento, capacidade/cinética de reidratação, etc (MASKAN, 2000, 2001; SOUSA, 2002; KHRAISHEH et al., 2004; WANG & XI, 2005). Um outro enfoque desses estudos está na investigação dos fenômenos de transferência de massa na secagem com aplicação de microondas, através da análise da cinética de secagem e da utilização de modelos matemáticos tanto empíricos como teóricos (DANDAMRONGRAK et al., 2002; RUIZ DÍAZ et al., 2003; SOYSAL et al., 2006).

Vários pesquisadores propuseram a divisão do processo de secagem em dois estágios, combinando dois métodos separadamente. Durante a fase inicial, a secagem é conduzida por métodos convencionais de convecção com ar quente e durante o estágio final, pela aplicação de microondas combinada ou não com convecção (PRABHANJAN et al., 1995; FENG & TANG, 1998; JUMAH & RAGHAVAN, 2001; SILVA & MARSAIOLI, 2004; SILVA et al., 2006). Dessa forma, a energia de microondas é utilizada para acelerar o processo, agindo exatamente na sua etapa mais lenta, melhorando a eficiência energética e a qualidade final do produto seco, uma vez que diminui o tempo de exposição do material a altas temperaturas.

De acordo com WANG & XI (2005), o consumo energético (calculado em kWh) para potências de microondas mais baixas aplicadas à secagem é maior em relação às potências mais elevadas, para um mesmo conteúdo de umidade final. Umas das explicações

sugeridas pelos autores é o longo tempo de secagem com aplicação de potências mais baixas.

WANG & XI (2005) propuseram a realização da secagem de cenouras com aplicação de energia de microondas em mais de um estágio, com mudança da potência de microondas aplicada ao longo da secagem. A relação entre as potências de microondas aplicadas nos dois estágios e o tempo de duração do primeiro foi analisada em termos da razão de reidratação e teor de β-caroteno. A razão de reidratação das amostras diminui drasticamente com o aumento da densidade de potência disponível de microondas no estágio inicial até um certo valor (próximo de 2,0 kW/kg) e aumenta com densidades de potências maiores a partir desse ponto. Com o aumento da densidade de potência disponível de microondas do segundo estágio (com duração fixa do primeiro estágio) a razão de reidratação aumenta até um limite de 2,8kW/kg, mas o teor de caroteno diminui.

Portanto, a necessidade de realização do controle da potência de microondas aplicada ao processo de secagem é pertinente e pode ser utilizada com a finalidade de um melhor aproveitamento da secagem no que diz respeito à obtenção de um produto com boa qualidade e um processo eficiente energeticamente. Para isso, a secagem pode ser realizada em etapas com diferentes potências de microondas aplicadas de acordo com as necessidades de transferência de calor e massa de cada período da curva de secagem.

Na literatura consultada, inclusive a atual, existem alguns artigos disponíveis sobre os processos combinados de desidratação osmótica de produtos vegetais e secagem complementar por microondas (RAGHAVAN & SILVEIRA, 2001; TORRINGA et al., 2001; FUMAGALLI, 2003; BEAUDRY et al., 2003; BEAUDRY et al., 2004; PIOTROWSKI et al., 2004; FUMAGALLI & SILVEIRA, 2005; HEREDIA et al., 2007).

No entanto, a interação entre a potência de microondas aplicada e as condições do ar durante a secagem foi investigada apenas por VENKATACHALAPATHY & RAGHAVAN (1997).

VENKATACHALAPATHY & RAGHAVAN (1997) realizaram um estudo de secagem assistida a microondas e ar quente em amostras de "blueberries" osmoticamente desidratadas em soluções de sacarose. Eles concluíram que o processo de secagem com microondas e ar quente das frutas pré-desidratadas osmoticamente apresentou um produto com qualidade (em termos de textura, cor e avaliação sensorial) comparável àquele obtido por liofilização num tempo mais curto. As amostras secas com temperatura do ar mais baixa (35°C) apresentaram tempo de secagem mais longo e textura mais dura do que aquelas secas com ar a 45°C.

ERLE & SCHUBERT (2001) estudaram o processo de secagem assistida a microondas e vácuo em amostras de maçã e morango. De acordo com os autores, a seleção das condições do tratamento osmótico propicia a possibilidade de influência tanto na eficiência da secagem com microondas quanto na qualidade do produto final. Os autores observaram que maçãs desidratadas osmoticamente apresentaram melhor retenção do volume e da forma celular, por meio da microscopia eletrônica de varredura. Também observaram que as amostras desidratadas, quando secas por microondas a vácuo, apresentaram alta qualidade em termos de cor, sabor, teor de vitamina C, estrutura e volume.

PIOTROWSKI et al. (2004) avaliaram a influência da desidratação osmótica de morangos congelados na secagem por microondas assistida a ar quente. Observou-se que um aumento na densidade de potência disponível de microondas acarretou uma diminuição do tempo de secagem da fruta desidratada para secagem até 50% de umidade.

2.4.2 Ajuste por modelos matemáticos

Vários modelos são propostos na literatura para o estudo da cinética de secagem de materiais. Um dos principais mecanismos de transferência de umidade que ocorre durante a secagem de materiais biológicos é a difusão de líquido e de vapor, como já citado anteriormente. Difusão é o processo pelo qual uma matéria é transportada de uma parte do sistema para outra, como resultado de um movimento molecular aleatório (CRANK, 1975). FICK (1855) foi o primeiro a propor uma analogia entre a transferência de massa e calor por difusão, visto que a transferência de calor por condução também ocorre pelo movimento molecular aleatório. Dessa forma, ele descreveu matematicamente a teoria de difusão em substâncias isotrópicas, baseado na hipótese de que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_{ef} \nabla \cdot X) \qquad \text{Eq. 2-11}$$

onde:

X = umidade do material no tempo t;

t = tempo;

D_{ef} = difusividade efetiva.

CRANK (1975) apresentou diversas soluções da equação de difusão para diferentes geometrias e condições de contorno e iniciais.

A seguinte aproximação pode ser realizada para o caso de uma placa plana infinita, assumindo-se distribuição de umidade uniforme inicialmente devido à consideração de que o coeficiente de difusão (D_{ef}) é constante e as seguintes condições inicial e de contornos:

- Umidade inicial uniforme $X = X_0$ em t = 0, 0<y<L;
- Umidade constante na superfície $X = X_e$ em y = L, t>0;
- Umidade máxima no centro $\frac{\partial X}{\partial y} = 0$ em y=0 t>0.

$$\frac{\overline{X} - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \frac{D_{ef} \pi^2}{4L^2} t \right] \quad \text{Eq. 2-12}$$

onde:

$\overline{X}$ = umidade média do material no tempo t;

X_e = umidade de equilíbrio do material;

i = número de termos da série;

L = meia espessura da amostra

Em alguns casos sobre secagem com aplicação de microondas, pode-se assumir a umidade de equilíbrio (X_e) como sendo nula. Essa consideração é baseada em outros trabalhos e no fato de que a umidade de equilíbrio da banana, que é a fruta em questão, situa-se próxima de zero. Além disso, a umidade final apresenta um valor muito inferior em relação à umidade inicial e o termo pode ser desconsiderado. Para tempos de secagem muito longos, a equação de Fick pode ser simplificada utilizando apenas o primeiro termo da série:

$$\frac{\overline{X}}{X_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D_{ef} \pi^2}{4L^2} t \right) \quad \text{Eq. 2-13}$$

E freqüentemente é reescrita na forma:

$$\frac{X}{X_0} = A\exp(-kt) \qquad \text{Eq. 2-14}$$

sendo que

$$k = \frac{D_{ef}}{4L^2} \qquad \text{Eq. 2-15}$$

Vários autores que estudaram a cinética de secagem de frutas com aplicação de microondas propuseram a modelagem da curva de secagem através de uma exponencial simples em mais de uma etapa. SANKAT et al. (1996) encontraram valores de constante de secagem considerando dois períodos de secagem decrescente para banana previamente desidratada.

Um outro modelo bastante utilizado para descrição da cinética de secagem é o modelo exponencial proposto por LEWIS (1921). Esse modelo prevê que a taxa de perda de água é proporcional ao teor de água livre do material da seguinte forma

$$\frac{d\overline{X}}{dt} = -k_L(X - X_e) \qquad \text{Eq. 2-16}$$

sendo que

k_L = constante de secagem do modelo exponencial.

A forma integrada dessa equação é a que se apresenta com mais freqüência na literatura:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-k_L t) \qquad \text{Eq. 2-17}$$

Uma modificação do modelo foi proposta por PAGE (1949) com a inclusão de mais um parâmetro na equação para descrever a secagem de milho. Esse modelo tem apresentado bons ajustes para os dados de secagem com aplicação de microondas de produtos alimentícios.

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-k_P t^n) \qquad \text{Eq. 2-18}$$

sendo que

k_P = constante de secagem de Page;

n = parâmetro do modelo.

Alguns autores ainda propuseram a utilização de modelo de duas exponenciais para descrever a cinética de secagem de produtos alimentícios, especialmente no período final de secagem (DANDAMRONGRAK et al., 2002)

$$X = X_1 e^{-k_1 t} + X_2 e^{-k_2 t} \qquad \text{Eq. 2-19}$$

onde:

X = teor de umidade no tempo t;

k_1 e k_2 = constantes de secagem;

X_1 = teor de umidade associado com a constante de secagem k_1;

X_2 = teor de umidade associado com a constante de secagem k_2.

2.5 Parâmetros de qualidade do produto na secagem

O tipo do processo de secagem empregado e as condições operacionais do mesmo interferem nas características do produto seco. A umidade e a temperatura provocam

mudanças estruturais que refletem na forma, na porosidade, no volume e na densidade do material. Esses dois parâmetros também geram reações de degradação de nutrientes presentes nos alimentos.

Frutas e hortaliças são sistemas sólidos ou semi-sólidos, heterogêneos e que podem ser considerados como uma matriz que contém grandes quantidades de uma fase líquida, na maioria dos casos, uma solução aquosa. Os bio-polímeros (amido, açúcares, etc...) são os elementos estruturais mais comuns na matriz sólida. A estrutura particular de um material e a característica mecânica de seus elementos em equilíbrio definem o seu volume, massa e tamanho. Durante a secagem, quando a água é removida do material, um desequilíbrio entre a pressão pressão interna e externa é produzido e gera contrações e tensões internas que conduzem ao encolhimento ou colapso, a alterações de forma e em alguns casos, a rachaduras do material (MAYOR & SERENO, 2004).

Em alguns casos, a temperatura de secagem influencia no encolhimento, de maneira que o produto apresenta menor encolhimento quando temperaturas mais altas são utilizadas. Durante o início da secagem, a formação de uma casca na superfície do material, também conhecida como endurecimento superficial, determina o tipo e o grau de encolhimento dos alimentos. Esse fenômeno está relacionado com a transição vítrea na superfície do material. No caso de formação de casca, significa que o material da superfície passou do estado borrachento para o estado vítreo. Dessa forma, o encolhimento do material diminui, podendo ocorrer a formação interna de poros ou bolhas (MAYOR & SERENO, 2004).

A atividade de água (a_w) de um alimento é uma das propriedades mais importantes do processamento, para a conservação e o armazenamento de alimentos. O termo atividade de água foi introduzido na década de 50 para descrever o estado da água em produtos alimentícios. Essa definição surgiu porque o estado de ligação da água e os outros

constituintes do alimento determinam o crescimento microbiano, a produção de toxinas e a ocorrência de reações enzimáticas e não enzimáticas (BARBOSA-CÁNOVAS & VEGA-MERCADO,1996).

Os microorganismos apresentam uma atividade de água mínima para o seu desenvolvimento. O crescimento bacteriano só ocorre em valores de atividade de água acima de 0,9, as leveduras apresentam um valor limite de 0,85 para seu crescimento e os bolores um valor de 0,6. Em geral, o limite de 0,6 é considerado como o limite mínimo para o crescimento de microorganismos (BOBBIO & BOBBIO, 1992).

Capítulo 3 – Relação entre potência de microondas e condições do ar na secagem de banana osmoticamente desidratada

3.1 Introdução

Neste Capítulo apresentam-se os resultados de um estudo cuja finalidade foi avaliar a interação da potência de microondas aplicada com a temperatura e velocidade do ar na secagem de fatias de banana osmoticamente desidratadas. O desenvolvimento experimental foi realizado em uma cavidade de microondas elíptica sem movimentação do material dentro da mesma. Dessa maneira, foi possível realizar o acompanhamento da massa de material e da temperatura interna do material continuamente ao longo da secagem. Como já apresentado na revisão bibliográfica (Capítulo 2), a curva de secagem de banana apresenta dois períodos de secagem decrescentes. Respeitando essa característica da secagem dessa fruta, potências de microondas foram aplicadas em níveis diferentes para cada período da secagem. Esse estudo foi desenvolvido durante um estágio de doutorado realizado no SIK (The Swedish Institute for Food and Biotechnology) sob a supervisão da Dr[a] Lilia Ahrné, em Gotemburgo, Suécia.

3.2 Objetivos

O objetivo geral deste capítulo é avaliar o efeito da potência de microondas e da velocidade e temperatura do ar, durante a secagem de fatias de banana desidratadas osmoticamente, na cinética da secagem e na qualidade do produto final, uma vez que as principais metas da pesquisa foram diminuir o tempo de processamento global e manter a qualidade dos produtos finais.

Em correlação com o estudo realizado, seus objetivos específicos são:

1) verificar o efeito da temperatura e da velocidade do ar e o efeito da interação das mesmas com uma potência fixa de microondas aplicada na cinética do primeiro período de taxa decrescente da secagem de banana (até 40% de umidade bu);
2) estudar o efeito da potência de microondas e da temperatura e velocidade do ar na cinética do período final de taxa decrescente da secagem de banana (de 40% a 15% de umidade bu) e
3) avaliar a influência das condições do ar e da potência aplicada no período inicial e final da secagem na qualidade da fruta seca a 15% de umidade bu através da análise de atividade de água, volume aparente, porosidade, cor e porcentagem de fatias queimadas.

3.3 Material e Métodos

3.3.1 Seleção e preparação da matéria-prima

Bananas firmes e maduras da variedade nanicão (*Musa acuminata* subgrupo Cavendish) foram escolhidas de acordo com seu grau de maturação pela coloração da casca (casca amarela e cabo ainda verde) e pelo teor de sólidos solúveis (18 a 19°Brix). A Figura 3.1 ilustra o aspecto da coloração da casca das frutas utilizadas. Em seguida, as frutas foram descascadas manualmente e cortadas em fatias de 10 mm de espessura, com um dispositivo de fatiar projetado para esse propósito.

Figura 3.1 - Coloração característica da casca das frutas utilizadas nos experimentos.

3.3.2 Caracterização da matéria-prima e dos produtos

As frutas *in natura* e desidratadas osmoticamente foram caracterizadas pelas análises do teor de umidade, dos sólidos solúveis totais (SST) e da atividade de água (a_w). Os produtos secos foram analisados de acordo com o teor de umidade, atividade de água, volume aparente, porosidade, cor e porcentagem de fatias queimadas.

- **Determinação do teor de umidade**

O teor de umidade foi determinado segundo método gravimétrico 934.06 da AOAC (1995) em estufa a vácuo (pressão ≤100mmHg) a 70°C por no mínimo 6 horas. As frutas *in natura* foram secas primeiramente em estufa sob pressão atmosférica a 100°C durante 15 horas e em seguida levadas a estufa à vácuo nas condições descritas anteriormente.

- **Atividade de água (a_w)**

A determinação da atividade de água foi realizada a 25ºC por meio do instrumento Aqualab, modelo CX-2T-Decagon. O princípio do método consiste na medida do ponto de orvalho da amostra acondicionada em uma cápsula plástica dentro de um banho de temperatura constante.

- **Sólidos Solúveis Totais (SST)**

Para determinar o teor de sólidos solúveis totais, uma parte de fruta foi diluída e agitada na proporção de três partes de água e uma de fruta (em massa) durante 1 minuto. Uma gota da solução, previamente filtrada em Whatmann 44, foi colocada no prisma de um refratômetro (Digit0-32, Ceti Optical Instruments) para leitura do teor de sólidos solúveis totais em °Brix. A leitura foi realizada a 20°C.

- **Volume aparente (V_{ap})**

O volume aparente foi medido pelo deslocamento de volume da amostra submersa em óleo. O líquido indicado para essa análise é o n-heptano ou hexano. O óleo foi escolhido como substituto a esses dois por não ser tóxico como eles e por permitir a medida de deslocamento de volume sem penetrar na amostra. Um gancho foi suspenso na parte inferior de uma balança semi-analítica para a realização da medida da massa da amostra mergulhada em óleo. O volume foi calculado da seguinte forma:

$$V_{ap} = \frac{\left(W_{s+g} - W_g\right) - \left(W_{s+g,oleo} - W_{g,oleo}\right)}{\rho_{oleo}} \qquad \text{Eq. 3-1}$$

onde:

W_g = massa do gancho;

W_{s+g} = massa da amostra e gancho;

$W_{s+g,oleo}$ = massa da amostra e gancho mergulhados no óleo;

$W_{g,oleo}$ = massa do gancho mergulhado no óleo.

A medida de volume foi repetida para 4 fatias diferentes. A densidade do óleo utilizado foi de 0,916g/ml a 25°C.

- **Porosidade (ε)**

A porosidade das fatias de banana secas foi calculada, levando-se em conta o volume aparente e o volume de sólidos e de água da fatia. O volume de sólidos e de água considera o volume da amostra sem poros e foi utilizado como uma aproximação do volume real. A porosidade foi calculada da seguinte maneira

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{sa}}{V_{ap}} \qquad \text{Eq. 3-2}$$

O volume de sólidos e de água da amostra triturada foi medido com um picnômetro a 20°C.

- **Cor**

As medidas de cor das bananas *in natura*, desidratadas osmoticamente e secas,, foram realizadas por um espectrofotômetro portátil (Minolta Colour Reader CR-10). A cor foi expressa pelo sistema de coordenadas *L**, *a** e *b** definido pela CIE (1976). O parâmetro *L** indica a luminosidade (branco a preto), o parâmetro *a** representa o índice de

saturação vermelha (vermelho a verde) e o parâmetro *b** indica o índice de saturação amarelo (amarelo a azul). A leitura foi realizada diretamente sobre a superfície de 5 fatias diferentes. A variação da cor é avaliada pelo parâmetro *ΔE**, tomando como referência a amostra *in natura* (L_0, a_0 *e* b_0), de acordo com a equação:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L^*_0)^2 + (a^* - a^*_0)^2 + (b^* - b^*_0)^2} \qquad \text{Eq. 3-3}$$

- **Fatias queimadas**

As fatias queimadas foram coletadas após os experimentos de secagem e foram pesadas. A porcentagem de fatias queimadas foi calculada em relação à massa final total de cada experimento. Em virtude do caráter subjetivo dessa análise, um padrão de fatias queimadas foi definido previamente com a finalidade de minimizar o erro experimental. A Figura 3.2 ilustra um padrão das amostras consideradas queimadas nos experimentos de secagem.

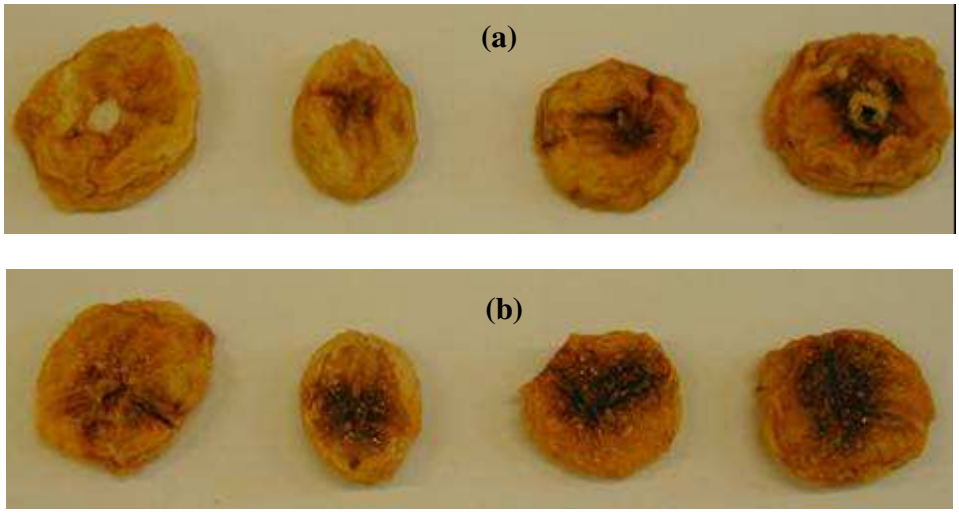


Figura 3.2 – Padrão considerado para caracterização das amostras queimadas, (a) face superior e (b) face inferior.

A Figura 3.2 (a) apresenta a foto da face superior das fatias queimadas e a Figura 3.2 (b), a face inferior, demonstrando que as duas faces das fatias foram analisadas. Pois, na primeira fatia, à esquerda da figura, o aspecto de queimado é observado apenas na face inferior.

3.3.3 Desidratação osmótica

A desidratação osmótica de fatias de banana foi realizada em um banho de temperatura constante, sob agitação constante. O processo foi realizado com solução de sacarose a 55°Brix contendo 1% de ácido cítrico e 0,6% de ácido ascórbico a 40°C com agitação de 100 rpm durante 90 min. A proporção entre fruta e solução foi de 1:3 (kg fruta : kg solução). Em seguida, as amostras foram enxaguadas com água destilada para retirada do excesso de açúcar na superfície e secas em papel absorvente.

Os ácidos cítrico e ascórbico foram incluídos na composição da solução para minimizar o escurecimento enzimático das fatias.

As amostras foram embaladas em papel filme e estocadas a 5°C durante 16 horas, para posterior secagem. Análises do teor de umidade, de sólidos solúveis (°Brix) e da atividade de água (a_w) da fruta desidratada foram realizadas previamente à etapa de secagem.

As condições da desidratação osmótica foram selecionadas tomando como base os estudos realizados por MAURO & MENEGALLI (1995) e ARHNÉ (2005), os quais indicam que nessas condições a fruta apresenta considerável perda de água, com reduzido ganho de açúcares.

3.3.4 Secagem assistida a microondas

3.3.4.1 Equipamento de secagem com aplicação de microondas

Nessa etapa do estudo, foi utilizado um equipamento de secagem com aplicação de microondas, com capacidade para 1 quilograma de material, desenvolvido no SIK especificamente para secagem de frutas no âmbito do projeto Combidry pelo Dr. Per O. Risman (www.por.se) (Figura 3.3 e Figura 3.4). O secador consistia de uma cavidade de forma cilíndrica e de um gerador de microondas de 760W, combinado com um sistema de circulação de ar quente. Acoplado ao secador, o sistema de circulação de ar permitia controlar a temperatura e avelocidade do ar de entrada com escoamento cruzado com o plano da amostra. O secador estava equipado com uma balança para monitoramento da massa de material e com sensores de temperatura de fibra ótica, para monitoramento da temperatura durante os processos de secagem. Um sistema de controle da potência de saída de microondas ligado ao equipamento permitia avaliar a variação da potência aplicada.

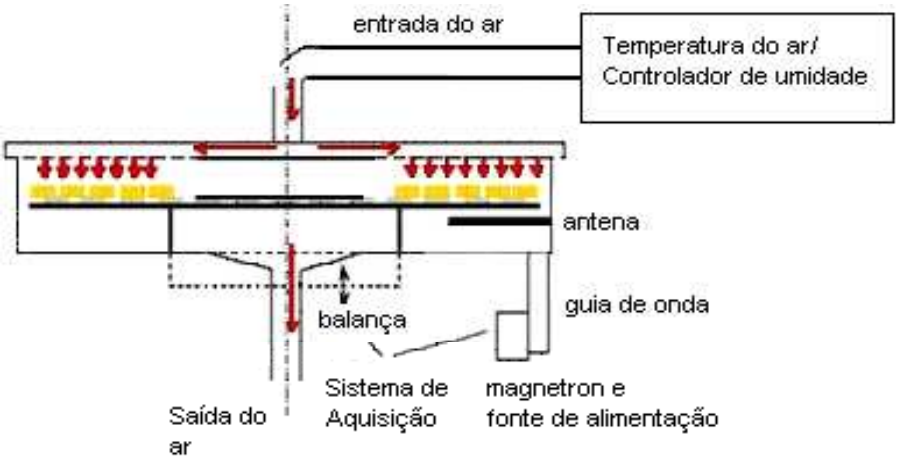


Figura 3.3 – Esquema ilustrativo do escoamento do ar na cavidade de microondas (riscos amarelos representam as fatias de banana e flechas vermelhas, o caminho percorrido pelo ar).

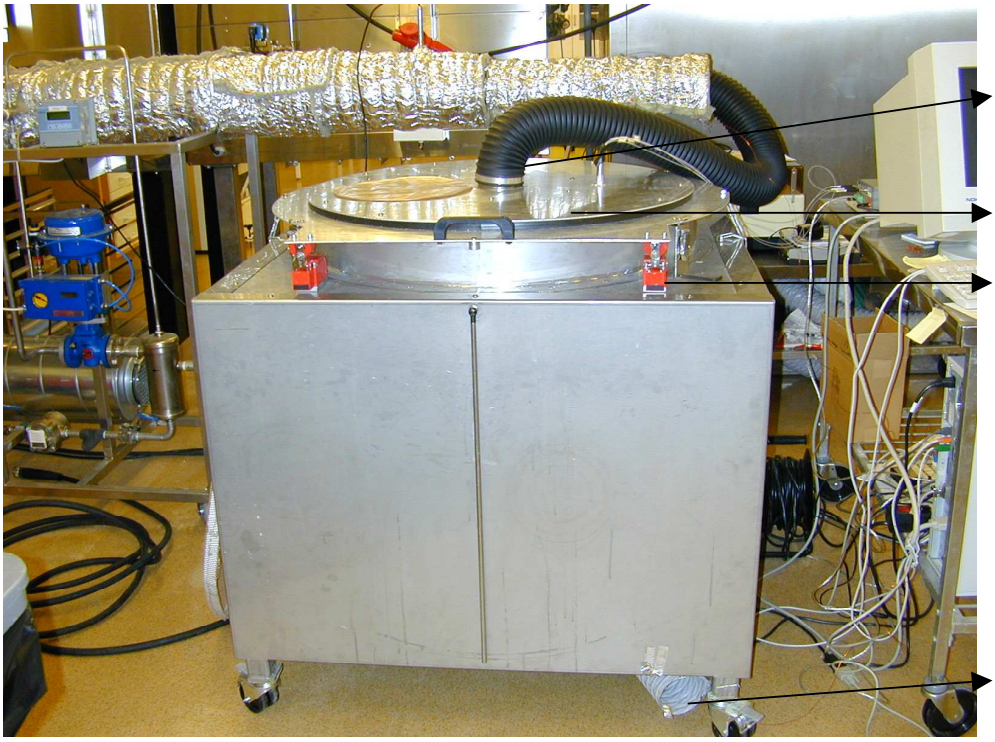


Figura 3.4 - Equipamento de secagem assistido a microondas e sistema de ar quente acoplado.

A cavidade em questão é uma cavidade ressonante inicialmente projetada para apresentar um ou dois modos, procurando-se, dessa forma, minimizar os efeitos de aquecimento heterogêneo pelas ondas estacionárias típicas de cavidades de múltiplos modos. Essa configuração foi escolhida pela necessidade de acompanhamento de massa de material ao longo do tempo por uma balança. Dessa forma, optou-se por manter a amostra sem movimentação para facilitar a pesagem, esperando uma certa homogeneidade de campo eletromagnético pelo desenho da cavidade.

3.3.4.2 Procedimento experimental

As fatias de fruta previamente desidratadas osmoticamente foram distribuídas uniformemente em cinco fileiras, em dois arcos de coroa circular (Figura 3.5). Em razão da configuração de ondas estacionárias no tipo de cavidade utilizado, para evitar superaquecimento do produto, evitou-se colocar amostras na região próxima à antena de microondas e na região diametralmente oposta a ela e, para prevenir sub-aquecimento, no centro da cavidade. A temperatura interna do produto foi medida em quatro amostras colocadas em diferentes regiões da cavidade. As mesmas posições foram padronizadas em todos os experimentos (Figura 3.5). As variáveis do processo controladas e monitoradas a cada segundo por um sistema de aquisição de dados foram: potência de microondas, velocidade e temperatura do ar, temperatura e variação de peso do produto.

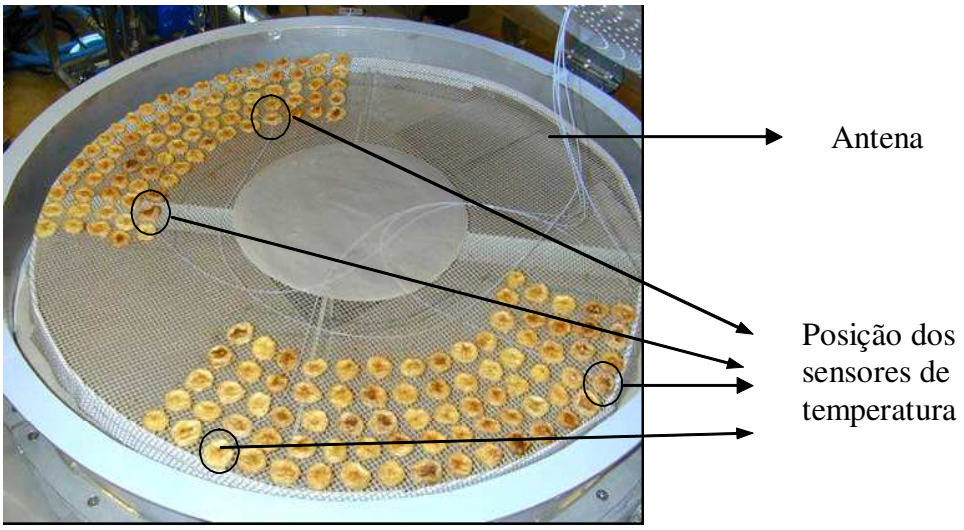


Figura 3.5 - Posicionamento dos sensores de temperatura para monitoramento da evolução da temperatura interna do produto durante os experimentos de secagem de banana.

Para estudar o período final da secagem de banana, o processo de secagem foi dividido em três etapas como ilustrado na Figura 3.6: a primeira etapa (**Fase I**), igual para todos os experimentos, foi conduzida a 100% da potência de saída de microondas (760W) e escoamento do ar a 80°C e 5,7 m/s (velocidade de saída de ar) durante 5 minutos. Essas condições foram escolhidas para acelerar o período de indução térmica, de maneira que tanto o ar quanto as microondas forneçam energia para o material. Na segunda etapa (**Fase II**), aplicou-se 380W de potência e foram testadas três condições diferentes de escoamento do ar, a saber: 50ºC e 3,3 m/s; 70ºC e 3,3 m/s; 70ºC e 5,7 m/s, até que o produto atingisse 0,67 kg_a/kg_{ms} (correspondente a 40 % bu, teor de umidade a partir do qual a cinética de secagem de banana torna-se consideravelmente mais lenta). A terceira etapa (**Fase III**), que corresponde ao período final da secagem de banana, foi conduzida sob as mesmas condições de escoamento do ar da fase anterior, com exceção da potência de microondas até que a amostra atingisse 0,18 kg_a/kg_{ms}. Os níveis de potência de microondas testados nessa fase foram 0, 76, 150 e 230W. O planejamento totalizou 12 experimentos de secagem

de bananas, de acordo com a ilustração da Figura 3.6. A umidade final de 0,18 kg_a/kg_{ms} foi escolhida, pois, nessa umidade, a atividade de água atinge valores próximos a 0,6, que é considerada aceitável para a preservação do produto em termos de crescimento microbiano (BARBOSA-CÁNOVAS & VEGA-MERCADO, 1996; SOUSA, 2002).

Logo após os experimentos de secagem, as amostras secas foram submetidas às análises de teor de umidade, atividade de água, cor, volume de sólidos e volume aparente, porosidade e quantidade de fatias queimadas.

Todos os experimentos de secagem foram iniciados com uma massa original de banana pré-desidratada de um quilograma. Considerando essa massa, as densidades de potência aplicadas em cada etapa foram calculadas em W/g e estão expressas na Figura 3.6.

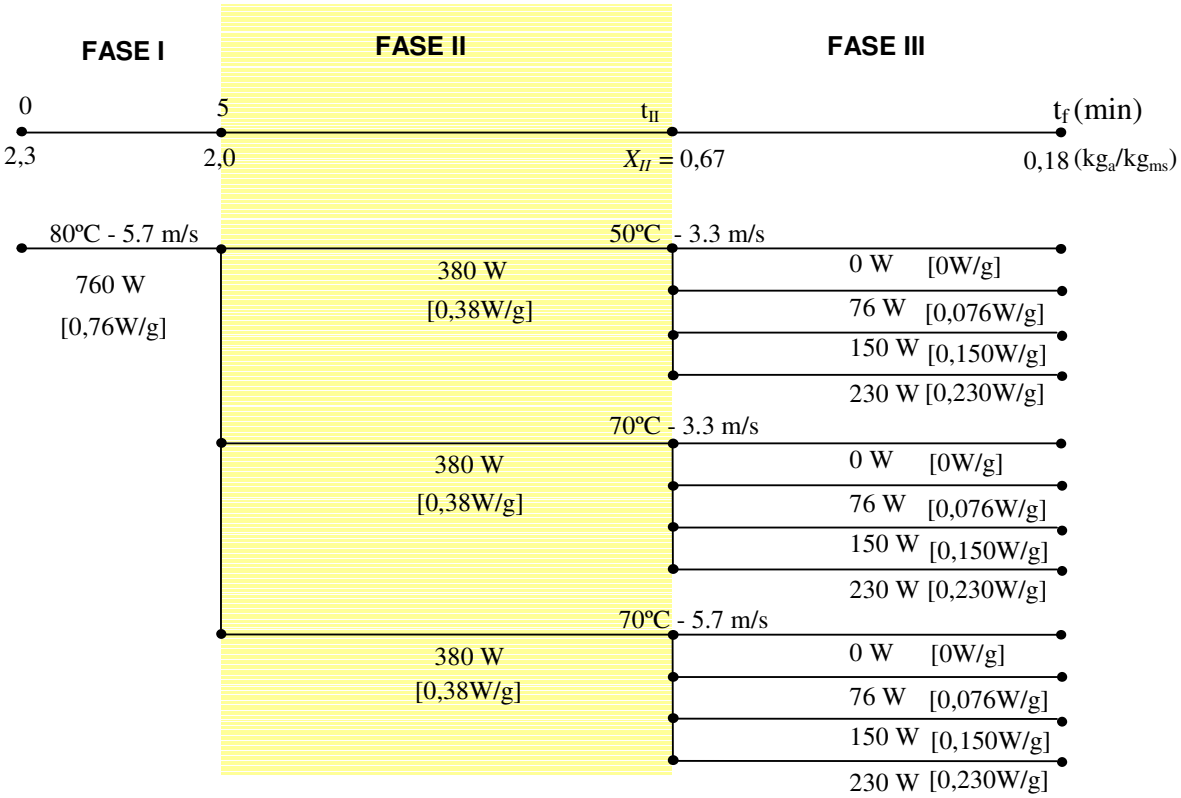


Figura 3.6 - Esquema ilustrativo das condições experimentais testadas para secagem de fatias de banana osmoticamente desidratadas.

3.3.4.3 Verificação da eficiência do secador

Previamente ao início do planejamento experimental da secagem da banana descrito anteriormente, foi verificada a eficiência do secador de microondas por dois testes: 1) medida da potência de microondas disponível para o produto, de acordo com método modificado em relação ao padrão IEC 60705 (IEC, 2004); 2) medida da absorção de microondas pelo produto de acordo com o fenômeno de ressonância externa. Para o primeiro teste, utilizou-se etanol (grau de pureza 99%) no lugar de água, líquido utilizado no método original, para verificar a eficiência do gerador de microondas. Escolheu-se o etanol por ser um líquido que apresenta uma boa absorção da energia de microondas (fator de perda alto - ε'') e baixa reflexão das microondas (constante dielétrica baixa - ε'). Esse teste mostrou que 76% da potência estava disponível para o produto dentro da cavidade.

No segundo teste, foi medida a ressonância da carga de banana dentro da cavidade na freqüência do magnetron (2450MHz). Para tanto, o magnetron foi substituído por um detector de ROE de baixa potência (Wiltron – modelo 5400-6N50), que mede a razão de voltagem de onda estacionária formada dentro da cavidade. O acoplamento, devido à ressonância da carga de banana na faixa de freqüência medida (2400 a 2500 MHz), foi medido com carga de banana com seis diferentes teores de umidade: 0,67; 0,50; 0,40; 0,25 e 0,15 $kg_a/kg_{produto}$. Dessa forma, foi feita uma varredura da capacidade de absorção de microondas pela amostra ao longo do processo de secagem. De acordo com o teste, a amostra apresentou uma boa absorção da energia de microondas disponível (aproximadamente 98% de absorção) durante a secagem, o que indica o casamento da impedância da amostra e do sistema (ressonância).

3.4 Análise dos Resultados

Os resultados foram analisados separadamente com relação à cinética de secagem e à qualidade do produto final. As cinéticas de secagem e o comportamento da temperatura do produto ao longo das Fases I e II foram analisadas em conjunto e os da Fase III foram analisados separadamente.

3.4.1 Avaliação da cinética de secagem

As Figuras 3.7 e 3.8 ilustram as curvas completas de perda de umidade ao longo do tempo e da taxa de secagem em função do adimensional de umidade de fatias de banana previamente desidratadas osmoticamente, realizada com escoamento do ar nas temperaturas de 50 e 70 °C e velocidade de 3,3 m/s, com e sem aplicação de microondas no período final de secagem (Fase III), lembrando que durante a Fase I, a potência de microondas foi de 760W e as condições do ar foram de 80°C e 5,7 m/s para todos os experimentos.

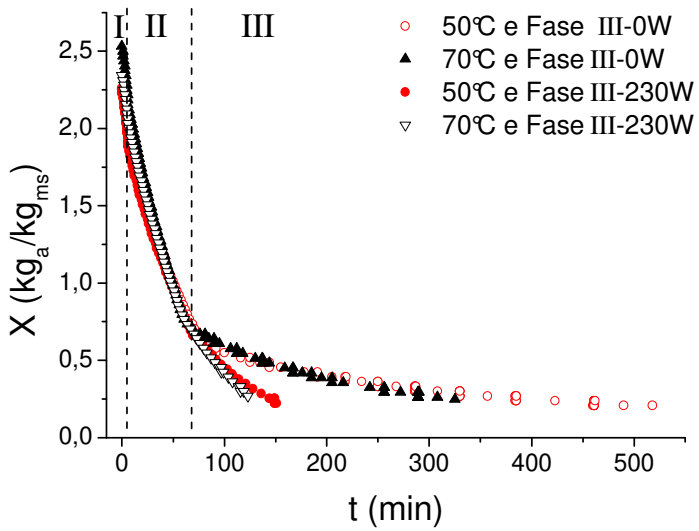


Figura 3.7 - Umidade em função do tempo de fatias de banana desidratadas osmoticamente secas com velocidade do ar de 3,3 m/s e temperatura do ar a 50 ou 70°C, com e sem aplicação de microondas na Fase III, englobando as três fases.

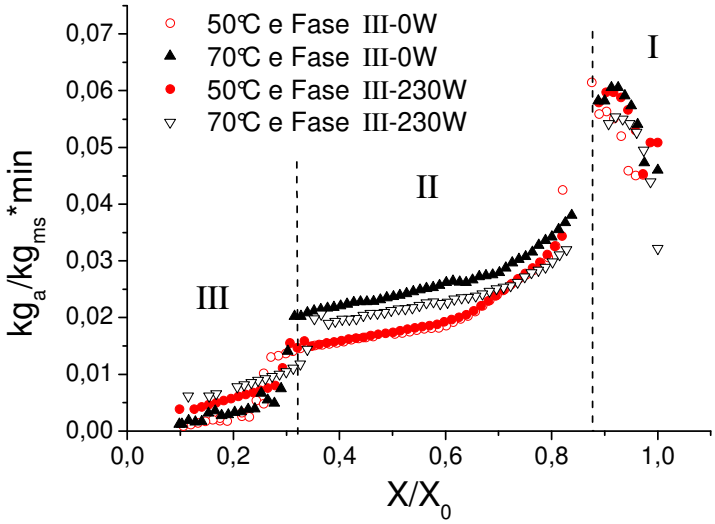


Figura 3.8 –Taxa de secagem em função da umidade adimensional de fatias de banana desidratadas osmoticamente secas com velocidade do ar de 3,3 m/s e temperatura do ar a 50 ou 70°C, com e sem aplicação de microondas na Fase III, englobando as três fases.

Analisando a Figura 3.7, observa-se que a aplicação de microondas na Fase III para uma mesma temperatura do ar aumenta a cinética de secagem, promovendo uma redução no tempo de secagem, para atingir um mesmo conteúdo de umidade. A Figura 3.8 mostra que a secagem de banana ocorre em dois períodos de secagem decrescentes: o primeiro período corresponde à Fase II e o segundo à Fase III. A Fase I apresenta um período de indução com rápido aumento da taxa de secagem em função da umidade.

As curvas de evolução da temperatura interna do produto ao longo da secagem, contemplando as três fases, realizada com escoamento do ar a 50 e 70°C e velocidade de 3,3 m/s com e sem aplicação de microondas na Fase III, estão ilustradas na Figura 3.9.

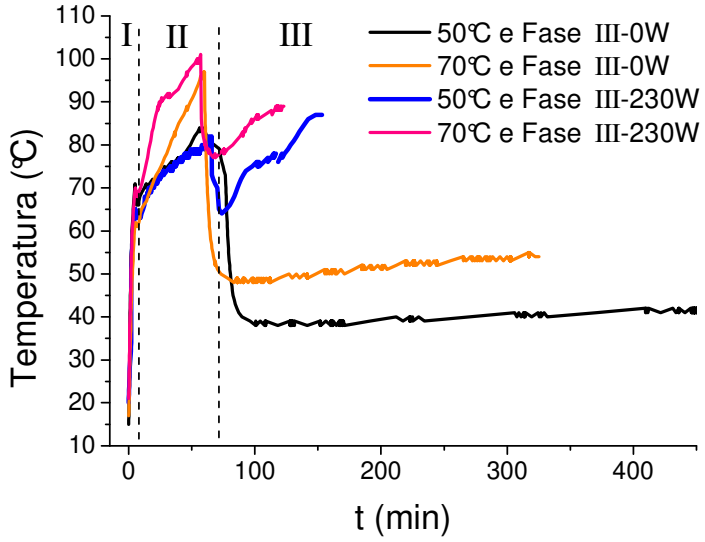


Figura 3.9 – Temperatura interna de fatias de banana osmoticamente desidratadas em função do tempo para a secagem com velocidade do ar de 3,3 m/s e temperatura do ar a 50 ou 70°C, com e sem aplicação de microondas na Fase III, englobando as três fases.

Analisando a Figura 3.9, observa-se que durante a Fase I e II a temperatura interna do produto apresentou um rápido aumento, sendo maior para a temperatura do ar de 70°C em relação à de 50°C. Na Fase III, com a redução da potência de microondas de 380W para 230W, a temperatura apresentou um rápido decréscimo, seguido de um aumento numa taxa semelhante à fase anterior. No caso da secagem finalizada apenas com ar quente (sem microondas na Fase III), a temperatura do produto cai consideravelmente para temperaturas próximas à do ar e mantém um aumento mais lento até o final do processo.

Os resultados da Fase III foram estudados separadamente daqueles da Fase I e II, tendo em vista que o principal objetivo desse estudo foi o de verificar a influência das variáveis de secagem (potência de microondas, temperatura e velocidade do ar) na parte final do processo de secagem de fatias de banana. Dessa maneira, a discussão dos resultados das Fases I e II será apresentada inicialmente, seguida daquela da Fase III.

A evolução da temperatura interna das fatias de banana e as curvas de secagem e taxa de secagem das Fases I e II conjuntamente está representada nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12. Durante a primeira fase, houve um rápido aumento da temperatura interna do produto, que foi acelerada em razão da geração de calor internamente ao produto pela alta potência de microondas aplicada. Conseqüentemente, foi observado um aumento na taxa de secagem da banana. Ao longo da segunda fase (Fase II), três condições de escoamento do ar foram testadas para uma mesma potência de microondas aplicada de 380W. Pode-se perceber que a temperatura do ar teve uma influência positiva na evolução da temperatura interna do produto, ao passo que a velocidade do ar não mostrou influência na mesma. Durante essa fase, pode-se observar que a banana apresentou taxa de secagem decrescente, conforme já observado por outros autores (SANKAT et al. 1996; MASKAN, 2000).

Em razão da diminuição em 50% da potência de microondas aplicada, a taxa de secagem apresentou uma rápida queda entre umidade adimensional de 0,9 e 0,8. Nessa fase, o material é bastante rico em água na forma livre, tanto no interior como na sua superfície, que por sua vez apresenta alto poder de absorção de microondas e facilidade de difusão na matriz sólida. Um aumento na temperatura do ar de 50°C para 70°C provocou um aumento na taxa de secagem, como conseqüência da elevação da temperatura interna do material.

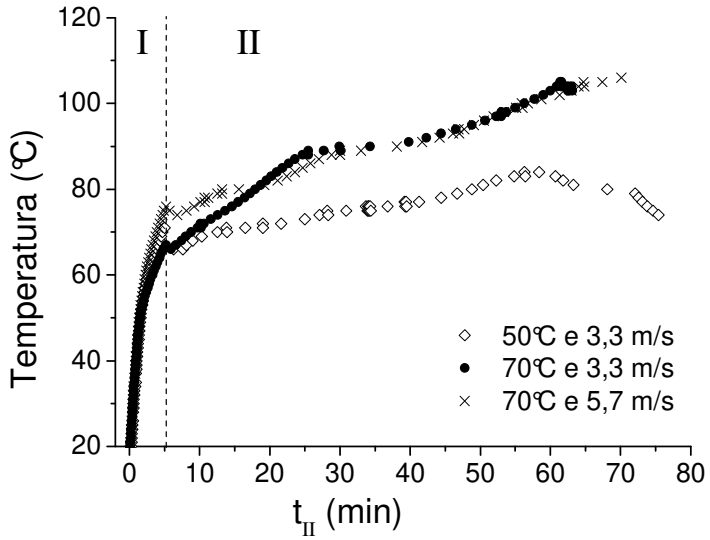


Figura 3.10 - Temperatura interna do produto em função do tempo de fatias de banana desidratadas osmoticamente secas 760W e ar a 80°C e 5,7 m/s na Fase I e, na Fase II, com 380W e as três condições do escoamento do ar.

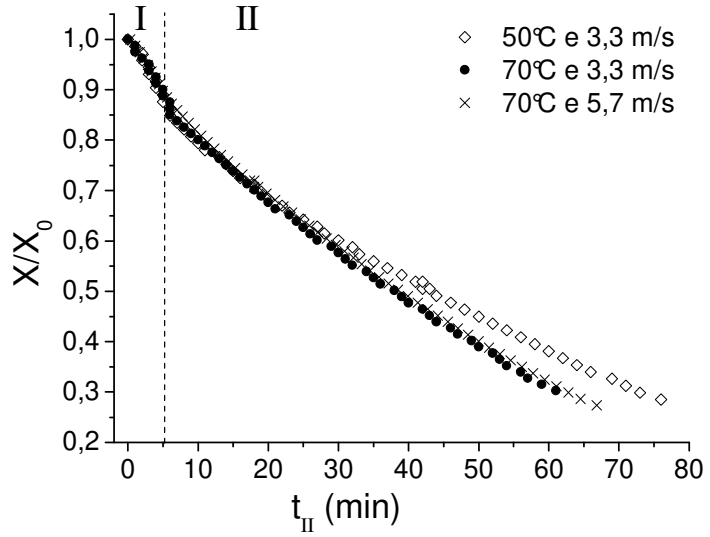


Figura 3.11 - Umidade adimensional em função do tempo de fatias de banana desidratadas osmoticamente secas 760W e ar a 80°C e 5,7 m/s na Fase I e, na Fase II, com 380W e as três condições do escoamento do ar.

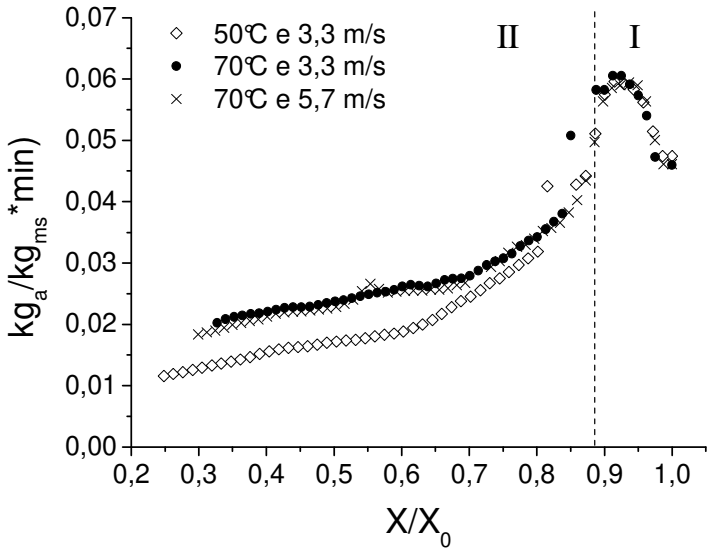


Figura 3.12 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional de fatias de banana desidratadas osmoticamente secas 760W e ar a 80°C e 5,7 m/s na Fase I e, na Fase II, com 380W e as três condições do escoamento do ar.

A Tabela 3.1 apresenta os tempos de secagem de fatias de banana osmoticamente desidratadas até o final das Fases II para as três condições do escoamento do ar apresentadas na Figura 3.6 (p. 50).

Tabela 3.1 - Tempo de secagem de fatias de banana osmoticamente desidratadas até o final da Fases II para as diferentes condições do escoamento do ar.

Escoamento do ar	P (W)	t_{II} (min)
50°C e 3,3 m/s	380	73±6
70°C e 3,3 m/s	380	60±3
70°C e 5,7 m/s	380	65±6

Pela análise da Tabela 3.1, observa-se que o tempo para secar fatias de banana até 0,67kg_a/kg_{ms} diminuiu de 73 min para 60 min para escoamento do ar a 50°C e 70°C, respectivamente. O tempo de secagem da Fase II não apresentou diferença significativa para um aumento na velocidade do ar de 3,3 para 5,7 m/s, para mesma temperatura do ar de

70°C. Essa resposta no tempo de secagem é conseqüência do comportamento da saída de umidade em função do tempo das fatias de banana submetidas a essas condições de processo.

De acordo com SANKAT et al. (1996), o tempo de secagem para atingir o mesmo teor de umidade ($0{,}67 kg_a/kg_{ms}$), pelo método por convecção sem aplicação de microondas, com ar a 60°C é de aproximadamente 10 horas para fatia de banana desidratada osmoticamente e de 15 horas para fatia de banana *in natura*. A aplicação de microondas nesse primeiro período de taxa de secagem decrescente (que engloba as Fases I e II) apresenta uma redução de 90% no tempo de secagem de fatias de banana desidratadas osmoticamente.

Para facilitar a análise isolada da Fase III, tomou-se a umidade final da Fase II (X_{II}) como sendo a umidade inicial e o tempo (t_{III}) como sendo a diferença entre o tempo total e o tempo de secagem até a Fase II.

As influências das condições de secagem da Fase III na evolução das temperaturas internas de fatias de banana osmoticamente desidratadas estão ilustradas nas Figuras 3.13, 3.14 e 3.15. Pela análise dessas figuras, observa-se claramente que um aumento na potência de microondas causou um aumento na temperatura interna do produto para uma mesma condição de temperatura e velocidade do ar. Esse aumento é conseqüência da conversão da energia eletromagnética em calor pelas fatias. Quanto maior a potência de microondas aplicada, maior é o aumento de temperatura do material ao longo do tempo. Isto ocorre porque a energia de microondas absorvida pelo material excede a energia requerida para a evaporação da umidade do material. A taxa de aumento da temperatura é menor para potências de microondas mais baixas, pois a energia absorvida pelo material compensa a quantidade de calor necessária para a evaporação da água.

Observou-se que a potência de microondas aplicada ao processo apresentou uma influência mais acentuada, em comparação às condições de escoamento do ar, na evolução da temperatura das fatias de banana previamente desidratadas osmoticamente ao longo do tempo durante a fase final de secagem. Também foi constatado que, quanto maior a temperatura do ar, maior a temperatura interna do produto, para uma mesma potência de microondas aplicada. O que era esperado, pois, como o interior do material apresentou temperaturas superiores ao ar ao seu redor, a transferência de calor do material para a superfície é menor para temperaturas do ar mais altas.

Entretanto, a velocidade do ar mais alta apresentou um efeito negativo na temperatura interna do produto para potência de microondas de 230W. Nesse caso, velocidades mais altas aumentam a transferência de calor por convecção entre a superfície do material e o ar, favorecendo uma diminuição da temperatura do material.

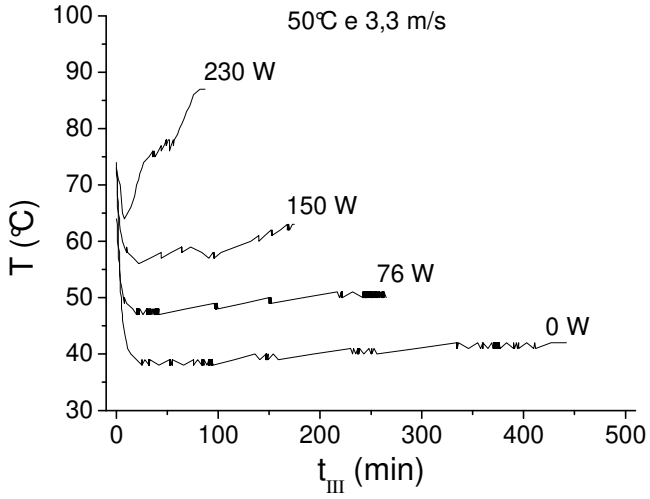


Figura 3.13 - Evolução da temperatura interna de banana em função do tempo de secagem na Fase III com ar a 50°C e 3,3 m/s para as quatro potências de microondas aplicadas (0, 76, 150 e 230W).

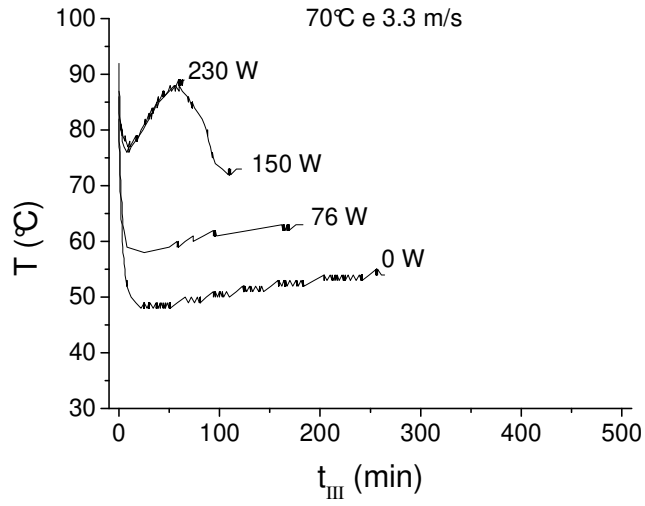


Figura 3.14 - Evolução da temperatura interna de banana em função do tempo de secagem na Fase III com ar a 70°C e 3,3 m/s para as quatro potências de microondas aplicadas (0, 76, 150 e 230W)

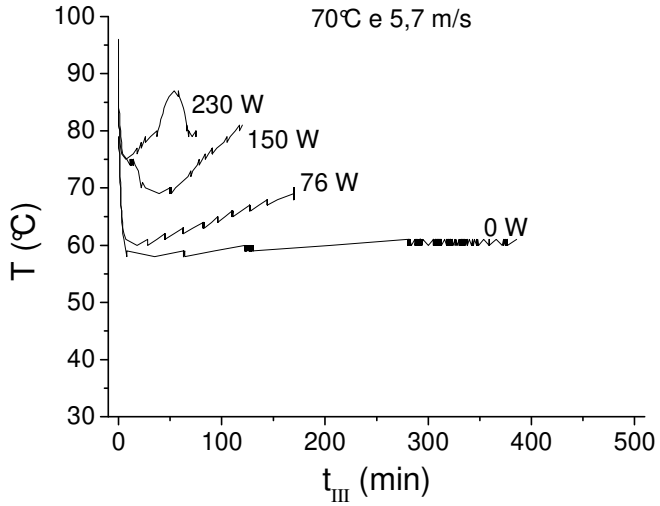


Figura 3.15 - Evolução da temperatura interna de banana em função do tempo de secagem na Fase III com ar a 70°C e 5,7 m/s para as quatro potências de microondas aplicadas (0, 76, 150 e 230W).

Com o intuito de melhor analisar a cinética do período final da secagem, Fase III, de banana osmoticamente desidratada, foi feito um ajuste matemático da curva de secagem utilizando o modelo de duas exponenciais (Eq. 2-19). Esse modelo foi escolhido pela característica da taxa de secagem em função da umidade adimensional que apresentava dois

períodos de taxa de secagem decrescentes. Uma ilustração desse comportamento pode ser observada na Figura 3.16, para a amostra seca com temperatura do ar de 70°C e velocidade de 5,7 m/s e com 150W de potência aplicada na Fase III.

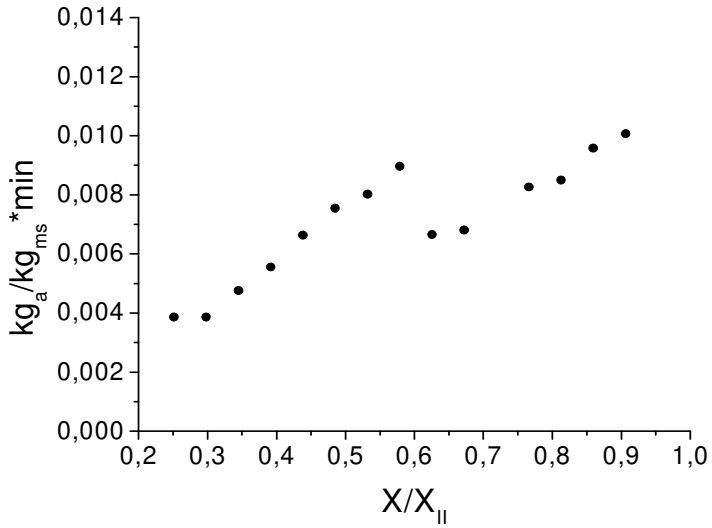


Figura 3.16 – Taxa de secagem em função do adimensional de umidade da Fase III para secagem com ar a 70°C e 5,7 m/s e potência de microondas aplicada de 150W.

Os valores dos parâmetros obtidos pelo modelo de duas exponenciais e os desvios calculados do modelo estão apresentados na Tabela 3.2. Observou-se que o modelo ajustou-se bem aos pontos experimentais, pela análise do erro relativo entre esses valores e os calculados pelo modelo.

Tabela 3.2- Parâmetros do modelo exponencial ajustado aos dados da curva de secagem

T_{ar} (°C)	50				70				70			
v_{ar} (m/s)	3,3				3,3				5,7			
P (W)	0	76	150	230	0	76	150	230	0	76	150	230
X_1	0,403	0,351	0,359	0,262	0,539	0,338	0,552	0,498	0,472	0,362	0,484	0,503
k_1	0,005	0,007	0,011	0,013	0,007	0,011	0,013	0,016	0,010	0,012	0,015	0,017
X_2	0,158	0,113	0,136	0,279	0,181	0,317	0,179	0,309	0,189	0,155	0,156	0,153
k_2	0,000	0,004	0,002	0,013	0,000	0,005	0,003	0,016	0,000	0,001	0,005	0,017
ER	0,01	0,02	0,01	0,006	0,07	0,01	0,008	0,007	0,01	0,01	0,01	0,01

As Figuras 3.17 e 3.18 ilustram as curvas de secagem e taxa de secagem em função do adimensional de umidade de todas as condições experimentais de secagem aplicadas na Fase III. A umidade final da Fase II (X_{II}) foi considerada como umidade inicial da Fase III para obtenção do adimensional de umidade (X/X_{II}). A taxa de secagem, que está representada na Figura 3.18, foi calculada como sendo a derivada da equação ajustada da curva de secagem.

De acordo com as curvas de taxa de secagem, foi observado que a potência de microondas apresentou um efeito positivo muito maior do que a temperatura e velocidade do ar na taxa de secagem de banana, pois um aumento na potência de microondas provocou um aumento no valor de k_1 de 2,6; 2,3 e 1,7 vezes para condições de 50°C e 3,3 m/s, 70°C e 3,3 m/s e 70°C e 5,7 m/s, respectivamente. As condições do escoamento do ar apresentaram efeitos também positivos, mas menos evidentes, sendo que a temperatura do ar apresentou um efeito maior comparado à velocidade do ar na cinética de secagem de banana. Para a secagem realizada com 100W de potência na fase final, o parâmetro k_1 apresentou aumento de 1,6 vezes com o aumento da temperatura do ar de 50°C para 70°C, enquanto que para o aumento da velocidade do ar, esse aumento foi de 1,1 vez. Esses efeitos, referentes ao escoamento do ar, foram mais evidentes nos experimentos realizados sem aplicação de microondas. Conseqüentemente, com o aumento da potência de microondas, as influências da temperatura e da velocidade do ar foram minimizadas na secagem de fatias de banana desidratadas osmoticamente.

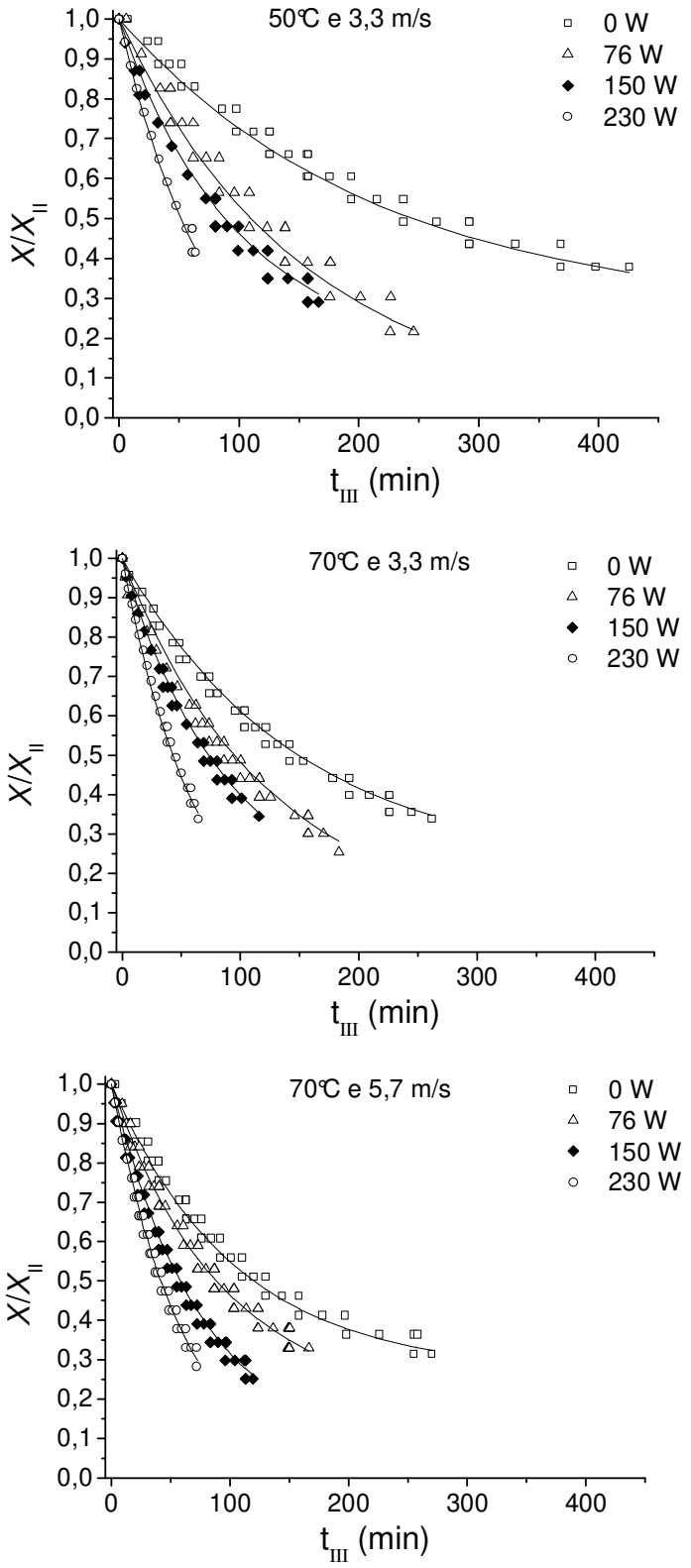


Figura 3.17 - Curvas de secagem e ajuste do modelo durante a secagem na Fase III em diferentes condições de escoamento do ar e potência de microondas.

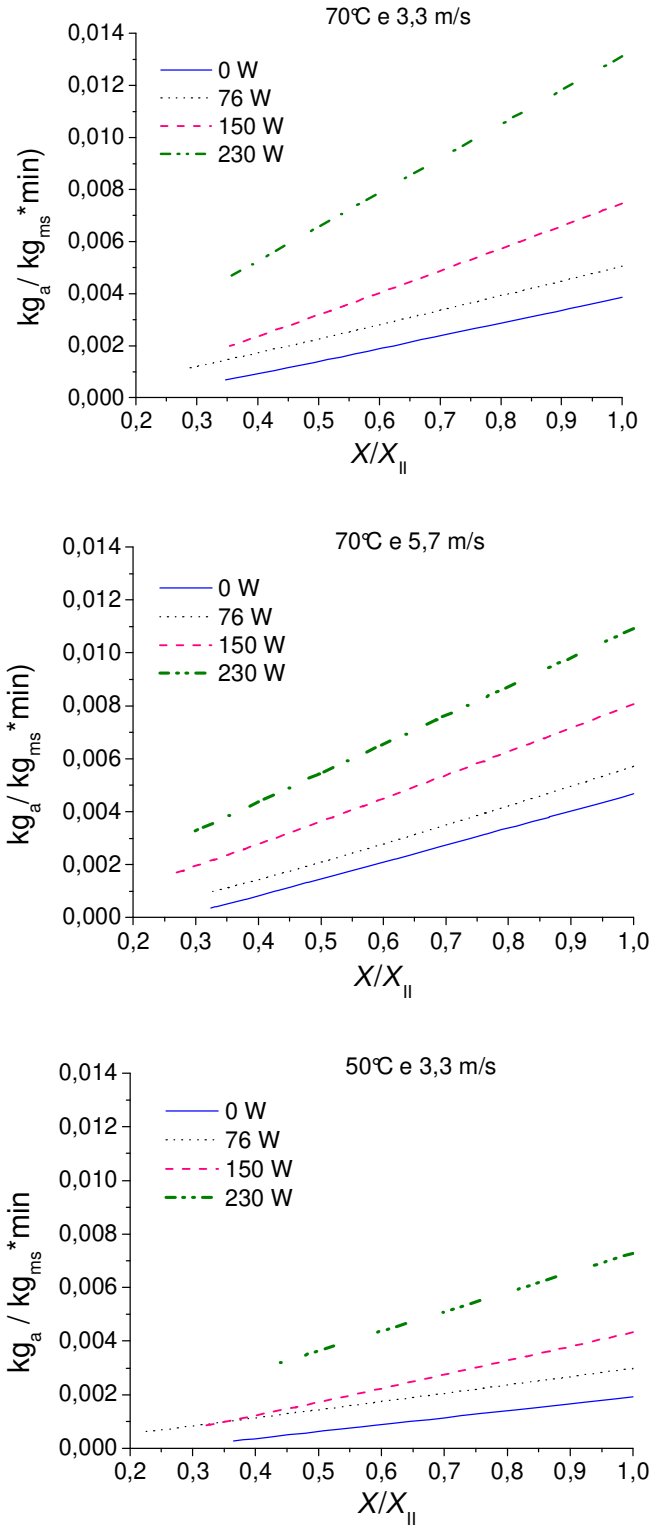


Figura 3.18 - Curvas de taxa de secagem durante a secagem na Fase III em diferentes condições de escoamento do ar e potência de microondas

O modelo exponencial (Eq. 2-17) também foi utilizado para ajustar os dados experimentais de adimensional de umidade em função do tempo para todas as condições experimentais testadas para a secagem da Fase III. Esse modelo foi escolhido por ser amplamente utilizado em trabalhos de secagem com microondas, possibilitando a comparação desses dados com os discutidos nos capítulos seguintes, além dos apresentados em relatos de outros autores (MASKAN, 2000; SOUSA, 2002, HEREDIA et al., 2007; WANG et al., 2007).

A Tabela 3.3 apresenta os valores obtidos do parâmetro do modelo (k_L) e do erro relativo calculado para a secagem de fatias de banana desidratadas osmoticamente em todas as condições da Fase III.

Tabela 3.3 - Parâmetros do modelo exponencial ajustado aos dados da curva de secagem

T_{ar} (°C)	50				70				70			
v_{ar} (m/s)	3,3				3,3				5,7			
PM (W)	0	76	150	230	0	76	150	230	0	76	150	230
k_L (min^{-1})	0,003	0,006	0,008	0,013	0,005	0,008	0,010	0,016	0,005	0,007	0,012	0,016
ER	0,02	0,03	0,03	0,01	0,03	0,01	0,02	0,008	0,03	0,02	0,02	0,02

Observa-se, pela Tabela 3.3, que os dados experimentais apresentaram uma boa correlação com aqueles calculados pelo modelo ajustado, tendo em vista os valores do erro relativo que variou de 0,8% a 3%. A constante de secagem (k_L) apresentou um comportamento similar à constante de secagem k_2 do modelo de duas exponenciais. Ou seja, a constante de secagem aumenta linearmente com o aumento da potência de microondas para as três condições do escoamento do ar: 50°C e 3,3 m/s ; 70°C e 3,3 m/s e 70°C e 5,7 m/s.

A temperatura do ar promove um aumento na constante de secagem de 40% para a secagem completada somente com ar (0W). Para as três potências aplicadas, o valor de k_L aumenta com a elevação da temperatura do ar (de 50 para 70°C). No entanto, com o aumento da potência de microondas aplicada, esse aumento diminui de 25, 20 e 18% para as potência de 76, 150 e 230W, respectivamente.

Os valores de k_L encontrados apresentam-se similares àqueles encontrados por SOUSA (2002), para secagem de banana *in natura* madura. O valor encontrado pelo autor para a secagem com aplicação de 0,3 W/g de densidade de potência disponível de microondas e temperatura do ar de 55°C foi de 0,012 min^{-1}, ao passo que MASKAN (2000) encontrou um valor de 1,319 min^{-1} para a secagem de banana com aplicação de microondas na fase final de 96W/g.

A Tabela 3.4 apresenta os tempos de secagem de fatias de banana osmoticamente desidratadas da Fase III e o tempo total final, que foi considerado a soma do tempo das três fases, para todas as condições de secagem com aplicação de microondas.

De acordo com os dados da Tabela 3.4, observa-se que os menores tempos de secagem da Fase III (t_{III}) encontrados foram para os experimentos conduzidos com aplicação de 230W de potência de microondas, nos quais as demais condições foram: 154 min para ar a 50 °C e 3,3 m/s, 123 min para ar a 70°C e 3,3 m/s e 134 min para ar a 70º e 5,7 m/s.

Tabela 3.4 - Tempo de secagem de fatias de banana osmoticamente desidratadas da Fase III e tempo total final para as diferentes condições de secagem.

Escoamento do ar	P (W)	t_{III} (min)	t_{total} (min)
50°C e 3,3 m/s	0	442	518
	76	263	341
	150	175	263
	230	88	154
70°C e 3,3 m/s	0	265	325
	76	183	242
	150	123	186
	230	66	123
70°C e 5,7 m/s	0	286	351
	76	203	275
	150	124	187
	230	76	134

Considerando o tempo total de secagem (t_{total}), os tempos encontrados nesse trabalho para a secagem realizada com aplicação de microondas em todas as fases variaram entre 123 e 341 min. Esses tempos de secagem são um pouco mais longos do que aqueles encontrados por MASKAN (2000) para secagem com aplicação de microondas na fase final de banana. Essas diferenças são causadas pelas diferenças estruturais das frutas, pelo tempo de desidratação osmótica utilizada e, principalmente, pela densidade de potência disponível aplicada (expressa em W/g), que é a relação entre potência de microondas aplicada e massa de material. Nesse trabalho, o autor encontrou tempos de secagem da ordem de 25 minutos, no entanto, a densidade de potência disponível aplicada na etapa final da secagem foi aproximadamente 96W/g, mais de 100 vezes superior às utilizadas neste trabalho, que variou de 0,76W/g até 0,0760W/g, desconsiderando a etapa de secagem apenas com ar (0W, na Fase III).

Os experimentos realizados mostraram que as microondas provocaram uma geração de calor internamente ao material, criando um gradiente de pressão de vapor entre o seu centro e sua superfície, resultando em uma rápida remoção de água. (LIN et al., 1998). Entretanto, com a grande diminuição do teor de água no final da secagem (principalmente entre 0,67 e 0,17 kg_a/kg_{ms}), dois comportamentos paralelos podem ser identificados: um considerável decréscimo na absorção de energia de microondas pelo material (associados a valores menores de ε' e ε''), e uma maior resistência à difusão de água, como resultado das camadas de células secas e uma redução na força impulsora, causada pelos gradientes de concentração e pressão. De acordo com a literatura, a resistência à transferência de umidade durante a secagem de bananas aumenta quando o produto atinge o teor de umidade próximo a 0,67 kg_a/kg_{ms}, após o que a secagem ocorre mais lentamente (SANKAT, et al., 1996; DEMIREL & TURHAN, 2003; MASKAN, 2000, SOUSA, 2002).

3.4.2 Avaliação da qualidade do produto

A Tabela 3.5 apresenta os valores encontrados para composição da banana *in natura* e desidratada osmoticamente em solução de sacarose a 55°Brix e 40°C durante 90 minutos.

Tabela 3.5 - Composição da banana *in natura* e desidratada osmoticamente

Composição	*in natura*	Osmo-desidratada
Umidade (g/100g)	74,54 ± 0,88	70,00± 1,63
X (kg_a/kg_{ms})	2,93 ± 0,01	2,33 ± 0,01
ºBrix	18,8 ± 1,4	23,2 ± 1,3
a_w	0,970 ± 0,005	0,956 ± 0,011

De acordo com os dados mostrados na Tabela 3.5, as fatias de banana perderam 4,5% de umidade e ganharam 4,4% de açúcares durante a desidratação osmótica. Como resultado da diminuição do teor de umidade e da incorporação de sólidos, a atividade de água da fruta *in natura* diminui de 0,970 para 0,956 após a desidratação osmótica.

A Tabela 3.6 apresenta os dados de atividade de água atingida pelas amostras secas submetidas à secagem em todas as condições experimentais.

Tabela 3.6 - Efeitos das condições de secagem com aplicação de microondas nos valores da atividade de água das fatias de banana previamente desidratadas osmoticamente.

	50°C e 3,3 m/s	70°C e 3,3 m/s	70°C e 5,7 m/s
P (W)	a_w	a_w	a_w
0	0,588 ± 0,080	0,624 ± 0,050	0,550 ± 0,030
76	0,611 ± 0,020	0,594 ± 0,100	0,528 ± 0,040
150	0,648 ± 0,050	0,526 ± 0,070	0,577 ± 0,080
230	0,625 ± 0,020	0,693 ± 0,100	0,593 ± 0,080

De acordo com os dados observados na Tabela 3.6, as amostras secas em todas as condições testadas atingiram valores de atividade de água inferiores a 0,7 e, em muitos casos, inferiores a 0,6. Portanto, as amostras podem ser consideradas de umidade intermediária. Para potências mais altas aplicadas à secagem, 150 e 230W, os valores de atividade de água apresentaram desvios maiores. Adicionalmente, pode-se observar visualmente a ocorrência de fatias com o interior úmido, com uma freqüência maior nessas condições de potência aplicada. Por meio dessas observações, verificou-se uma menor homogeneidade da secagem com a aplicação de microondas, a potências mais elevadas.

Com a aplicação de microondas, a energia eletromagnética é convertida rapidamente em calor que é utilizado, sob a forma de calor latente, para a vaporização da

água, acelerando a cinética de secagem. Este fenômeno, juntamente com a falta de homogeneidade da distribuição de campo eletromagnético na cavidade, foi responsável pelas maiores diferenças entre as amostras secas em diferentes regiões do secador, conforme aumentava a potência aplicada.

A Figura 3.19 apresenta os parâmetros de cor (*L*, a** e *b**) das fatias de banana desidratadas osmoticamente após a secagem com aplicação de microondas, obtidos por espectrofotometria.

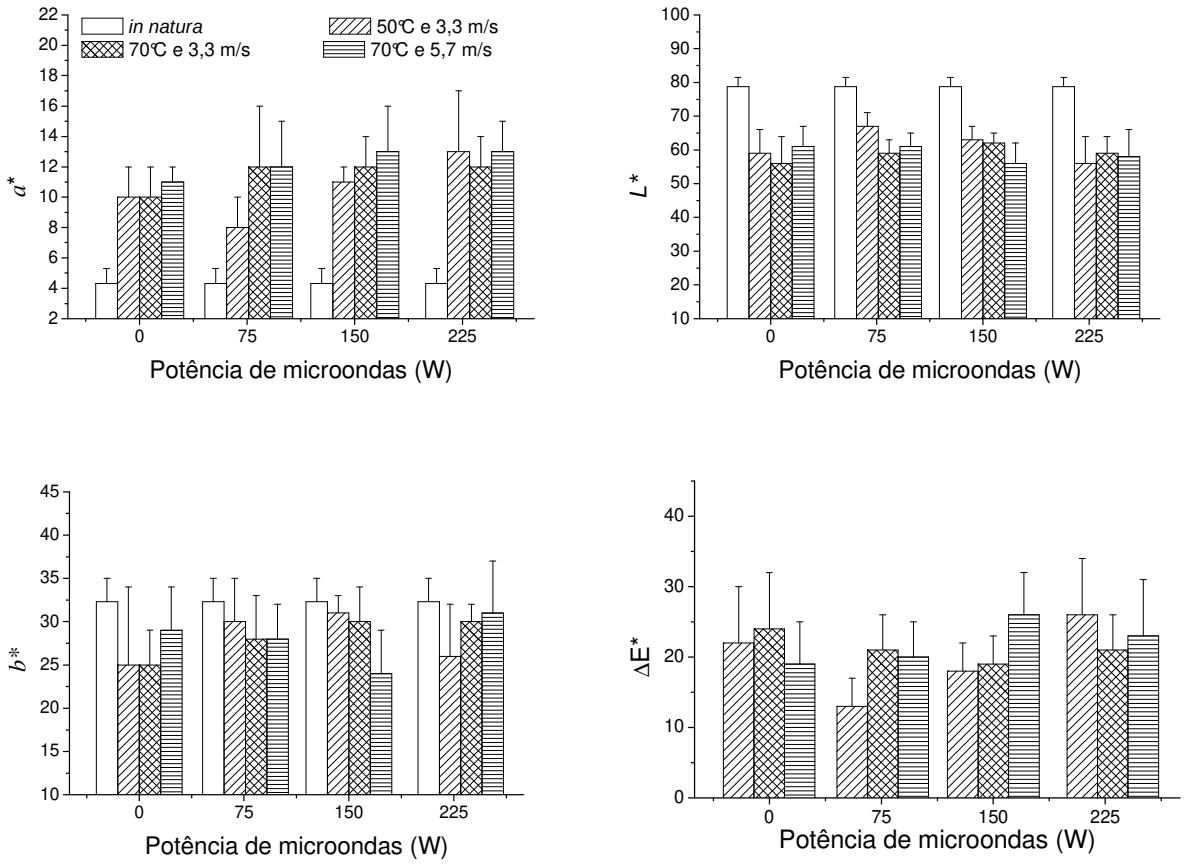


Figura 3.19 – Parâmetros de cor (*L*, *a**, *b* e ΔE*) das fatias de banana *in natura* e secas em função da potência de microondas aplicada para as três condições de escoamento do ar.

A banana *in natura* apresentou valores de *L*, a** e *b** de 78; 4,3 e 32, respectivamente. As fatias de banana desidratadas osmoticamente e secas com aplicação de microondas apresentaram coloração mais escura, verificada pelo parâmetro *L** que atingiu valores abaixo de 65, em comparação à fruta *in natura*. O processamento também proporcionou fatias de banana seca com coloração mais avermelhada, que pode ser quantificada pelo aumento no parâmetro *a** para valores acima de 8, em comparação à fruta *in natura*. Entretanto, não foram detectadas diferenças significativas no parâmetro *b** das frutas secas em comparação à *in natura*.

Observa-se que as condições de temperatura e velocidade do ar e potência de microondas testadas na secagem de banana não apresentaram diferenças significativas para nenhum dos parâmetros de cor. A perda de cor das fatias secas, em relação à *in natura*, foi avaliada pelo parâmetro ΔE*. Os valores médios da medida de perda de cor apresentaram-se entre 26 e 13, mas não apresentaram diferenças significativas para as condições de secagem estudadas. Portanto, pode-se dizer que as condições da secagem estudadas não apresentaram influência nos parâmetros de cor (*L*, a** e *b**) e na perda de cor (em relação a fruta *in natura* - ΔE*). Provavelmente, a desidratação osmótica com adição de ácido cítrico e ascórbico aplicada previamente à secagem, somada ao aquecimento ao longo da secagem, conferiu uma estabilidade à cor das fatias de banana.

A Figura 3.20 ilustra a variação de cor entre uma fatia *in natura* e uma fatia seca. Comparando as duas amostras, observa-se que a fruta seca apresentou uma coloração de um amarelo mais escuro em relação à fruta *in natura*. Essa variação foi detectada pelo aumento dos parâmetros *L** e *a**.

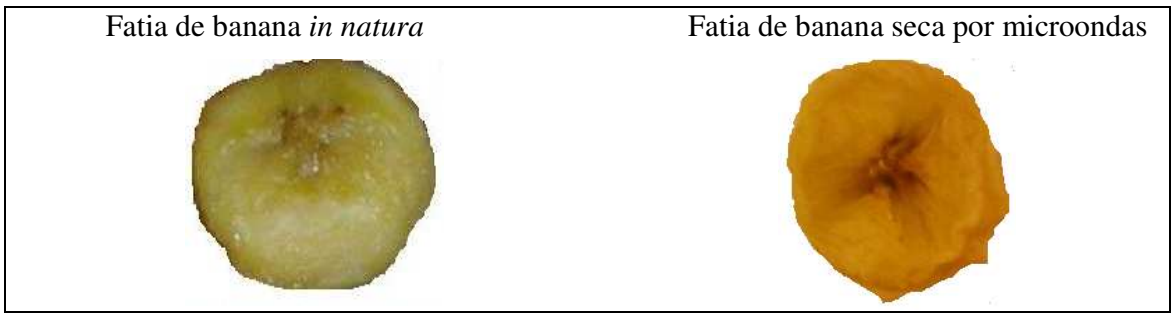


Figura 3.20 - Ilustração da mudança de coloração da fruta seca em relação à fruta *in natura*.

MASKAN (2000) chegou a resultados semelhantes com relação à coloração da banana seca com aplicação de microondas na fase final da secagem e SANKAT et al. (1996) observaram que bananas previamente desidratadas e secas, por convecção de ar quente, apresentam uma coloração mais alaranjada em relação à fruta *in natura*.

A Figura 3.21 apresenta o volume aparente e a porosidade das amostras de banana secas para todas as condições de temperatura e velocidade do ar e de potência de microondas aplicadas na secagem de fatias de banana.

Pela análise da Figura 3.21, observa-se que o volume aparente e a porosidade apresentaram um leve decréscimo com o aumento da potência de microondas aplicada proporcionando à fruta uma aparência típica de banana passa. Resultados semelhantes foram encontrados no trabalho de RAGHAVAN & SILVEIRA (2001) para morangos desidratados osmoticamente e secos com aplicação de microondas. No entanto, as porosidades das frutas secas sob todas as condições estudadas apresentaram-se maior que aquela da fruta *in natura* (0,05).

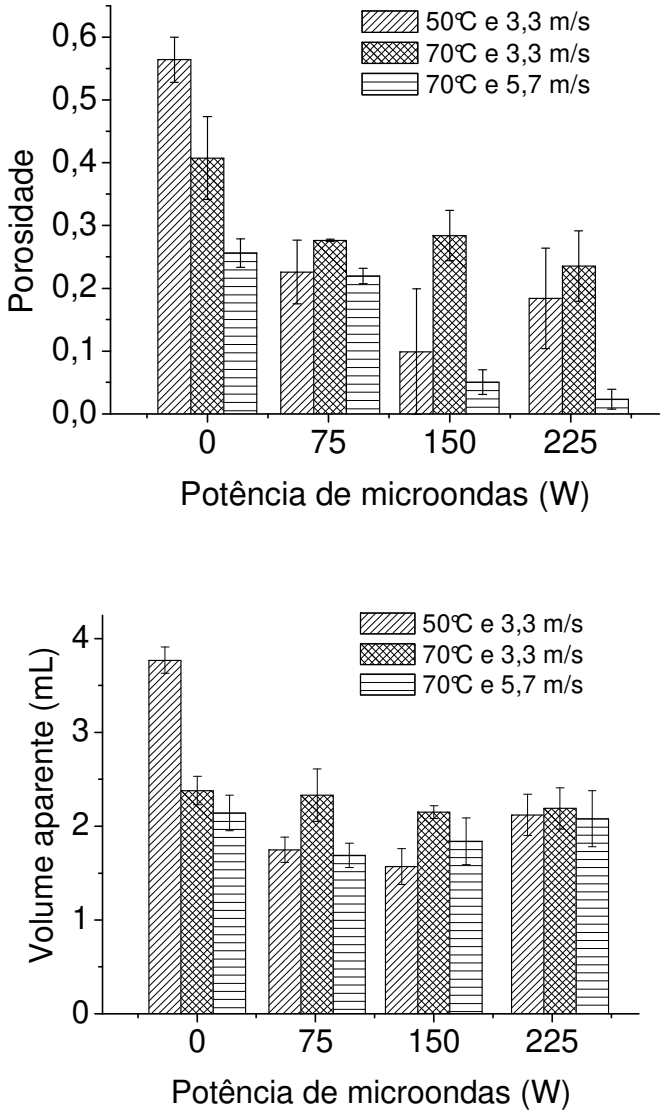


Figura 3.21 - Volume aparente e porosidade das fatias de banana secas em função da potência de microondas aplicada para as três condições de escoamento do ar.

Para a secagem realizada sem aplicação de microondas na Fase III, o aumento da temperatura do ar de 50°C para 70°C apresentou uma diminuição do volume aparente das fatias secas de 3,8 para 2,4 mL e da porosidade de 56 para 41%. A aplicação de potências moderadas (76 e 150W) na última fase da secagem proporcionou um aumento dessas

propriedades da banana seca para um aumento da temperatura de 50 para 70°C. Esses resultados não apresentaram diferenças significativas para potência mais elevada (230W).

A velocidade do ar apresentou efeito negativo no volume e na porosidade da banana seca. Ou seja, um aumento na velocidade do ar de 3,3 m/s para 5,7 m/s provocou uma diminuição do volume aparente e da porosidade. Para os experimentos sem aplicação de microondas na Fase III, a porosidade diminui de 41 para 25% e o volume aparente, de 2,38 para 2,14 mL, com a redução da velocidade do ar. Com a aplicação de microondas, essa redução da porosidade foi maior, diminuindo de 24 para 2,3% com a aplicação de 230W de potência.

Esse fenômeno ocorreu provavelmente em conseqüência do resfriamento superficial das fatias, que gera uma diminuição na pressão interna da fruta, causando um maior encolhimento do material. Novamente, para potência de 230W, não houve variação do volume aparente da fruta seca. As variações dessas duas propriedades físicas da banana submetida à secagem podem ser explicadas pela elevação brusca da temperatura interna da fruta durante a secagem em razão da energia de microondas. É possível que a alta taxa de transição da água líquida em vapor e o rápido aumento da pressão dos poros provoquem o rompimento da estrutura celular do material.

O efeito do resfriamento superficial do material pelo aumento da velocidade do ar pode ser vantajoso para a qualidade do produto seco final com relação à quantidade de fatias queimadas no processo. Embora a aplicação de microondas diminua o tempo de secagem, potências elevadas tendem a aumentar o número de fatias queimadas. A Figura 3.22 mostra a variação da porcentagem de fatias queimadas em função da potência de microondas aplicada para as três condições de escoamento do ar.

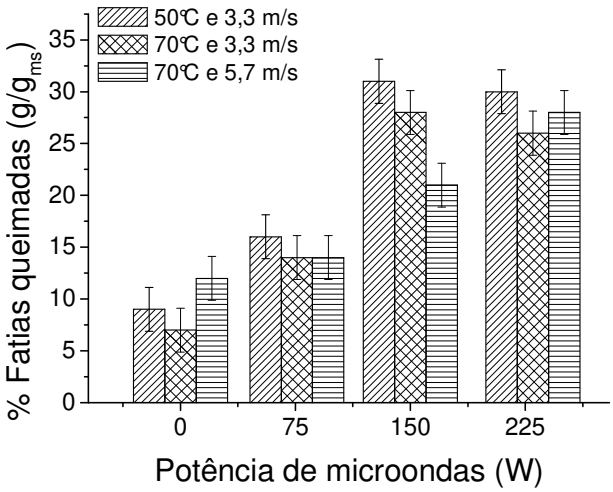


Figura 3.22 - Fatias queimadas em função da potência de microondas aplicada para as três condições de temperatura e velocidade do ar de secagem.

Das fatias de banana secas apenas com ar quente na fase III, 9% (em peso) eram fatias queimadas, mesmo para escoamento do ar a 50°C. Este resultado indica que as amostras começaram a queimar com teores de umidade superiores a 0,67 $kg_{água}/ks_{ms}$ devido à aplicação de 380W de potência de microondas durante a Fase II, o que representa uma densidade de potência disponível de 0,38W/g. Condições mais brandas de velocidade e temperatura do escoamento do ar apresentaram uma leve tendência de redução no número de fatias queimadas para secagem realizada com aplicação de 150 e 230W de potência de microondas na fase III. Essa redução é conseqüência do resfriamento superficial das fatias pelo escoamento do ar, que ocorre simultaneamente ao aquecimento interno das fatias pela energia de microondas.

3.5 Conclusões

A aplicação de energia de microondas apresentou um efeito mais acentuado na remoção de umidade durante a secagem de banana previamente desidratada osmoticamente do que o fenômeno de convecção proporcionado pelo ar quente. Um aumento na potência de microondas causou um aumento na taxa de secagem e, conseqüentemente, uma diminuição do tempo de secagem de fatias de banana no período final da secagem.

A temperatura do ar também apresentou um efeito positivo na cinética de secagem de fatias de banana previamente desidratadas osmoticamente e, conseqüentemente, no tempo da secagem, para os dois períodos de taxa decrescentes de secagem. Entretanto, esse efeito foi bem inferior àquele proporcionado pela aplicação de microondas na fase final do processo.

A velocidade do ar não apresentou influência na cinética de secagem com aplicação de microondas no primeiro período de taxa decrescente de secagem (até 0,67 kg_a/kg_{ms}). Para o segundo período (0,18 kg_a/kg_{ms}), a velocidade apresentou um efeito positivo na cinética de secagem de banana desidratada osmoticamente.

As amostras secas apresentaram valores de atividade de água abaixo de 0,7, sendo que, para a maioria das condições, atingiram valores abaixo de 0,6. As fatias secas apresentaram um escurecimento em relação à fruta *in natura*, mas condições de potência de microondas aplicada e de temperatura e velocidade do ar não apresentaram influência na cor das fatias.

O aumento da temperatura de secagem promoveu um aumento na porosidade e no volume aparente das frutas secas, quando microondas foram aplicadas ao processo. Por

outro lado, um aumento na velocidade do ar produziu fatias de banana seca com menor porosidade.

Potências de microondas elevadas geraram um rápido aumento da temperatura interna do material e, como conseqüência, produziram uma maior quantidade de fatias queimadas. Tais resultados levam à conclusão de que é necessário controlar a potência de microondas durante a fase final da secagem para evitar essa rápida elevação da temperatura do produto e a ocorrência de fatias queimadas.

As condições do escoamento do ar apresentaram um efeito interessante quando combinadas com a aplicação de microondas, especialmente para potências mais elevadas de microondas, uma vez que baixas temperaturas ou altas velocidades do ar podem causar um resfriamento superficial do produto. Essa interação pode ser explorada para uma melhoria da qualidade do produto final e uma redução considerável do tempo de secagem.

Capítulo 4 - Período inicial da secagem: Influência da aplicação de microondas e da desidratação osmótica

4.1 Introdução

Este capítulo é dedicado aos resultados do estudo da secagem de banana, durante o primeiro período de secagem. Como apresentado anteriormente, a secagem de banana, tanto convectiva quanto convectiva combinada com microondas, apresenta dois períodos de taxas decrescentes. O primeiro período, que neste trabalho será denominado período inicial da secagem, estende-se até a umidade de aproximadamente 0,67kg_a/kg_{ms} (40%-bu). O segundo período de secagem corresponde à redução subseqüente da umidade da banana até o final da secagem. A vantagem da aplicação de microondas é acelerar o processo de secagem, motivo pelo qual diversos autores têm estudado e sugerido sua adoção no segundo período de taxa decrescente de secagem, que é aquele em que a retirada de umidade se torna mais difícil. No entanto, a aplicação de microondas no primeiro período ainda não está bem esclarecida, em termos dos possíveis ganhos nas características do produto final aliado à aceleração da secagem. A essa abordagem sobre a influência da aplicação de microondas durante o período inicial da secagem, adiciona-se, também, uma discussão sobre a

influência da desidratação osmótica prévia na cinética da secagem e na qualidade da banana de teor de umidade intermediário.

4.2 Objetivos

Esta parte do estudo teve como objetivo principal investigar o efeito da potência de microondas aplicadas e da desidratação osmótica no período inicial da secagem de banana.

Em correlação com os resultados dessa pesquisa, pretende-se discutir seus objetivos específicos, que foram:

1) estudar o efeito da potência de microondas aplicada na cinética do período inicial da secagem de fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente, até 40% de umidade bu, correspondente a 0,67 $kg_{água}/kg_{ms}$;
2) estudar o efeito da incorporação de sólidos, devido à desidratação osmótica, na cinética do período inicial da secagem de fatias de banana, até 40% de umidade bu, correspondente a 0,67 $kg_{água}/kg_{ms}$;
3) estudar a influência das condições de secagem e da desidratação osmótica prévia na qualidade da banana de umidade intermediária (40% de umidade bu), por meio da análise de atividade de água, porosidade, encolhimento e capacidade de reidratação.

4.3 Material e Métodos

4.3.1 Seleção e preparação da matéria-prima

Foram utilizadas bananas da variedade nanicão (*Musa acuminata* subgrupo Cavendish), fornecidas pela empresa Magário Comércio de Frutas Ltda. Logo após a aquisição no CEASA-Campinas, as pencas de banana foram aclimatizadas em câmara fria a 17°C até atingir o estágio de maturação desejado. As frutas foram escolhidas dentro do estágio de maturação "de vez", caracterizado pela coloração da casca mais amarela do que verde e teor de sólidos solúveis entre 9 e 12°Brix. O tamanho da fruta também foi usado como critério de seleção, procurando-se homogeneizar o máximo possível a amostragem. O estágio de maturação dessa etapa do trabalho difere daquele utilizado no Capítulo 3, devido às diferenças entre as amostras brasileiras e as obtidas na Suécia. As frutas brasileiras apresentaram uma estrutura mais frágil com 18°Brix, dificultando o estudo da cinética de secagem.

As frutas foram descascadas manualmente e cortadas transversalmente ao eixo, em fatias de 10mm, com a ajuda de um dispositivo de fatiar projetado para esse fim. Logo após o corte, as fatias foram imersas em solução contendo 1% de ácido cítrico e 0,5% de ácido ascórbico, a 70°C durante 20 segundos. Esse pré-tratamento foi realizado para minimizar o escurecimento enzimático da fruta fatiada. A condição do mesmo, por sua vez, foi escolhida baseada em testes preliminares de observação visual da mudança da coloração

superficial das fatias e da manutenção da textura[2]. Para a realização desses experimentos, foram testadas três temperaturas da solução contendo 1% de ácido cítrico e 0,5% de ácido ascórbico (25°C, 70°C e 85°C) e quatro tempos de imersão (10min, 5min, 2min, e 20s). As observações das fatias foram realizadas logo após a imersão, assim como após serem estocadas por 16 horas sob condições ambientes e sob refrigeração a 5°C.

4.3.2 Caracterização da matéria-prima e do produto

As frutas *in natura* foram caracterizadas pelas análises do teor de umidade (X), do teor de açúcares redutores (AR) e totais (AT), do teor de proteínas, dos sólidos solúveis totais (SST), da atividade de água (a_w), teor de cinzas e do volume aparente (V_{ap}).

As amostras desidratadas osmoticamente foram caracterizadas pelas análises do teor de umidade, do teor de açúcares redutores e totais, dos sólidos solúveis totais (SST), da atividade de água (a_w) e do volume aparente (V_{ap}).

Os produtos parcialmente secos foram caracterizados de acordo com o teor de umidade, a atividade de água, o volume aparente, o encolhimento (V/V_0), o volume de sólidos (V_{sa}), a porosidade (ε) e a capacidade de reidratação (CR).

- **Determinação do teor de umidade**

Fruta in natura e desidratada osmoticamente

A determinação do teor de umidade dessas amostras foi realizada no analisador de umidade a microondas CEM , modelo SMART 5, que permite realizar a quantificação da umidade em um intervalo de tempo de 5 a 10 minutos. Para isso o equipamento foi

[2] As amostras caracterizadas como sendo as que mantiveram a textura foram aquelas que não apresentaram aspecto de fruta cozida, por meio do amolecimento do tecido.

calibrado de acordo com o método gravimétrico 934.06 da AOAC (1997) em estufa a vácuo (pressão ≤100mmHg) a 70°C. As condições da calibração e de operação do equipamento encontram-se nos apêndices (Apêndice I).

Fruta seca

O teor de umidade foi determinado segundo método gravimétrico 934.06 da AOAC (1995) em estufa a vácuo (pressão ≤100mmHg) a 70°C.

- **Açúcares redutores e totais**

Açúcares redutores e totais foram determinados pelo método de Lane-Eynon (AOAC 923.09, 1995). Esse método consiste da quantificação do teor de açúcares redutores e totais por meio da leitura do volume de solução de açúcar necessário para reduzir completamente o cobre presente na solução de Fehling de volume conhecido.

- **Teor de proteínas**

O teor de proteínas foi determinado de acordo com o método semi-micro de Kjeldal (AOAC, 1997). Essa metodologia baseia-se na determinação de nitrogênio total presente na amostra, ou seja inclui nitrogênio de outros compostos nitrogenados não protéicos e, portanto , é expresso em proteína bruta.

- **Teor de Cinzas**

O teor de cinzas foi determinado segundo o método 31.1.04 da AOAC (1997).

- **Capacidade de reidratação (CR)**

As amostras secas foram re-hidratadas durante 15 horas em 100mL de água destilada a 25°C. A capacidade de reidratação foi medida pela diferença entre a massa da amostra seca (W_{seca}) e após a reidratação (W_{rei}) em relação à massa seca da seguinte forma:

$$CR(\%) = \frac{W_{rei} - W_{seca}}{W_{seca}} \times 100 \qquad \text{Eq. 4-1}$$

- **Encolhimento (V/V_0)**

O encolhimento foi calculado como sendo a relação entre o volume aparente da amostra seca e o seu volume aparente inicial.

As metodologias para a realização das análises de sólidos solúveis totais, da atividade de água, do volume aparente , do volume de sólidos e da porosidade (ε) já foram descritos no ítem (3.3.2).

4.3.3 Desidratação osmótica

As condições utilizadas na desidratação osmótica foram escolhidas baseadas nos estudos realizados por MAURO & MENEGALLI (1995), ARAÚJO (2000) e ANTONIO (2002). Nesses trabalhos os autores concluíram que, sob as condições citadas a seguir, a banana desidratada apresentou menor alteração na estrutura celular, assim como uma boa relação entre máxima perda de água e mínima incorporação de sólidos. Com exceção de MAURO & MENEGALLI (1995), os demais autores realizaram o estudo com banana no estágio de maturação "de vez", com teor de sólidos solúveis totais entre 9 e 12°Brix.

O processo foi realizado em solução de sacarose na concentração de 55ºBrix e temperatura constante de 40ºC com agitação constante de 80 rpm. A proporção entre massa de fruta em relação à massa de solução foi mantida em 1:10 (fruta:solução). O processo foi desenvolvido em uma incubadora (TECNAL, modelo TE421), com controle de agitação e temperatura.

A cinética de desidratação osmótica realizada nas condições citadas foi estudada com o intuito de definir os tempos de processo necessários para a obtenção de amostras

com diferentes teores de sólidos e conteúdo de umidade. Essas amostras foram utilizadas como matéria-prima nos estudos posteriores de secagem com aplicação de microondas.

Para o acompanhamento da cinética de desidratação osmótica das fatias de banana, foi realizado o seguinte procedimento: frascos de vidro contendo a solução foram colocados dentro da incubadora até que o equilíbrio térmico fosse atingido a 40°C. Em seguida, as amostras de banana, previamente preparadas e pesadas, foram transferidas para os frascos individualmente e o sistema de agitação da incubadora foi ligado. Um conjunto de quatro fatias foi retirado em intervalos de tempo de 20 minutos na primeira hora e de 30 minutos no restante do tempo de processo, totalizando 210 min. As amostras retiradas da incubadora foram drenadas em peneira, imersas rapidamente em água destilada para retirada do excesso de solução de sacarose, enxugadas com papel toalha na superfície e pesadas. Após a pesagem foi determinado o conteúdo de umidade de cada fatia.

O acompanhamento da perda de água (PA), perda de peso (PP) e ganho de sólidos (GS) foi realizado por meio de balanços de massa, utilizando os dados de umidade e massa das fatias antes e após a desidratação osmótica e as Eq. 2-8, Eq. 2-9 e Eq. 2-10.

Dessa forma, após serem definidos os tempos de processamento, a preparação das amostras para o estudo da secagem consistiu na desidratação osmótica de aproximadamente 500g de fruta realizada nas condições e no equipamento já citados. Após a desidratação, as amostras foram embaladas em papel filme e estocadas, por 16 horas, a 5°C para a posterior secagem. Os teores de água, sólidos solúveis (°Brix) e açúcares redutores e totais foram determinados previamente aos experimentos de secagem.

4.3.4 Secagem assistida a microondas

4.3.4.1 Forno de microondas adaptado

Para a realização do processo de secagem assistida a microondas, os experimentos foram conduzidos em um forno doméstico a microondas, da marca Brastemp, cavidade com volume de 38 litros, modelo BMC38-A, com 900W de potência nominal máxima, devidamente adaptado no Laboratório de Microondas Aplicadas (LMA). A Figura 4.1 ilustra a montagem experimental utilizada.

Figura 4.1 - Sistema de secagem em forno de microondas adaptado: (1) célula de fluxo laminar; (2) manômetro "U"; (3) controlador de temperatura do ar de entrada; (4) ventilador centrífugo; (5) aquecedor por resistência elétrica; (6) difusor de ar; (7) tubulação auxiliar para exaustão do ar; (8) forno de microondas; (9) e (10) sistema de aquisição dos dados e controle.

Os vidros interno e externo de proteção da tela metálica de blindagem foram removidos da porta do forno, de modo a permitir a admissão do ar dentro da cavidade do

forno através do ajuste de uma peça metálica (difusor) desenhada e construída de modo a encaixar-se na porta do mesmo. Esta peça foi interligada externamente a um sistema gerador de ar quente, composto por um ventilador centrífugo conectado a uma célula de fluxo laminar e de um manômetro "U" calibrado para a leitura da vazão do ar de entrada. Na parte de trás do forno, foi encaixada uma tubulação como meio auxiliar de canalizar o ar de exaustão de dentro da cavidade para o ambiente externo. Desta maneira, a direção do escoamento de ar dentro da cavidade foi paralela ao produto. O equipamento estava conectado a um sistema de controle de potência de microondas, aplicada em função da temperatura superficial do produto, medido por um sensor de temperatura de infra-vermelho inserido na parte superior do forno. Um sistema complementar também permitia o monitoramento das temperaturas de entrada e de saída do ar. Todo o sistema de monitoramento e controle foi realizado por um controlador lógico modelo MCI02 (HI Tecnologia) conectado a um micro-computador.

A cavidade de microondas do equipamento utilizado é do tipo ressonante com múltiplos modos. Como propriedade inerente da distribuição de campo eletromagnético nessa cavidade, há o surgimento de zonas de maior e de menor aquecimento que geram um aquecimento espacial não homogêneo, em virtude da formação de ondas estacionárias. Dessa forma, faz-se necessária a utilização do prato giratório para uniformizar o aquecimento. O material disposto dentro da cavidade deve obedecer sempre à mesma posição para todas as corridas, pois o padrão das ondas estacionárias espaciais muda de acordo com a carga inserida e a posição da mesma.

4.3.4.2 Procedimento experimental

As amostras previamente desidratadas, assim como as *in natura* pré-tratadas, foram retiradas do refrigerador e imediatamente pesadas em uma bandeja de polipropileno e conduzidas para o sistema de secagem com aplicação de microondas. Foram utilizadas 400g de fatias de banana dispostas lado a lado na bandeja de polipropileno vazada, que foi disposta na parte central da cavidade do forno sobre o prato giratório. A Figura 4.2 mostra a disposição das fatias na bandeja e a posição na qual a mesma foi disposta dentro da cavidade. Tomou-se o cuidado de não permitir contato entre as amostras para evitar superaquecimento na região de contato, provocado por descarga elétrica. Os testes de secagem foram realizados com fluxo de ar a 70°C e velocidade média de 0,8 m/s. A escolha dessa temperatura foi realizada com base no estudo realizado no Capítulo 3, o qual indica que essa temperatura aumenta a cinética de secagem e proporciona produtos com maior porosidade, em relação a temperaturas mais baixas. As potências de microondas testadas foram 95, 188 e 279W, correspondentes a 0,25; 0,5 e 0,75W/g com referência à massa inicial, respectivamente. Essas densidades de potências englobam a densidade de potência disponível disponível utilizada no referido estudo anterior durante o período inicial de secagem, que foi de 0,38W/g. O procedimento foi realizado com aplicação da potência de microondas constante ao longo da secagem, para cada um dos níveis citados, desde que o limite máximo de temperatura do produto não atingisse 97°C. Os experimentos de secagem foram conduzidos até que a amostra atingisse 0,67 kg_a/kg_{ms}.

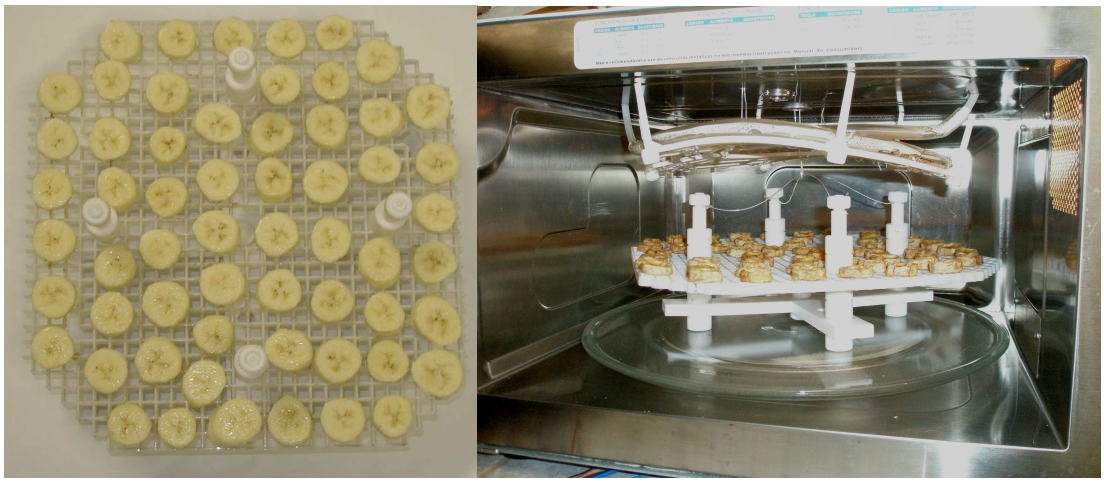


Figura 4.2 - Disposição das fatias de banana na bandeja e da mesma dentro da cavidade para a secagem com assistência de microondas.

As curvas de secagem foram determinadas pelo método gravimétrico, por meio da pesagem externa da bandeja contendo a amostra, em intervalos de 10 minutos, em balança semi-analítica (OHAUS - ARC120, 3100g máx.e 0.01g de precisão, EUA).

4.4 Resultados e Discussão

A análise e a discussão dos resultados deste capítulo serão organizadas da seguinte forma: será apresentada a cinética da desidratação osmótica para a definição dos tempos de processo necessários para obtenção das amostras que foram utilizadas na etapa subseqüente de secagem com aplicação de microondas. O principal enfoque, no entanto, é a apresentação das cinéticas de secagem com aplicação de microondas para as diferentes amostras (*in natura* e osmoticamente desidratadas durante dois tempos distintos) e a análise da secagem em relação ao tempo de secagem, encolhimento, capacidade de reidratação, porosidade e atividade de água do produto final (parcialmente seco). Serão apresentados

também os ajustes dos dados experimentais aos modelos exponencial e de Page encontrados na literatura.

4.4.1 Caracterização da matéria-prima

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos da composição química da banana *in natura* utilizada nos experimentos de acordo com os métodos descritos no item 4.3.2.

Tabela 4.1 - Composição química da banana nanica *in natura*

Composição química	Valores médios[1]
Umidade (g/100g)	73 ± 3
SST (°Brix)	10 ± 1
AR (g/100g)	3,37 ± 0,05
AT (g/100g)	9,9 ± 0,2
Proteína (g/100g)	1,3 ± 0,2
Cinzas (g/100g)	0,87 ± 0,02
aw	0,989 ± 0,007

[1] todos os valores estão expressos em base úmida

Os teores de umidade (bu), proteína e cinzas encontrados para a banana nanica utilizada neste trabalho, são próximos aos encontrados por MEDINA (1985), ARAÚJO (2000), ANTONIO (2002) e (TACO, 2006). No entanto, o teor de açúcares totais é 67% inferior comparado ao encontrado por MEDINA (1985). O valor de açúcares redutores totais de 3,37% apresenta-se similar aos encontrados por MAURO & MENEGALLI (1995), de 3% para a mesma variedade de banana e inferior aos encontrados por ANTONIO (2002) e ARAÚJO (2000), de 10%.

4.4.2 Escolha dos tempos da desidratação osmótica

A Figura 4.3 ilustra a curva da cinética de perda de água (PA), ganho de sólidos (GS) e perda de peso (PP) durante a desidratação osmótica de fatias de banana em solução de sacarose a 55°Brix e 40°C.

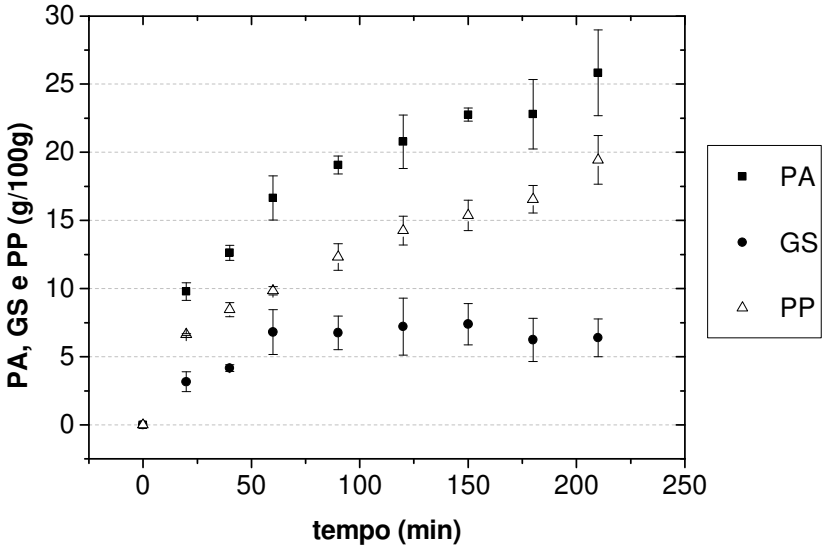


Figura 4.3 – Perda de água (PA), ganho de sólidos (GS) e perda de peso (PP) em função do tempo de desidratação osmótica de fatias de banana.

A perda de água é crescente com o tempo e ocorre mais rapidamente durante os primeiros 60 minutos, atingindo 16,6%. Após esse período, a sua variação continua sendo crescente, mas de forma mais lenta, chegando a 26% de perda de água no final dos 210 minutos de processo. A incorporação de sacarose nas fatias de banana, que é expressa pelo ganho de sólidos, apresenta um comportamento similar de evolução acentuada nos primeiros 60 minutos. No entanto, após esse intervalo, observa-se uma tendência de estabilidade no ganho de sólidos até o final do processo. Este fato pode estar relacionado com a perda de sólidos da fruta para a solução osmótica por meio de possíveis mudanças

estruturais causadas pela temperatura da solução osmótica de 40°C. Resultados semelhantes foram encontrados por HENG et al. (1990) após 6 horas de desidratação osmótica de mamão em solução de glicose a 65°Brix e 60°C. ANTONIO (2002) observou, por meio de microscopia eletrônica de varredura, que fatias de banana desidratadas osmoticamente em condições similares ao presente trabalho (solução de sacarose a 55°Brix; 0,05M de ácido lático e 45°C) apresentaram colapso das células e conseqüente exposição dos grânulos de amido.

Os resultados encontrados para os níveis de perda de água apresentaram-se superiores aos de ganho de sólidos. Ao final de 210 minutos de processamento, a fruta perdeu até 26% de água para solução (em massa), enquanto o ganho de sólidos da fruta atingiu o máximo de 7,4%. De acordo com alguns autores, que também observaram e discutiram esse fenômeno, essa tendência ocorre essencialmente pelas diferenças difusionais entre a água e os açucares, no que diz respeito às suas massas molares e suas viscosidades (EL-AOUAR, 2005; TORREGGIANNI, 1993; MAURO & MENEGALLI, 1995). Adicionalmente, é válido ressaltar a importância do pré-tratamento realizado com ácido cítrico e ascórbico, a 70°C, na incorporação de sólidos e na perda de água. Essa etapa aumenta a permeabilidade da membrana celular, diminuindo a seletividade da mesma, de forma a aumentar o ganho de sólidos nas fatias. Essa observação foi discutida por MAURO & MENEGALLI (1995) e também foi observada experimentalmente no presente trabalho.

A partir dessas observações dos resultados do acompanhamento da cinética de perda de água e ganho de sólidos, foram definidos dois tempos para a realização da desidratação osmótica, com o intuito de obter amostras com diferentes teores de umidade e sólidos, para serem utilizadas como matéria-prima para a subseqüente secagem com aplicação de microondas: 60 (60min) e 150 minutos (150min).

A Tabela 4.2 apresenta a caracterização química das fatias de banana desidratadas osmoticamente durante 60 minutos e 150 minutos.

Tabela 4.2 – Caracterização química das amostras de banana desidratadas osmoticamente

Composição química[1]	60 min	150min
Umidade (g/100g)	67,6 ± 0,2	63,9 ± 0,7
SST (°Brix)	17,1 ± 0,2	20 ± 2
AR (g/100g)	7,4 ±0,3	10,8 ± 0,6
AT (g/100g)	16,4 ± 0,4	17 ± 2
a_w	0,986 ± 0,002	0,971 ± 0,008

[1] todos os valores são expressos em base úmida

O conteúdo de umidade da fruta *in natura* de 73% (Tabela 4.1) foi reduzido para 67,6% após 60 minutos de imersão em solução de sacarose a 55°Brix e 40°C e para 64% após 150 minutos de imersão. A incorporação de sólidos causada pela troca osmótica entre as fatias de banana e a solução resultou num incremento no teor de sólidos totais (SST) de 7°Brix após 60 minutos e 10°Brix após 150 minutos. O teor de açúcares totais (AT) aumentou 2,4 vezes após 60 minutos em relação à fruta *in natura*, de 6,77% para 16,4%, mas entre 60 e 150 minutos o aumento foi insignificante. A atividade de água, por sua vez, decresceu com o aumento do tempo de imersão, atingindo o valor mínimo de 0,971 após 150 minutos.

4.4.3 Secagem com aplicação de microondas

4.4.3.1 Cinética de secagem

As Figura 4.4, 3.5 e 3.6 ilustram as curvas típicas de secagem das fatias de banana secas com ar quente a 70°C e 0,8m/s (1,8m^3/min), combinado com aplicação de potência de

microondas de 95W, 188W e 279W, correspondentes a 0,25 W/g; 0,5 W/g e 0,75 W/g em relação à massa inicial de amostra, respectivamente. Os dados completos das cinética de secagem estão apresentados no Apêndice II.

As curvas da cinética de secagem da fruta *in natura*, assim como daquelas que sofreram pré-tratamento osmótico, apresentaram taxa de secagem decrescente para as três potências de microondas aplicadas ao processo até a umidade final de 0,67 kg_a/kg_{ms}. Esse resultado mostra-se coerente aos encontrados na literatura para secagem convencional de banana (NGUYEN & PRICE, 2006; JANNOT et al., 2004; DEMIREL & TURHAN, 2003; DANDAMRONGRAK et al., 2002; SANKAT et al., 1996) e com aplicação de microondas (MASKAN, 2000; SOUSA, 2002).

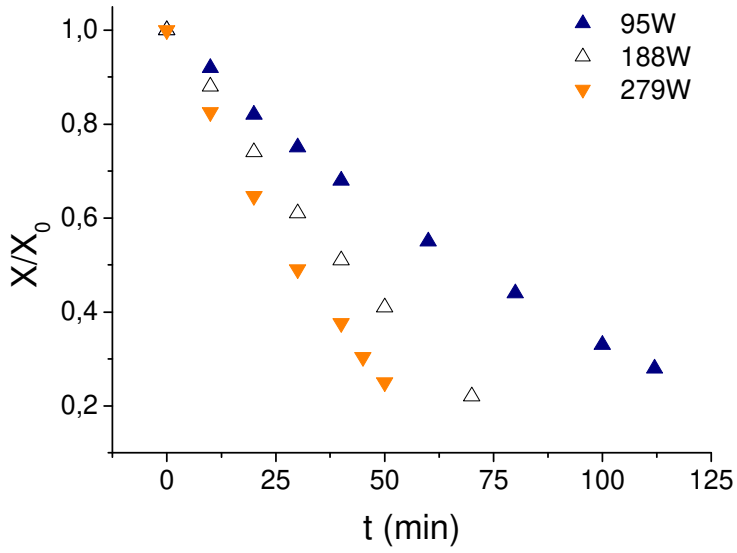


Figura 4.4 - Adimensional de umidade em função do tempo, das fatias de banana sem pré-tratamento osmótico submetidas à secagem com aplicação de microondas.

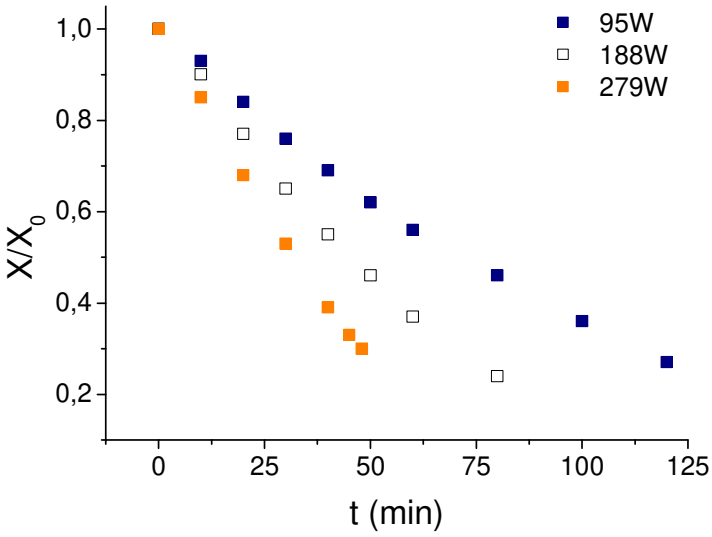


Figura 4.5 - Adimensional de umidade em função do tempo, das fatias de banana desidratadas osmoticamente durante 60 minutos submetidas à secagem com aplicação de microondas.

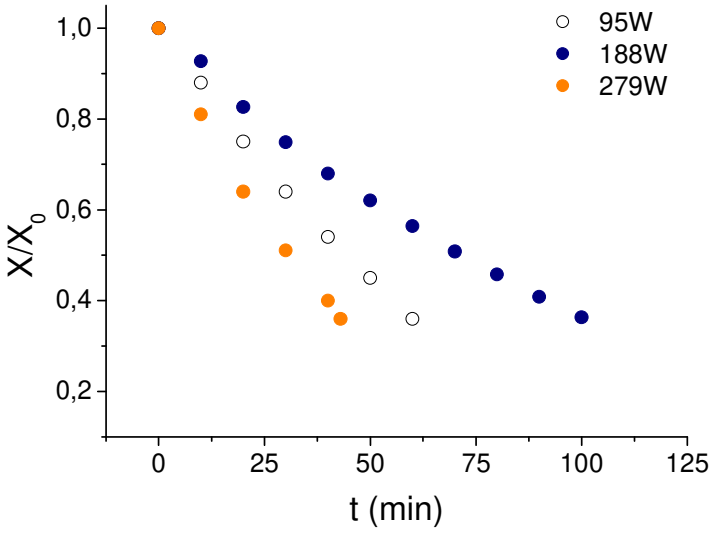


Figura 4.6 - Adimensional de umidade em função do tempo, das fatias de banana desidratadas osmoticamente durante 150 minutos submetidas à secagem com aplicação de microondas.

Observa-se pelas curvas de secagem que um aumento na potência de microondas aplicada ao processo provocou um aumento na cinética de secagem das três amostras analisadas. Esse comportamento já era esperado, e está de acordo com a literatura, pois um aumento da potência de microondas gera maior mento no interior do material e, por

conseguinte, um aumento na pressão de vapor de água, forçando o movimento de água para a superfície do material (RUÍZ DIAZ et al., 2003; WANG & XI, 2005). O escoamento de ar a 70°C e 0,8 m/s auxilia no arraste dessa umidade superficial, favorecendo a manutenção da diferença de concentração de umidade entre o interior da fruta e a sua superfície. Adicionalmente, o escoamento de ar ao redor das fatias favorece o gradiente de concentração entre a superfície e o ar adjacente, mantendo a força impulsora para a difusão de umidade.

A Figura 4.7 ilustra as curvas de umidade adimensional em função do tempo das fatias de banana secas com aplicação de 188W de potência para as três amostras testadas: *in natura*, desidratadas osmoticamente por 60 (DO 60) e 150 minutos (DO 150).

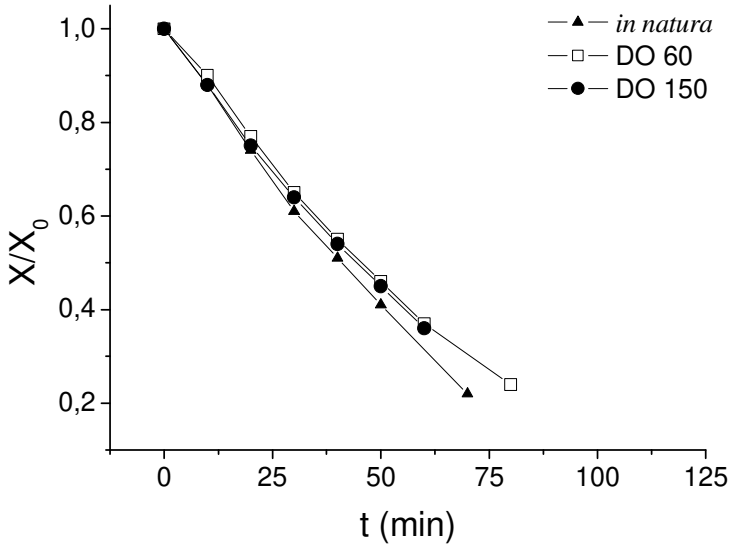


Figura 4.7 - Adimensional de umidade em função do tempo, das fatias de banana submetidas a secagem com potência de microondas aplicada de 188 W (0,5W/g) para as três amostras.

A utilização do pré-tratamento osmótico não apresentou diferença significativa na cinética de secagem das fatias de banana para uma mesma potência de microondas

aplicada. No entanto, pode-se observar uma indicação de divergência das curvas de secagem ao final desse período.

Pela análise comparativa das curvas de secagem das diferentes amostras (com diferentes teores de sólidos, incorporados pela desidratação osmótica) secas com aplicação de microondas, é possível observar que o efeito da potência é mais pronunciado em relação ao tratamento osmótico na cinética de secagem.

A Figura 4.8 ilustra o comportamento da média da temperatura superficial do material (medido por um sensor de infra-vermelho) e a evolução da densidade de potência disponível ao longo do tempo de secagem. As rápidas quedas da temperatura superficial do material ocorrem devido à retirada do material de dentro da cavidade para o acompanhamento da perda de massa do mesmo, o que provoca um resfriamento na superfície do mesmo.

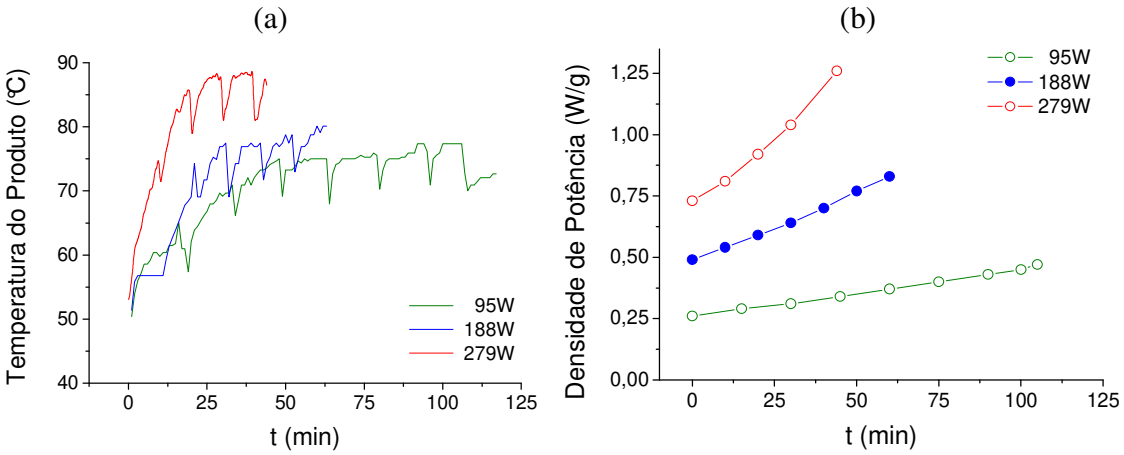


Figura 4.8 – Comportamento típico da temperatura superficial da banana (a) e da densidade de potência disponível disponível (b) ao longo da secagem com microondas para amostras pré-desidratadas por 150 minutos.

Um comportamento interessante que se pode observar na Figura 4.8 (a) é que a aplicação de 95W de potência de microondas na secagem, foi suficiente para manter a amostra a aproximadamente 5°C acima da temperatura do ar (70°C), atingindo um valor máximo de 77°C. Um aumento de 93W (potência aplicada de 188W), forneceu energia suficiente para aumentar a temperatura do produto até aproximadamente 80°C, quando da interrupção do processo. A taxa da evolução da média da temperatura superficial das fatias foi mais acentuada para a secagem realizada com 188 e 279W de potência em relação à aplicação de 95W de potência de microondas. A secagem foi interrompida quando a amostra ainda continha 0,67 kg_a/kg_{ms} (atividade de água em torno de 0,900), o que significa que a fruta ainda apresentava uma quantidade considerável de água a ser retirada e, conseqüentemente, capacidade de absorção de energia de microondas. É possível observar, mais claramente para as potências de microondas de 188 e 279 W, que a temperatura do produto apresentou uma tendência a continuar aumentando, caso o processo continuasse. Após os experimentos foi observado que as amostras não apresentaram aparência queimada, ou seja, a elevação de temperatura não foi suficiente para queimar (mesmo que parcialmente) as amostras.

O fator de perda dielétrica relativo (ε") para banana *in natura* e madura (teor de umidade de 76% bu) aumenta de 18 para 20, a 70°C e 80°C, respectivamente (SIPAHIOGLU & BARRINGER, 2003), no entanto materiais com menores teores de umidade apresentam uma redução em ε". Essas observações podem sugerir que a conversão de energia eletromagnética em calor no interior das amostras de fruta excede a energia necessária para evaporar a água durante a secagem e por isso a temperatura da amostra apresenta um crescimento ao longo do tempo. Essa observação também está de acordo com

a teoria de que a transferência de energia eletromagnética para as moléculas de um material dielétrico aumenta a energia livre total (ADU & OTTEN, 1996).

Adicionalmente, pela análise da Figura 4.8 (b), a cinética de secagem é acelerada pela aplicação de energia de microondas e, portanto, a massa de material diminui dentro da cavidade. Como conseqüência, a densidade de potência disponível disponível de microondas (medida em W/g), que é a relação entre a potência aplicada e a massa de material, aumenta proporcionalmente à perda de umidade ao longo do tempo. A densidade de potência disponível máxima ao final da secagem, (umidade final do produto de 0,67kg_a/kg_{ms}) chegou a valores próximos de 1,5 W/g para a amostra sem pré-tratamento osmótico. Essa informação é relevante para análise da eficiência da secagem, no que diz respeito à quantidade de fatias queimadas, ao tempo de secagem e à qualidade do produto final para a escolha das melhores condições de processo.

A Figura 4.9 ilustra as curvas da temperatura superficial das fatias de banana *in natura* e desidratadas osmoticamente, ao longo do tempo de secagem, com aplicação de 188W de potência de microondas.

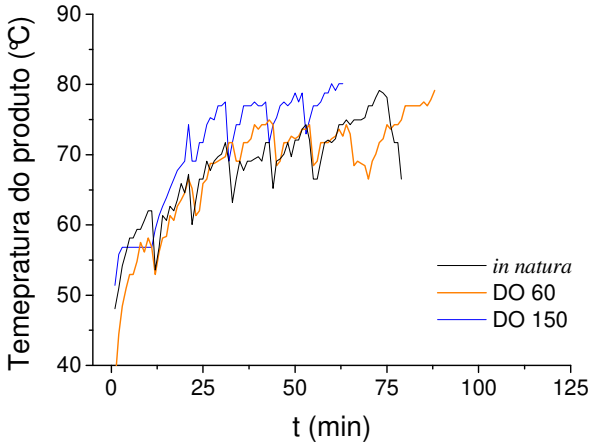


Figura 4.9 - Comportamento típico da temperatura superficial do produto em função do tempo para secagem com aplicação de 188W de potência de microondas, para as três amostras.

A desidratação osmótica prévia apresentou pouca influência na evolução da temperatura do material em relação à fruta *in natura* durante a secagem, para uma mesma potência de microondas aplicada. As amostras *in natura* e pré-desidratada por 60 minutos apresentaram os perfis de temperaturas semelhantes, com rápida evolução no início da secagem, atingindo 70°C (temperatura do ar) em aproximadamente 37 minutos, seguida de um aumento mais brando, atingindo um máximo de 78°C. A amostra pré-desidratada durante 150 minutos apresentou perfil semelhante aos das demais, com temperaturas sempre mais altas ao longo da secagem, após os primeiros 15 minutos. As diferenças entre as temperaturas chegaram a atingir 12°C. As amostras desidratadas osmoticamente durante 150 minutos apresentaram um certo encolhimento e uma maior incorporação de sólidos, em relação às duas outras amostras, ao final da desidratação osmótica. O acoplamento de microondas é maior em objetos cilíndricos com 3,5 cm de diâmetro, em comparação a cilindros de 4,0 cm de diâmetro (YANG & GUNASEKARAM, 2004; RYYNÄNEN et al., 2004). Esse comportamento sugere uma maior absorção de microondas das amostras pré-desidratadas por 150 minutos e conseqüente aumento da temperatura do material.

A Tabela 4.3 apresenta os tempos de secagem (t_f) das fatias de banana para todas as condições experimentais e o tempo total (t_{total}) gasto para atingir a umidade de 0,67kg_a/kg_{ms}, considerando a soma do tempo de desidratação osmótica e o tempo de secagem com aplicação de microondas.

Tabela 4.3– Tempo de secagem e tempo total para o processo combinado de secagem com aplicacão de microondas e desidratação osmótica de fatias de banana.

P (W)	Amostra	X_0 (kg_a/kg_{ms})	t_f (min)	t_{total} (min)
95	*in natura*	2,64	126	126
	DO 60	2,18	114	174
	D150	1,73	97	247
188	*in natura*	2,73	65	65
	DO 60	2,33	71	131
	D150	1,77	59	209
279	*in natura*	2,52	49	49
	DO 60	1,94	44	104
	D150	1,62	38	188

As amostras *in natura*, que não sofreram desidratação osmótica, apresentaram tempo de secagem 1,1 e 1,3 vezes maior do que daquelas pré-desidratadas osmoticamente por 60 minutos e 150 minutos, respectivamente, sob aplicação de 95W de potência de microondas. As fatias desidratadas osmoticamente apresentaram valores de umidade inicial menores em relação às fatias *in natura*. Essa redução da umidade inicial justifica a redução dos tempos de secagem das amostras desidratadas, uma vez que a cinética de secagem não mostrou ser significativamente influenciada pelo tratamento osmótico. Com o aumento da potência de microondas, as diferenças entre os tempos de secagem das amostras *in natura* e pré-desidratadas osmoticamente diminuíram.

O tempo de secagem diminuiu para as três amostras analisadas, com o aumento da potência de microondas aplicada. A amostra *in natura* tem o tempo de secagem reduzido em 48%, a amostra desidratada por 60 minutos em 38% e a desidratada por 150 minutos em 39%, para um aumento na potência de microondas de 95W para 188W. Com o aumento de

188W para 279W, a redução do tempo de secagem passa para 24%, 38% e 36% para as amostras *in natura* e desidratadas por 60 e 150 minutos, respectivamente.

4.4.3.2 Ajuste por modelos matemáticos

O dados das curvas de secagem foram ajustados ao modelo exponencial (Eq. 2-16) e ao modelo de Page (Eq. 2-18). As Tabelas 4.4 e 4,5 apresentam os valores encontrados dos parâmetros dos modelos exponencial (k_L) e Page (k_P e n), com seus respectivos desvios padrões (DP), do coeficiente de determinação (R^2) e do χ^2 para a secagem com aplicação de microondas de fatias de banana *in natura* e pré-desidratadas osmoticamente.

Os dados experimentais apresentaram um bom ajuste aos dois modelos propostos, tendo em vista os valores de R^2 próximos de 1 e reduzidos valores de χ^2.

Tabela 4.4 - Parâmetros obtidos do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Lewis para a secagem com aplicação de microondas de fatias de banana com e sem pré-tratamento osmótico.

P (W)	Amostra	k_L (min^{-1})	DP	R^2	χ^2
95 (0,2 W/g))	*in natura*	0,0104	0,0002	0,9944	0,0004
	DO 60	0,0098	0,0002	0,9941	0,0003
	DO 150	0,00974	0,00009	0,9983	0,00008
188 (0,5 W/g)	*in natura*	0,0176	0,0009	0,9799	0,002
	DO 60	0,0156	0,0006	0,9858	0,0010
	DO 150	0,0157	0,0004	0,9931	0,0004
279 (0,7 W/g)	*in natura*	0,025	0,001	0,9877	0,0010
	DO 60	0,023	0,001	0,9822	0,001
	DO 150	0,0228	0,0003	0,9984	0,0001

Um dado interessante de se observar é que para uma mesma potência de microondas aplicada, as amostras pré-desidratadas por 150 minutos apresentam os melhores ajustes, maiores valores de R^2 e menores de χ^2.

A Figura 4.10 ilustra a comparação entre os dados experimentais de X/X_0 em função do tempo e os valores preditos pelo modelo exponencial para as amostras *in natura* secas com aplicação de 95W, 188W e 279W de potência de microondas.

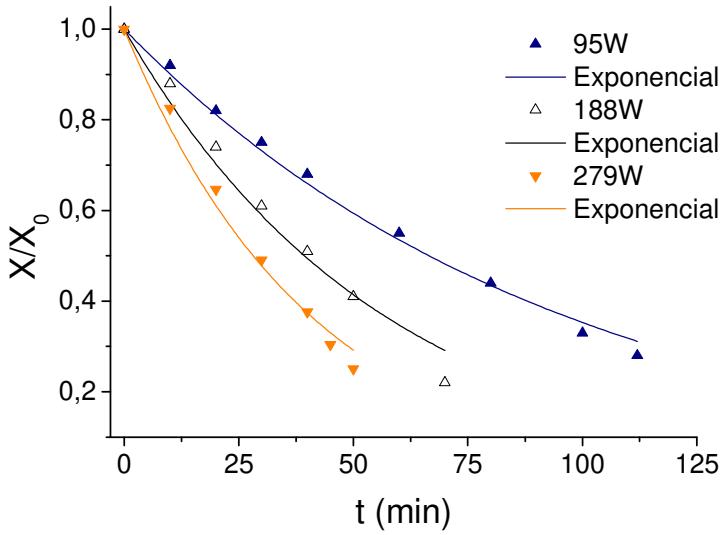


Figura 4.10 – Ajuste do modelo exponencial para os dados do processo de secagem de fatias de banana *in natura* (sem pré-tratamento) para as três potências de microondas aplicadas.

De acordo com a Tabela 4.4, os valores de k_L aumentaram para potências de microondas mais elevadas, como era esperado para todas as amostras. A relação entre o aumento desse parâmetro e a potência é linear e está de acordo com os resultados encontrados na literatura para secagem com aplicação de microondas, de diversos produtos alimentícios (HEREDIA et al., 2007; WANG et al., 2007).

As relações encontradas através de regressão linear para o parâmetro k_L do modelo e a potência de microondas aplicada para a fruta *in natura* e para a fruta desidratada osmoticamente por 60 e 150 minutos são as seguintes,

$$\text{Fresca}: \quad k_L = 0{,}00335 + 0{,}000071\,P \quad (R^2 = 0{,}9999)$$

$$\text{DO } 60: \quad k_L = 0{,}00293 + 0{,}000066\,P \quad (R^2 = 0{,}9951)$$

$$\text{DO } 150: \quad k_L = 0{,}00297 + 0{,}000066\,P \quad (R^2 = 0{,}9977)$$

O menor valor de k_L encontrado foi de 0,00974 min^{-1} para amostra desidratada por 150 minutos e seca com 95W de potência de microondas e o maior foi de 0,0246 min^{-1} para a amostra *in natura* seca com 279W de potência de microondas. Esses valores estão no mesmo intervalo daqueles encontrados no trabalho de SOUSA (2002) para a secagem com aplicação de densidade de potência disponível de microondas de 0,3 W/g de bananas inteiras (correspondente a 140W). Ele determinou um valor de k_L de 0,011 min^{-1} na condição mais extrema de secagem realizada (0,3W/g de densidade de potência disponível e vazão de ar a 1,30 m^3/min e 55°C). Os trabalhos realizados com secagem convectiva de banana *in natura* encontraram valores de k_L em torno de $1{,}5x10^{-3}$ min^{-1} (DANDAMRONGAK et al., 2002) para secagem em bomba de calor a 50°C, entre 0,76 $x10^{-3}$ min^{-1} e $4{,}61x10^{-3}$ min^{-1} para secagem a ar quente sob as temperaturas entre 30 e 70°C (NGUYEN & PRICE, 2006). Ou seja, a aplicação de microondas no processo de secagem de banana aumenta em 10 vezes a constante de secagem, com conseqüente redução do tempo para secar o produto até um determinado conteúdo de umidade.

A incorporação de sólidos pela desidratação osmótica apresentou pouca influência no valor da constante de secagem do modelo exponencial. Para a aplicação de 95W de potência de microondas, os valores de k_L não apresentaram diferença significativa para a

amostra *in natura* e para as amostras desidratadas osmoticamente. À medida que a potência aplicada ao processo é elevada, o valor de k_L da amostra *in natura* diferencia-se das demais, atingindo valores 1,12 vezes maior para 188W e até 1,08 vezes para 279W de potência.

De acordo com HEREDIA et al. (2007), os valores de k_L não apresentaram grandes diferenças entre amostras de tomate fresco e desidratado com diferentes agentes osmóticos (sal; açúcar e sal; sal e cálcio; sal, açúcar e cálcio) quando submetidas à secagem com aplicação de densidades de potências entre 0 e 3 W/g, cujo intervalo engloba as densidades do presente trabalho (entre 0,2 a 0,7 W/g). No trabalho supra citado, para densidades de potência acima de 3 W/g, a constante de secagem k_L apresentou dependência com a potência aplicada e com a propriedade dielétrica do material, a qual foi alterada por meio dos diferentes tratamentos osmóticos.

De acordo com a Tabela 4.5, verifica-se que o modelo de Page ajustou-se melhor aos dados experimentais em comparação ao modelo exponencial. Os valores do coeficiente de determinação (R^2) encontraram-se mais próximos da unidade, com o menor valor encontrado de 0,9978 para a amostra *in natura* seca com 188W de potência de microondas, e valores mais reduzidos de χ^2, com valores inferiores a 0,0002.

Tabela 4.5 - Parâmetros obtidos do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Page para a secagem de fatias de banana com aplicação de microondas

P (W)	amostra	k_P (min^{-1})	DP	*n*	DP	R^2	χ^2
95	*in natura*	0,0064	0,0007	1,11	0,02	0,9988	0,00009
(0,2 W/g)	DO 60	0,0059	0,0004	1,12	0,02	0,9993	0,00005
	DO 150	0,0078	0,0005	1,05	0,02	0,9993	0,00004
188	*in natura*	0,007	0,001	1,27	0,05	0,9978	0,0002
(0,5 W/g)	DO 60	0,0065	0,0004	1,23	0,01	0,9997	0,00002
	DO 150	0,0089	0,0006	1,15	0,02	0,9995	0,00003
279	*in natura*	0,011	0,001	1,23	0,03	0,9991	0,00008
(0,7 W/g)	DO 60	0,0079	0,0005	1,30	0,02	0,9998	0,00002
	DO 150	0,018	0,001	1,07	0,02	0,9997	0,00002

A Figura 4.11 ilustra a comparação entre os dados experimentais de X/X_0 em função do tempo e os valores de k_P e *n* preditos pelo modelo de Page para as amostras *in natura* secas com aplicação de 95W, 188W e 279W de potência de microondas.

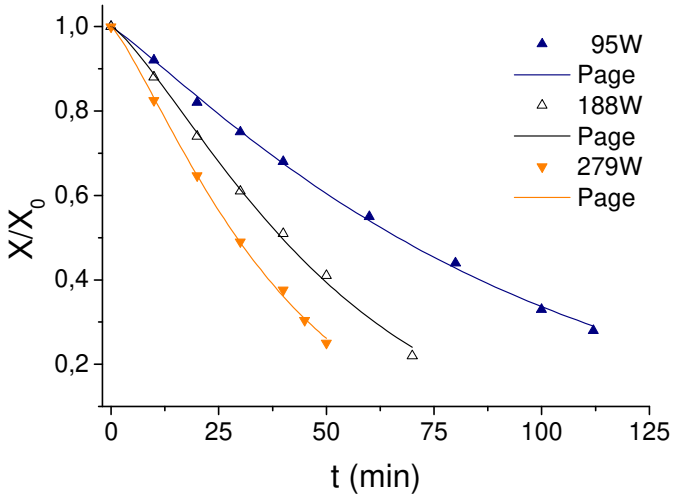


Figura 4.11 - Ajuste do modelo de Page para os dados do processo de secagem de fatias de banana *in natura* (sem pré-tratamento) para as três potências microondas aplicadas.

A constante de secagem k_P apresentou uma relação crescente com a potência aplicada, enquanto a constante *n* não apresentou um comportamento bem definido com

relação à potência de microondas aplicada, como pode ser observado nas Figura 4.12 (a e b). No trabalho de WANG et al. (2007), os autores encontraram uma dependência crescente e linear tanto para o parâmetro k_P como para o parâmetro n, com a potência de microondas aplicada na secagem de polpa de maça, para um intervalo de potência entre 150 e 600W.

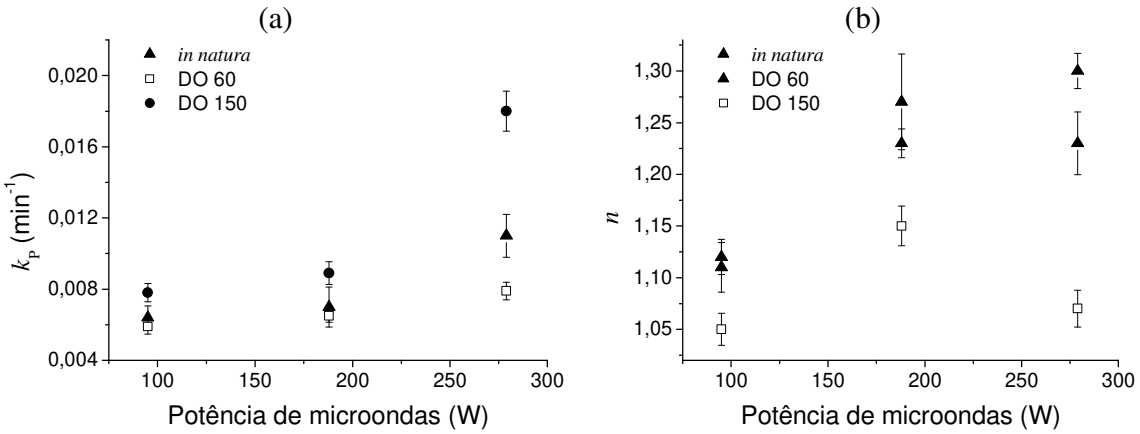


Figura 4.12 – Parâmetros k_P (a) e n (b) em função da potência de microondas aplicada na fase inicial da secagem, para as três amostras de fatias de banana.

4.4.3.3 Características do produto parcialmente seco

Nesse item será realizada a análise da influência das condições da secagem e do tratamento osmótico, na qualidade do produto parcialmente seco com 0,67kg_a/kg_{ms}, por meio das medidas de atividade de água, encolhimento, porosidade e capacidade de reidratação.

A Tabela 4.6 apresenta os valores de atividade de água das fatias de banana *in natura* e desidratadas osmoticamente, secas com aplicação de 95, 188 e 279W de potência de microondas.

Tabela 4.6 – Valores de atividade de água atingidos pelas fatias de banana parcialmente secas com ar a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de microondas.

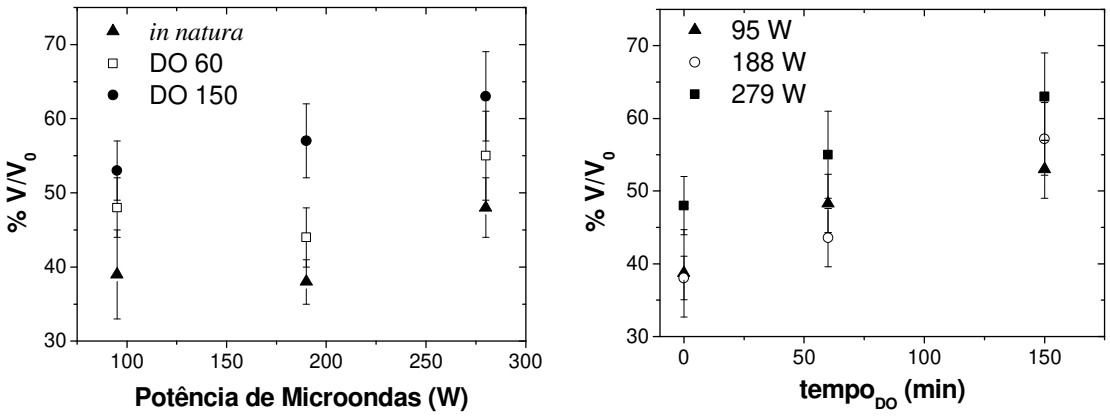
P (W)	Amostra	a_w
95 (0,2 W/g)	*in natura*	0,934 ± 0,009
	DO 60	0,88 ± 0,03
	DO 150	0,90 ± 0,02
188 (0,5 W/g)	*in natura*	0,92 ± 0,01
	DO 60	0,88 ± 0,03
	DO 150	0,92 ± 0,02
279 (0,7 W/g)	*in natura*	0,95 ± 0,02
	DO 60	0,88 ± 0,03
	DO 150	0,876 ± 0,006

De acordo com os dados da Tabela 4.6, observa-se que as amostras parcialmente secas apresentaram atividade de água entre 0,876 e 0,95. A amostra *in natura* seca com 95 e 188W apresentou os maiores valores de atividade de água, 0,934 e 0,95, respectivamente. As amostras desidratadas osmoticamente por 60 e 150 minutos não apresentaram diferenças significativas para a atividade de água após a secagem, para uma mesma potências de microondas aplicadas. Essa sentença é válida para as três potências aplicadas. A potência de 279W aplicada à secagem das fatias de banana desidratadas apresentou maior redução nas suas atividades de água, em relação às potências de 95 e 188W.

As Figuras 4.13, 4.15 e 4.16, apresentam a dependência do encolhimento, da porosidade e da capacidade de reidratação das amostras secas até 0,67kg_a/kg_{ms} com a potência de microondas aplicada e com o tempo de pré-tratamento osmótico.

A Figura 4.13 (a e b) ilustra o encolhimento médio das fatias por meio da razão do volume (V/V_0) das amostras, ou seja a relação entre o volume da amostra seca e o seu volume inicial. Quanto menor o valor de V/V_0, mais o material diminui de volume em

relação ao seu volume original, conseqüentemente maior é o seu encolhimento. A Figura 4.13 (a) apresenta a razão de volume das amostras em função da potência de microondas aplicada e a Figura 4.13 (b) apresenta esse parâmetro em função do tempo de desidratação osmótica.



(a) (b)

Figura 4.13 –Razão de volume das amostras de banana parcialmente secas em função da potência de microondas aplicada (a) e em função do tempo de desidratação osmótica (b).

A Figura 4.13 (a) indica que há uma tendência de diminuição do encolhimento com o aumento da potência de microondas aplicada e está de acordo com a relação encontrada por RAGHAVAN & SILVEIRA (2001) para morangos pré-desidratados e secos, com aplicação de microondas e por KHRAISHEH et al. (2004) para batata também seca com microondas. Esse relação pode ser analisada juntamente com os perfis de temperatura das amostras ao longo do tempo de secagem (Figura 4.8 a). Potências mais elevadas, provocam um aumento da temperatura superficial da fruta atingindo valores superiores a 80°C, que está acima da temperatura de gelatinização do amido que se encontra entre 65 e 85 °C (MOTA et al., 2000; MUI et al., 2002). Dessa forma, o rápido aquecimento pela ação das microondas pode ter provocado a mudança do amido para o estado gelatinoso, com

conseqüente endurecimento superficial das fatias. Paralelamente, a aplicação de potências mais elevadas acelera a taxa de secagem por meio da alta taxa de transição da água líquida em vapor, aumentando a pressão interna nos poros rapidamente que provoca uma "explosão" na estrutura interna do material pela transferência da umidade para a superfície (KHRAISHEH et al., 2004; KOWALSKI & RYBICKI, 2006).

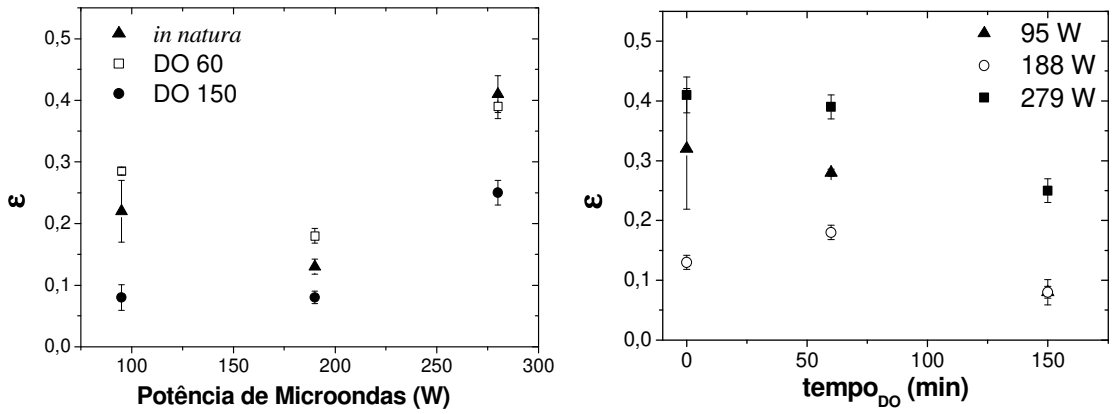
Observa-se pela Figura 4.13 (b) que as amostras pré-tratadas osmoticamente apresentaram menor encolhimento em relação àquelas que não sofreram o pré-tratamento e que o tempo de imersão é inversamente proporcional ao encolhimento. Para amostras secas com 279W de potência de microondas, as amostras desidratadas osmoticamente por 60 e 150 min apresentaram uma redução no encolhimento após a secagem de 9% e 21% em relação à fruta *in natura*, respectivamente. Esse resultado é coerente ao fato de que a incorporação de sacarose na fruta devido ao tratamento osmótico provocou uma modificação na estrutura do material, diminuindo a sua mobilidade (EL-AOUAR, 2005; MAYOR & SERENO, 2004). Estes resultados estão coerentes àqueles encontrados por RAGHAVAN & SILVEIRA (2001), os quais concluíram que morangos pré-desidratados com sacarose e secos com aplicação de microondas apresentaram menor encolhimento do que os que não foram submetidos à desidratação osmótica.

Vale ressaltar que, por meio de observações visuais realizadas ao final de todos os experimentos, o encolhimento na espessura das fatias foi mais evidente que aquele no diâmetro das mesmas. A Figura 4.14 ilustra a forma característica do encolhimento sofrido pelas fatias de banana ao final da secagem. O diâmetro das fatias no início e no final da secagem não apresentou grandes diferenças. Por outro lado, a espessura do material apresentou encolhimento de forma não uniforme, sendo maior na região anular entre o centro e a periferia do mesmo. Na região anular mais periférica e no centro, o encolhimento

foi menos expressivo. A região central da fruta apresenta uma composição um pouco diferenciada do resto da polpa e apresenta uma estrutura mais rígida, assim como a região mais externa que se encontra próxima à casca da fruta.

Figura 4.14 – Ilustração da mudança de forma do volume da fatia seca em relação à sua forma no início da secagem devido ao encolhimento do volume da mesma.

A Figura 4.15 ilustra a dependência da porosidade média das fatias de banana com o tempo de desidratação osmótica na secagem e com a potência de microondas aplicada.



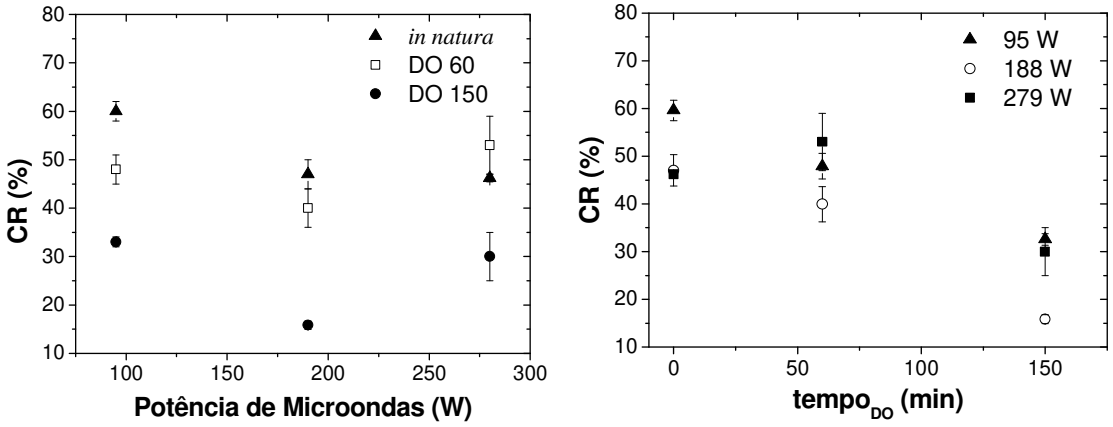
(a) (b)

Figura 4.15 - Porosidade das amostras de banana parcialmente secas, em função da potência de microondas aplicada (a) e do tempo de desidratação osmótica (b).

Observa-se pela análise da Figura 4.15 (a) que a porosidade das amostras secas até 0,67kg_a/kg_{ms} é maior para a potências de 279W, chegando a aproximadamente 40% para as amostras *in natura* e pré-desidratada por 60 minutos. O comportamento das porosidades devido ao aumento da potência de microondas das amostras *in natura* e desidratadas por 60 minutos é similar àquele do encolhimento das mesmas: há uma diminuição da porosidade das fatias para a potência de microondas intermediária (188W), em relação à potência de 95W, em 42% e 36% para as amostras *in natura* e pré-desidratadas por 60 minutos, respectivamente. Com o aumento da potência, a porosidade aumenta novamente.

Por outro lado, a porosidade das fatias diminui com o tratamento osmótico e com o aumento do tempo do tratamento. A amostra desidratada por 150 min apresenta porosidade menor para as 3 potências aplicadas, provavelmente devido à maior incorporação de sólidos na matriz e formação de uma estrutura mais densa. A provável formação dessa estrutura mais densa justifica o menor encolhimento dessas mesmas amostras como discutido anteriormente (MAYOR & SERENO, 2004).

A capacidade de reidratação das fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente é de certa forma uma conseqüência da porosidade e do encolhimento causado pelo processo de secagem. A Figura 4.16 (a e b) mostra a dependência da capacidade de reidratação das fatias de banana com o pré-tratamento aplicado e com a potência de microondas aplicada ao processo de secagem.



(a) (b)

Figura 4.16 - Capacidade de reidratação das amostras de banana parcialmente secas, em função da potência de microondas aplicada (a) e do tempo de desidratação osmótica (b).

A capacidade de reidratação foi verificada por meio da variação de massa da fatia seca após permanecer em água durante 15 horas, devido à absorção de água pela mesma. Pela Figura 4.16, observa-se que a fruta *in natura* seca com aplicação de 95W de potência de microondas apresentou maior capacidade de reidratação (60%) dentre todas as outras condições. Com a aplicação de potências maiores a capacidade de reidratação diminuiu em relação à 95W, mantendo-se constante para 188W e 279W. A relação entre a capacidade de reidratação com a potência se apresentou semelhante à da porosidade e do encolhimento para as amostras desidratadas osmoticamente. Com o aumento da potência de 95W para 188W há um decréscimo na capacidade do material de absorver água e de 188W para 279W há um acréscimo nessa capacidade. Esse comportamento é semelhante ao encontrado por WANG & XI (2005) para cenoura seca com diferentes potências no início da secagem. Analogamente à análise realizada para a influência da potência de microondas no encolhimento, o aumento das temperaturas atingidas pelas amostras tende a manter a estrutura das mesmas pelo endurecimento da superfície do material. A aceleração da

transferência de umidade por meio da rápida absorção da energia de microondas possibilita a formação de espaços vazios internamente. Dessa forma, a estrutura porosa formada possibilita a entrada de água no interior da fruta para a sua reidratação.

A incorporação de sólidos devido ao tratamento osmótico apresentou um efeito mais pronunciado na capacidade de reidratação das fatias de banana. Esse efeito é mais evidente quando feita uma comparação entre as amostras desidratadas por 150 minutos e as demais. Essa amostra apresentou uma capacidade de reidratação de 16% para a potência de 188W, o menor valor encontrado, seguida de 30% para a potência de 279W e 33% para 95W de potência de microondas aplicada. A diminuição da mobilidade da matriz sólida e a formação de uma estrutura mais densa diminuem os espaços vazios, dificultando a entrada de água no seu interior. Uma provável mudança físico-química também pode ocorrer durante a secagem, gerando mudanças na estrutura do material. Os solutos incorporados ao sólido, juntamente com aqueles liberados pelo rompimento das células, migram para a sua superfície, auxiliando na formação de uma casca que fecha a estrutura do sólido, dificultando a entrada de água. De acordo com FENG & TANG (1998), um balanço entre a migração da solução contendo os solutos e do vapor gerado pela absorção de energia de microondas dita a formação de uma estrutura mais ou menos porosa. Maiores velocidades na transferência de vapor em relação à transferência dos solutos podem resultar em um material com maior porosidade e provavelmente maior capacidade de reidratação. Dessa forma, as diferenças entre os valores da capacidade de reidratação para as amostras secas com aplicação de 95, 188 e 279W podem ser atribuídas pela relação entre os fluxos internos de umidade e sólidos.

Uma análise visual foi realizada ao final de cada experimento para verificar a aparência da fruta parcialmente seca, com relação à cor das fatias e verificação de

rachaduras na superfície. A desidratação osmótica prévia produziu amostras de uma coloração amarela mais escura, mais viva e intensa em relação à amostra seca sem esse tratamento. Essas amostras também apresentaram um brilho mais intenso na superfície. As amostras *in natura* apresentaram um aspecto de cor mais pálida e uma superfície mais ressecada.

Após os experimentos, algumas fatias, escolhidas aleatoriamente, foram cortadas ao meio para observação da estrutura interna das mesmas. No geral, as amostras apresentaram a estrutura interna com alguns poros visíveis, como se bolhas de vapor tivessem sido formadas ao longo da secagem por meio da formação de vapor de água e expulsão do mesmo.

4.5 Conclusões

A cinética de secagem apresenta um efeito crescente e positivo em relação à potência de microondas aplicada durante o período inicial da secagem. A aplicação do pré-tratamento osmótico não apresenta influência significativa na cinética de secagem das fatias de banana para uma mesma potência de microondas aplicada.

Adicionalmente, o tempo de secagem do período inicial (até 0,67 kg_a/kg_{ms}) apresentou variações significativas entre as três amostras para uma mesma potência aplicada. Amostras desidratadas osmoticamente por 150 minutos apresentaram menores tempos de secagem, seguidas das desidratadas por 60 minutos e das amostras *in natura*.

As curvas de secagem apresentaram um bom ajuste tanto ao modelo exponencial, como ao modelo de Page. Os valores encontrados para as constantes de secagem k_L apresentaram uma relação linear crescente com a potência de microondas aplicada e

encontraram-se no intervalo entre 0,0097 min^{-1} e 0,0246 min^{-1} para a amostra desidratada por 150 minutos e seca com 95W e a *in natura* seca com 279W de potência de microondas, respectivamente. O modelo de Page apresentou um comportamento linear do parâmetro k_P com a potência de microondas, mas não apresentou um comportamento definido do parâmetro *n* com a potência.

As amostras desidratadas durante 150 minutos apresentaram menor encolhimento, no entanto, sua capacidade de reidratação e sua porosidade foram inferiores em comparação às das demais (*in natura* e pré-desidratada por 60 minutos). A amostra desidratada por 60 minutos, por sua vez, apresentou capacidade de reidratação e porosidade semelhantes às da fruta *in natura*, mas um menor encolhimento. Por isso, essa amostra foi escolhida para a realização do estudo subseqüente, com aplicação de microondas em dois estágios, para a obtenção de amostras secas com 0,18kg_a/kg_{ms}. Seguindo o mesmo princípio para a escolha da potência de microondas aplicada no período inicial, foi escolhida a potência de microondas de 279W. A secagem com aplicação de 279W apresentou cinética de secagem acelerada e, conseqüentemente, tempos de secagem menores. Os parâmetros de qualidade analisados foram satisfatórios, pois a amostra apresentou capacidade de reidratação acima de 50%, porosidade próxima de 40% e aproximadamente 45% de encolhimento do volume original.

Capítulo 5 Secagem completa de fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente

5.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se a análise da secagem de fatias de banana até um conteúdo de umidade final de 0,18 kg_a/kg_{ms} em dois estágios com potências variáveis, sob condições fixas do ar quente em cavidade de microondas multimodo com movimentação da carga. Essa análise foi complementar aos estudos descritos nos Capítulo 3 e Capítulo 4.

O primeiro estágio corresponde ao primeiro período de secagem decrescente, tal como foi exposto no Capítulo 4, no qual foram escolhidas as melhores condições de potência de microondas aplicada e do tempo de desidratação osmótica. As condições escolhidas foram, respectivamente, 279W de potência de microondas, equivalente a 0,7 W/g em relação à massa inicial, e desidratação osmótica durante 60 minutos. O critério de escolha foi a redução do tempo de secagem combinado com a qualidade do produto parcialmente seco em termos de encolhimento, capacidade de reidratação e porosidade.

O segundo estágio corresponde ao segundo período de taxa de secagem decrescente, tal como foi exposto no Capítulo 3. Nesse período de secagem foram escolhidas três potências de microondas aplicadas, a serem testadas, e a melhor condição da temperatura do ar. Ficou definido que a temperatura do ar de secagem de 70°C seria fixada ao longo de

toda a secagem e que seria válida para os dois estágios. Com relação aos níveis das potências de microondas aplicadas, foram definidas as potências de 74, 95 e 188 W, correspondentes às densidades de potência de 0,20, 0,25 e 0,50 W/g com relação à massa inicial. Essas três condições experimentais foram analisadas com relação à cinética de secagem e a qualidade do produto seco em termos de encolhimento, capacidade de reidratação e porosidade.

Procurou-se, então, unir os melhores resultados obtidos nas fases anteriores da pesquisa e comparar a eficiência da secagem completa, até a obtenção de um produto com umidade de 0,18kg_a/kg_{ms}, com movimentação da carga dentro da cavidade aplicadora de microondas. A aplicação de microondas no período final da secagem acelera a cinética de secagem, no entanto, os produtos biológicos são termicamente sensíveis e várias são as mudanças estruturais que ocorrem por meio de tratamentos térmicos. A heterogeneidade de campo eletromagnético é uma característica intrínseca das cavidades ressonantes de múltiplos modos, de maneira que a saída de umidade do material e o seu aquecimento simultâneo ocorrem de forma heterogênea. Portanto, esse último estudo foi desenvolvido para uma melhor análise da aplicação de microondas no período final de secagem utilizando uma configuração de equipamento diferenciada com movimentação da amostra na cavidade.

5.2 Objetivos

Discutem-se, neste capítulo, os resultados desse estudo complementar, especialmente quanto ao objetivo de avaliar a influência da potência de microondas na secagem realizada em dois estágios de banana pré-desidratada osmoticamente em cavidade multímodo com movimentação da carga.

Avaliam-se também os resultados referentes a seus objetivos específicos, que foram:

1) estudar o efeito da potência de microondas aplicada na cinética do período final da secagem de fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente, até 15% de umidade bu, equivalente a 0,18kg_a/kg_{ms};

2) estudar a influência das condições de secagem por meio da análise da atividade de água, porosidade, encolhimento e capacidade de reidratação;

3) comparar os resultados do efeito da potência no período final da secagem realizadas em cavidade de múltiplos modos com movimentação do material e em cavidade com modos mais controlados e sem movimentação do material, principalmente por meio da observação da produção de fatias queimadas .

5.3 Material e Métodos

5.3.1 Matéria-prima

Foram utilizadas bananas da variedade nanicão (*Musa acuminata* subgrupo *Cavendish*) cortadas em fatias de 10mm. A aquisição, o armazenamento e a preparação da fruta foram realizadas de acordo com a metodologia descrita no item 4.3.1.

5.3.2 Caracterização da matéria-prima e do produto seco

As frutas *in natura* foram caracterizadas pela análise do teor de umidade, dos sólidos solúveis totais (SST) e da atividade de água (a_w).

A amostra desidratada osmoticamente foi caracterizada pelo teor de umidade, do volume de sólidos (V_{sa}), volume aparente (V_{ap}) e porosidade (ε).

O produto seco foi caracterizado de acordo com o teor de umidade, a atividade de água, o volume de sólidos, o volume aparente, encolhimento (V/V_0), porosidade e capacidade de reidratação (CR).

As metodologias para a realização dessas análises já foram descritas anteriormente no item 4.3.2.

5.3.3 Desidratação osmótica

O processo de desidratação osmótica foi desenvolvido em uma incubadora (TECNAL, modelo TE421), com controle de agitação e temperatura, tal como descrito no item 4.3.3. As condições foram solução de sacarose na concentração de 55ºBrix e

temperatura constante de 40ºC, com agitação constante de 80 rpm. A proporção entre massa de fruta em relação à massa de solução foi mantida em 1:5 (fruta:solução). Originalmente, a proporção entre massa de fruta e de solução era de 1:10. Foi realizado um teste inserindo-se duas fatias por frasco para o mesmo volume e verificou-se que a cinética de desidratação osmótica e a umidade final não apresentaram diferenças significativas.

As fatias de banana foram desidratadas durante 60 minutos, para a utilização nos estudos subseqüentes de secagem completa com aplicação de energia de microondas. A escolha desse tempo foi realizada com base na análise da cinética de secagem durante o primeiro período e dos parâmetros de qualidade do produto parcialmente seco com 0,67 kg_a/kg_{ms}, discutidos ao longo do Capítulo 4.

Após a desidratação, as amostras foram acondicionadas em papel filme e estocadas a 5°C durante 16 horas para a posterior secagem.

5.3.4 Secagem assistida a microondas

5.3.4.1 Forno de microondas adaptado

O processo de secagem com assistência de microondas foi conduzido no mesmo sistema de secagem a ar quente e aplicação de microondas como já descrito no item 4.3.4.1. Foi incluída nessa etapa, mais uma modificação no interior da cavidade de microondas, que engloba o segundo período de secagem, no qual a redução de massa de material dentro da cavidade é grande, em razão da perda de água ao longo do mesmo. Portanto, surgiu a necessidade de redução da potência de microondas aplicada ao material, pois o produto não necessita de potências de microondas tão elevadas para manter níveis razoáveis de densidade de potência disponível (razão entre a potência aplicada e a massa de produto).

Dessa forma, evitou-se o fornecimento excessivo de energia disponível para o material, além daquele necessário para a eliminação da umidade, evitando-se conseqüentemente a elevação brusca de temperatura do produto que poderia levar à queima do mesmo.

Dessa forma foi adaptado um sistema interno de circulação de água, sistema este que permitiu obter menores níveis de potência (BERTELI, 2005; SILVA, 2002). O sistema foi composto por uma serpentina de polietileno sustentada no teto da cavidade, de maneira a não interromper a leitura da temperatura superficial do material realizada pelo sensor de infra-vermelho, ligada a uma bomba peristáltica e com variação de velocidades. A circulação de água na serpentina, instalada no interior da cavidade, realizada, simultaneamente à secagem, possibilitou a diminuição da potência de microondas, pois parte da energia de microondas foi absorvida pela carga d'água. Por meio da vazão da água e do seu gradiente de temperatura, medido na entrada e saída do forno, foi possível calcular a potência absorvida pela mesma (P_{ab}), pela seguinte equação:

$$P_{ab} = \dot{m} c_P (T_s - T_e) \qquad \text{Eq. 5-1}$$

sendo que

$\dot{m}$ = vazão de água circulante;

c_p = calor específico da água;

T_s = temperatura da água na saída da cavidade;

T_e = temperatura da água na entrada da cavidade.

A calibração da potência efetiva (P_e) para esse forno foi determinada por SOUSA (2002) por meio do método da IEC 60705 da *Commission Électronique Internationale*. A potência disponível (P_{dis}) para a carga de banana foi calculada pela equação:

$$P_{dis} = P_e - P_{ab} \qquad \text{Eq. 5-2}$$

5.3.4.2 Procedimento experimental

As amostras previamente desidratadas foram retiradas do refrigerador e imediatamente pesadas em uma bandeja de polipropileno vazada e conduzidas para o sistema de secagem com aplicação de microondas. Foram utilizadas 400g de fatias de banana dispostas lado a lado na bandeja, como descrito no item 4.3.4.2. Os testes de secagem foram realizados com temperatura do ar a 70°C e velocidade média de 0,8 m/s.

Durante o primeiro período de secagem, que compreendeu os teores de umidade da inicial até 0,67 kg_a/kg_{ms}, a potência de microondas aplicada ao processo foi de 279W, correspondente a 0,75W/g com referência à massa inicial (W_0). Essa potência durante o período inicial de secagem foi aplicada para todos os experimentos. Durante o segundo período de secagem, com teores de umidade entre 0,67 kg_a/kg_{ms} e 0,18 kg_a/kg_{ms}, foram testadas as seguintes potências de microondas aplicadas ao produto 73, 95 e 188W, correspondentes a 0,2; 0,25 e 0,5W/g, referidas à massa inicial da secagem (W_0). Essas potências foram escolhidas com base nos estudos realizados no Capítulo 3 e no trabalho de SOUSA (2002). No Capítulo 3, as potências de microondas aplicadas no segundo período de secagem foram 76, 150, 230W, correspondentes a 0,076; 0,150 e 0,230W/g referidas à massa inicial da secagem (W_0). Um aumento da potência acelera a secagem, mas, no entanto, produz uma quantidade de fatias queimadas próximas de até 30%. Embora a configuração do sistema de secagem deste estudo seja diferente daquela, a movimentação do material diminui a heterogeneidade do campo. Dessa forma, torna-se interessante realizar esse estudo com um intervalo de densidade de potência que compreende as maiores densidades de potência do Capítulo 3, 0,150 e 0,230W/g. De acordo com SOUSA (2002),

uma densidade de potência disponível ótima para a secagem de bananas inteiras encontra-se na faixa de 0,3W/g com relação ao desempenho da secagem no que toca à ausência de fatias queimadas.

Ao longo dos dois estágios, a aplicação de potência de microondas foi constante, ao longo da secagem, para cada um dos níveis citados em cada período, desde que a temperatura do produto não atingisse o limite máximo de 97°C.

5.4 Resultados e Discussão

Nesse item serão apresentados e discutidos os resultados encontrados para a cinética de secagem realizada em dois estágios de potência de microondas aplicada. Será analisada a influência da potência de microondas no período final da secagem em termos da economia de tempo de processo, por meio da investigação das curvas de secagem e da qualidade do produto seco com umidade final de 0,18 kg_a/kg_{ms}. A qualidade será avaliada com relação ao encolhimento sofrido pela fruta, a sua capacidade de reidratação, a porosidade e a atividade de água. Serão apresentados os ajustes do modelo de Fick simplificado aos dados experimentais e a validação dos mesmos visando à determinação das difusividades efetivas (D_{ef}) para essas condições experimentais de secagem.

5.4.1 Cinética de secagem

A Figura 5.1 ilustra a curva de secagem em dois estágios das fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente com ar quente a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de 279W de potência de microondas durante o período inicial e 73, 95 e 188W de potência de

microondas aplicadas no segundo período. Os dados completos da cinética de secagem estão apresentados no Apêndice III.

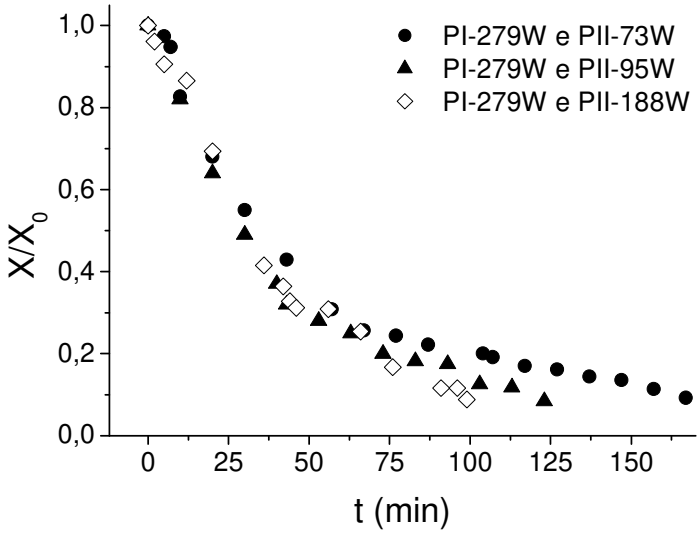


Figura 5.1 – Adimensional de umidade em função do tempo das fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente submetidas à secagem com aplicação de microondas em dois estágios.

Nessa figura, observou-se que a inclinação da curva de perda de umidade adimensional em função do tempo muda após 43 minutos de processo quando atinge umidade de 0,67kg_a/kg_{ms}.

Durante o período final da secagem, o aumento da potência de microondas aplicada à secagem acelera a cinética da perda de água ao longo do tempo. Conseqüentemente, o tempo de secagem para a obtenção de um produto com 0,18 kg_a/kg_{ms} diminui com o aumento da potência de microondas aplicada. O tempo gasto no período inicial de secagem, nos quais foram aplicadas 279W de potência de microondas, foi de 43 minutos, como já havia sido discutido no Capítulo 4. Os tempos encontrados para as três potências de microondas testadas no período final da secagem foram de 99, 123 e 167 minutos para as

potências de microondas de 188, 95 e 73W, respectivamente. Um aumento na potência de microondas em 115W, de 73 para 188W, diminui o tempo de secagem em 40%.

Os tempos de secagem por convecção de banana, sem aplicação de microondas, encontrados na literatura são bem superiores aos encontrados neste trabalho. ARAÚJO (2000) apresentou tempos de secagem com ar a 60°C de gomos de banana de 5 cm de comprimento pré-desidratados osmoticamente por 2 horas em solução de sacarose a 50°Brix de aproximadamente 1200 minutos para atingir 0,4 kg_a/kg_{ms}. No trabalho realizado por NGUYEN & PRICE (2006) o tempo de secagem para fatias de banana de 10mm atingirem 0,15kg_a/kg_{ms} com ar a 60 e 70 °C foi de 1320 e 660 minutos, respectivamente. Comparando o tempo de secagem encontrado por esses autores aos encontrados neste trabalho, visto que as condições experimentais de espessura da amostra (10mm) e temperatura do ar (70°C) são comparáveis, a aplicação de 73W de potência de microondas à secagem reduz o tempo de secagem de 660 minutos para 167 minutos, uma redução do tempo de secagem de quase 4 vezes. SANKAT et al. (1996) apresentaram tempos de secagem entre 5,5 a 6 horas para secagem com ar a 80°C para banana previamente desidratada em solução de açúcar. Dessa forma, conclui-se que a cinética de secagem com aplicação de microondas é acelerada mesmo quando comparada com a secagem por convecção forçada com temperaturas elevadas do ar.

A Figura 5.2 ilustra a evolução da densidade de potência disponível de microondas em função do tempo, devido à redução de massa de material dentro da cavidade pela perda de umidade durante a secagem para as potências aplicadas no segundo período, 73, 95 e 188W. A densidade de potência foi calculada pela equação

$$DP_d(t) = \frac{P}{W(t)} \qquad \text{Eq. 5-3}$$

sendo que

DP_d = potência de microondas disponível no tempo t;

P = potência de microondas aplicada;

W = massa de material no tempo t.

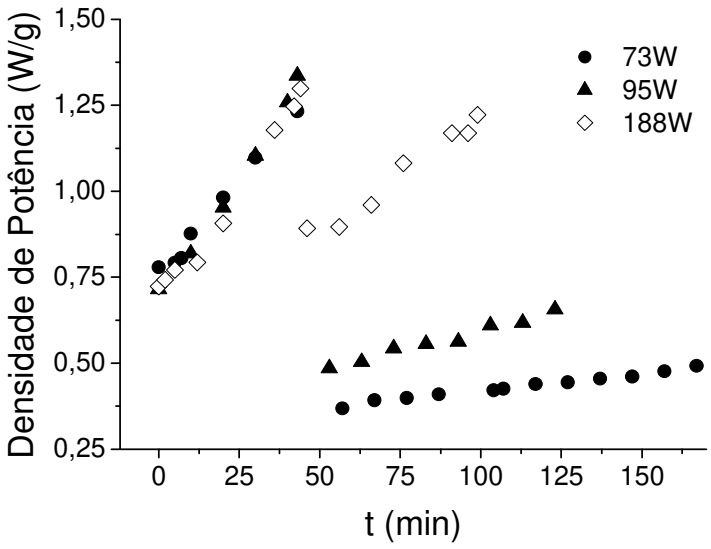


Figura 5.2 –Densidade de potência disponível de microondas (W/g) em função do tempo de secagem dos dois estágios, com aplicação fixa de 279W no período inicial.

Observa-se pela Figura 5.2 que a densidade de potência disponível durante o primeiro período aumenta proporcionalmente à perda de umidade ao longo do tempo. Comparando-se a variação da densidade de potência disponível durante o período inicial, nos quais foram aplicados 279 W, e o período final, no qual foram aplicados 73W, observa-se que a evolução da densidade de potência disponível ao longo do primeiro período ocorreu de forma mais abrupta, como era esperado. Durante o primeiro período a potência

aplicada foi 3,8 vezes superior e a quantidade de água na amostra a ser removida era superior. Portanto, a absorção de microondas no primeiro período foi maior em comparação ao segundo com aplicação de 73W de potência de microondas. À medida que a potência de microondas aplicada no segundo período aumentou, a evolução da densidade de potência disponível apresentou um acréscimo comparado aos 73W já discutidos. No entanto, embora tenha havido um deslocamento da curva de densidade de potência disponível em função do tempo com a aplicação de 188W em comparação aos 73W nesse segundo período, a inclinação ainda é inferior à do primeiro período. Vale ressaltar que a aplicação de 188W de potência no segundo período corresponde a uma densidade de potência de 0,5W/g, com relação à massa inicial (t=0). No entanto, a densidade de potência obtida com referência à massa do início do segundo período (em 43 minutos) coincide com a densidade de potência inicial do primeiro período (t=0), que é de 0,7 W/g.

Essa mudança na evolução da densidade de potência observada pode estar relacionada com o fato de que, durante o segundo período de secagem, a quantidade de umidade presente no material foi reduzida, assim como a taxa de secagem (Figura 5.1). A resistência interna à transferência de umidade é maior e é causa da diminuição de água livre presente na matriz sólida, da diminuição da mobilidade molecular e da possível formação de uma casca na superfície da fruta. Com a diminuição da água livre, e uma menor mobilidade molecular no interior do material, há também uma diminuição da permissividade dielétrica (ε*) do mesmo, a qual engloba uma redução no fator de perdas dielétricas (ε") e na constante dielétrica (ε'). Ou seja, o material apresenta uma menor absorção de energia de microondas conjuntamente com uma menor taxa de remoção da umidade em função do tempo.

As Figuras 5.3 e 5.4 ilustram as curvas da evolução da temperatura do produto, do ar de entrada e do ar de saída ao longo do tempo de secagem.

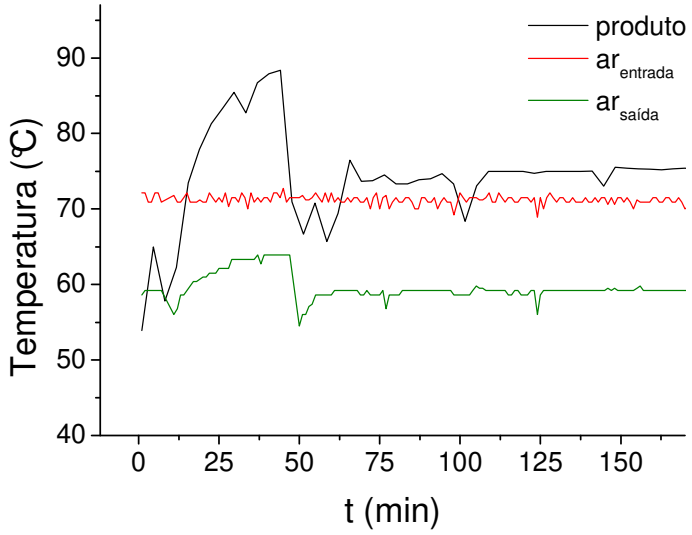


Figura 5.3 – Temperaturas do produto, do ar de entrada e de saída em função do tempo de secagem das fatias de banana com aplicação de potência de microondas de 279W no período inicial e 73W no período final da secagem.

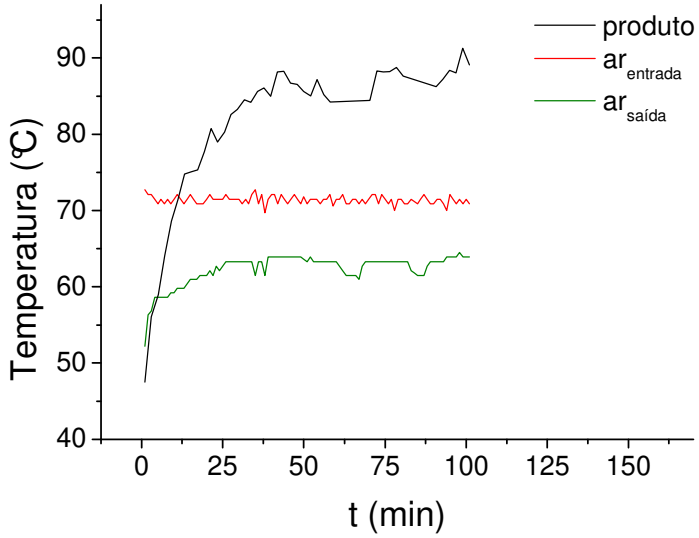


Figura 5.4 - Temperaturas do produto, do ar de entrada e de saída ao longo do tempo de secagem das fatias de banana com aplicação de potência de microondas de 279W no período inicial e 188W no período final da secagem.

De acordo com as figuras, observa-se que as temperaturas superficiais médias do produto atingem valores próximos de 90°C pela aplicação de ar quente a 70°C e 279W de potência de microondas, como já discutido no Capítulo 4 no item 4.4.3.1. Com a redução da potência aplicada de 279 para 73W e, conseqüentemente, redução na densidade de potência disponível, a temperatura do material apresenta uma queda brusca para aproximadamente 65°C. A partir desse ponto, no qual a potência aplicada é de 73 W e a densidade de potência disponível inicial é de 0,2 W/g, a temperatura do produto apresentou valores próximos a 5°C acima da temperatura do ar de entrada e manteve-se praticamente constante até o final da secagem. Na saída do equipamento, o ar de secagem apresentou uma diminuição de 70°C (temperatura na entrada) para aproximadamente 65°C durante o período inicial da secagem. Com a diminuição da potência aplicada para 73W no segundo período, houve mais uma queda na temperatura do ar de saída para aproximadamente 60°, a qual manteve-se constante até o final do processo. O aumento da potência no segundo período de 73 para 188W provocou um aumento na temperatura superficial do produto que se manteve entre 80 e 90 °C e uma diminuição na queda de temperatura do ar de saída, que se manteve praticamente constante próxima dos 65°C.

FENG & TANG (1998) propuseram uma análise para explicar a mudança de temperatura da amostra ao longo da secagem com aplicação de microondas por meio da seguinte equação de balanço de energia térmica:

$$\Delta E = E_M + E_{AR} - E_{evaporação} \qquad \text{Eq. 5-4}$$

$$E_M = P_V = 5{,}56 \times 10^{-4} \times f\varepsilon'' E^2 \qquad \text{Eq. 5-5}$$

sendo que

E_M = energia fornecida pelo aquecimento dielétrico (>0);

E_M = energia térmica fornecida pela transferência de calor entre sólido e ar;

$E_{evaporação}$ = perda de energia pela evaporação de água no interior do sólido.

Um acúmulo de energia (ΔE) positivo leva a um aumento da temperatura do material. A energia térmica fornecida pela transferência de calor entre a amostra e o ar pode ser tanto positiva quanto negativa, dependendo da sua direção. Já a energia gasta com a evaporação de água durante a secagem é sempre maior que zero. A energia fornecida pela aplicação de energia de microondas, por sua vez, é proporcional ao quadrado do campo elétrico local [E(V/m)], a freqüência das microondas (2,45GHZ, neste caso) e a perda dielétrica do material (ε"), que é dependente da umidade e da temperatura.

Dessa forma, pode-se pressupor que, durante o primeiro estágio da secagem com aplicação de 279W, o material foi aquecido pela transferência de calor do ar quente e pela energia de microondas até aproximadamente 12 minutos quando a temperatura do material ultrapassou a temperatura do ar de entrada, simultaneamente, devido à perda de umidade também ocorreu perda de energia ($E_{evaporação}$). Em seguida, a temperatura do material continuou superior à temperatura do ar e aumentou até aproximadamente o final do primeiro estágio em 43 minutos. Nessa etapa há uma compensação da conversão de calor pela absorção de energia de microondas e a transferência de calor do material para o ar e da evaporação de água do material. No entanto, a E_M ainda é superior à soma das outras duas e o acúmulo de energia térmica é positivo. No segundo período, mesmo com a redução da energia de microondas para ambos os casos de 73 e 188W de potência de microondas, a temperatura do material apresentou uma estabilização em torno de 85 e 75°C para as potências de 73 e 188W, respectivamente. Ou seja, nessa etapa há uma compensação das energias gastas para evaporação da umidade e para transferência de calor do material para o

ar com a energia de microondas absorvida pelo material (ΔE=0). Ao final da secagem, observou-se que a temperatura do material não apresentou sinais de queda, ou seja, a absorção de microondas pelo material manteve-se, o que indica a presença de umidade no interior do material (ADU & OTTEN, 1996; FENG & TANG, 1998).

5.4.2 Ajuste por modelos matemáticos

A Tabela 5.1 apresenta os valores dos parâmetros do ajuste dos dados da curva de secagem experimentais ao modelo de Fick simplificado (Eq. 2-14), da difusividade efetiva do material e do comprimento característico utilizado considerando uma média entre a espessura no início e no final do processo. O ajuste foi realizado para cada período de secagem separadamente, de maneira a encontrar valores de difusividades mais realísticos, tanto quanto possível, com relação às diferentes condições de secagem , no que diz respeito aos parâmetros do processo e à cinética de perda de água em cada um dos períodos.

Tabela 5.1 - Parâmetros obtidos do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Fick simplificado para a secagem com ar a 70°C e 0,8m/s combinado com aplicação de microondas em dois estágios de fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente.

			Período inicial (PI)			
P (W)	V/V_0	$\overline{L}\times10^{-3}$(m)	k (min^{-1})	D_{ef} x 10^9 (m^2/s)	R^2	ER
279	0,55	3,9	0,024	2,46	0,992	0,03
			Período final (PII)			
73	0,57	2,8	0,0097	0,51	0,9686	0,04
95	0,37	2,3	0,0156	0,56	0,9716	0,06
188	0,46	2,5	0.0220	1,0	0.9316	0,13

No decorrer deste trabalho, não foi realizado um acompanhamento do encolhimento ao longo da secagem, no entanto, os dados de encolhimento ao final do primeiro e segundo

períodos de secagem foram utilizados para realizar uma correção na espessura média utilizada para o cálculo da difusividade efetiva. De acordo com a discussão realizada no item 4.4.3.3, foi desconsiderado o encolhimento sofrido pelo material no sentido radial. Dessa maneira, a seguinte relação foi utilizada para estimar a espessura ao final de cada período, considerando a fatia como sendo um cilindro de raio R e espessura *e*:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\pi R^2 e}{\pi R^2 e_0} = \frac{e}{e_0}$$
$$e = \frac{V}{V_0} e_0 \qquad \text{Eq. 5-6}$$

Portanto, conhecendo V/V_0, a espessura inicial (e_0=10mm), calculou-se a espessura ao término do período inicial e final e calculou-se a média entre elas para cada período individualmente. A meia espessura média ($\bar{L}$) foi considerada para o cálculo das difusividades efetivas.

Pela Tabela 5.1, observa-se que os dados experimentais apresentaram um bom ajuste ao modelo de Fick no período inicial da secagem, com valores de R^2 próximo da unidade e baixo erro médio relativo (ER). No período final da secagem, os valores de R^2 são menores, variando de 0,9316 a 0,9716, indicando uma menor correlação dos dados experimentais ao modelo. O menor valor encontrado para esse parâmetro foi de 0,9316 para a amostra seca com 188W de potência de microondas. No entanto, analisando pelo erro relativo pode-se considerar um bom ajuste, pois o erro varia de 4 a 13%. É interessante notar que os dados se ajustam melhor ao modelo nas condições mais amenas de potência de microondas aplicada, tomando como referência os menores valores de R^2 e ER. Provavelmente, na fase final, a taxa de secagem decrescente apresente mais de um período, como proposto no Capítulo 3. Nesse referido capítulo, foi possível detectar uma transição na taxa de secagem em função da umidade devido à possibilidade de acompanhamento da

massa de material continuamente ao longo da secagem. Na montagem experimental desse capítulo, optou-se pela utilização da movimentação do material, impossibilitando o acompanhamento da massa sem interrupção do processo. De maneira que essa pode ser uma das razões de não se ter observado essa transição neste conjunto de experimentos. Ainda vale uma ressalva com relação ao emprego do modelo de Fick, o de que os mecanismos de transferência de umidade pela aplicação de microondas, embora não sejam totalmente esclarecidos, não ocorrem apenas por difusão. No entanto, a utilização do modelo de Fick simplificado é válida para encontrar os valores das difusividades nos dois períodos com o intuito de realizar a comparação dos mesmos com os dados da literatura.

Os valores de difusividade efetiva encontrados apresentaram ordem de grandeza de 10^{-9} m^2/s. A difusividade efetiva do período inicial foi de 2,46 x 10^{-9} m^2/s, sendo 2,5 vezes superior ao maior valor de difusividade do período final de 1,0 x 10^{-9} m^2/s encontrado para a potência de microondas de 188W. Esse resultado é coerente com a cinética de perda de água em função do tempo de secagem de fatias de banana, que apresenta uma taxa de secagem maior no período inicial, que abrange os teores de umidade entre a umidade inicial de 1,94 kg_a/kg_{ms} e 0,67kg_a/kg_{ms}, seguida de uma taxa de secagem menor no período final até atingir umidade de 0,18 kg_a/kg_{ms}. Essa mudança nas difusividades entre os períodos não é justificada apenas pela redução na potência de microondas aplicada ao processo de secagem, mas também pelo aumento da resistência interna à saída de umidade provocada pela diminuição de água livre no interior da matriz sólida. Adicionalmente, como conseqüência há uma redução no fator de perdas dielétricas relativo da mesma, que exprime a capacidade do material em absorver energia de microondas.

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam as curvas de perda de umidade em função do tempo e os valores preditos pelo modelo de Fick ajustado para cada um dos períodos de secagem.

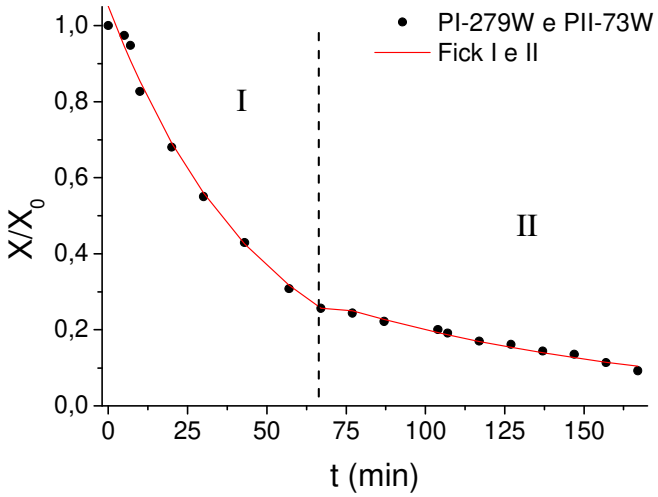


Figura 5.5 - Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem com ar a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de potência de microondas de 279W no período inicial (PI) e 73W no período final (PII) de banana desidratada osmoticamente.

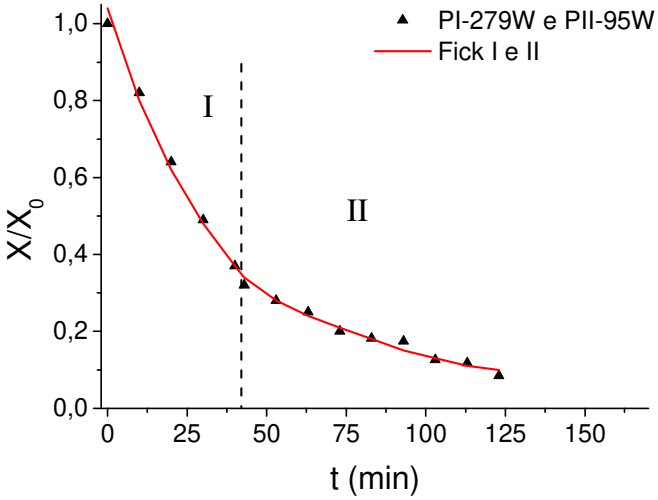


Figura 5.6 - Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem com ar a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de potência de microondas de 279W no período inicial (PI) e 95W no período final (PII) de banana desidratada osmoticamente.

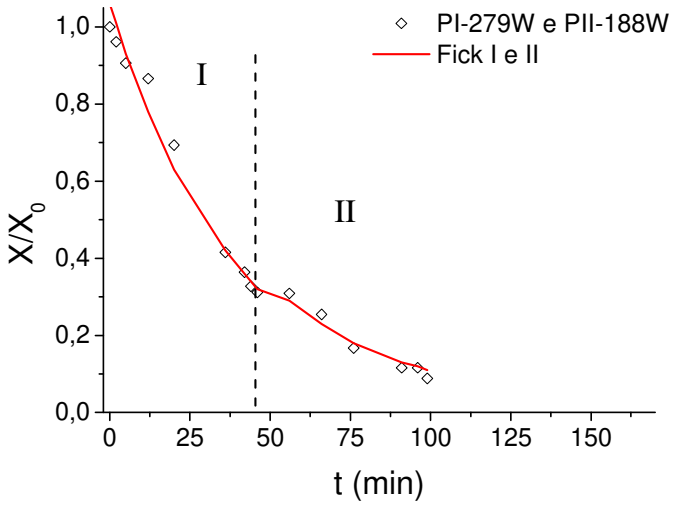


Figura 5.7 - Ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais de secagem com ar a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de potência de microondas de 279W no período inicial (PI) e 188W no período final (PII) de banana desidratada osmoticamente.

Analisando os valores de difusividade efetiva das fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente e secas com ar a 70°C combinado com diferentes potências de microondas aplicadas no período final de secagem, observa-se que um aumento na potência provoca um aumento na difusividade da fruta. A elevação da potência aplicada de 73W para 95W, aumentou a difusividade em 1,1 vezes e de 95W para 188W, ou seja, quando se dobra o valor da potência de microondas, o valor da difusividade efetiva aumentou em duas vezes.

WANG et al. (2007) encontraram valores de difusividades efetivas para purê de maçã seco com aplicação de microondas da ordem de 10^{-8} m^2/s, 10 vezes maior do que os encontrados nesse trabalho. No entanto, a menor densidade de potência disponível (W/g) aplicada à secagem foi de 15 W/g, 20 vezes maior do que a maior densidade de potência disponível aplicada neste trabalho para ambos os períodos de secagem aqui considerados, que foi de 0,75W/g.

DEMIREL & TURHAN (2003) propõem a divisão da curva de secagem de bananas secas por convecção, nas temperaturas entre 40 e 70°C, em dois períodos de secagem decrescentes com umidades críticas variando entre 1,25 e 0,85 kg_a/kg_{ms}. Eles encontraram valores de difusividade no período inicial próximo de $0,13x10^{-9}$ m^2/s e no período final próximos de $0,11x10^{-9}$ m^2/s para temperatura do ar de 70°C. Comparando esses valores aos encontrados na Tabela 5.1, pode-se afirmar que a aplicação de microondas durante o início da secagem aumenta a difusividade de água em 18 vezes e em até 9 vezes quando aplicada no período final da secagem.

Vários outros autores encontraram a difusividade efetiva de banana submetida à secagem por convecção, sem considerar os diferentes períodos de taxa decrescente. FERNANDES et al. (2005) encontraram difusividade efetiva de $1,29x10^{-9}$ m^2/s para bananas pré-desidratadas osmoticamente durante 3 horas em solução de sacarose a 50°Brix e 50°C e secas com ar quente a 60°C considerando o encolhimento sofrido pela mesma. SANKAT et al. (1996) encontraram valores de difusividades entre $34,8x10^{-10}$ m^2/s para banana *in natura* seca com ar quente a 60°C e $8,8x10^{-10}$ m^2/s para banana pré-desidratada com solução de sacarose a 65°Brix sem agitação durante 36 horas e secas também com ar quente a 60°C. BAINI & LANGRISH (2006) encontraram valores de $1,23x10^{-9}$ m^2/s e $1,58x10^{-9}$ m^2/s para bananas secas com ar a 60° de modo contínuo e intermitente, respectivamente. DANDAMRONGRAK et al. (2002) encontraram valores de difusividades de banana submetidas a diversos pré-tratamentos previamente a secagem em bomba de calor a 50°C dentro do intervalo de $4,6x10^{-10}$ a $13,2x10^{-10}$ m^2/s.

Os valores das difusividades de banana pré-desidratadas osmoticamente e secas com ar encontrados por esses autores apresentam-se, em geral, 1,6 vezes inferiores aos

encontrados para o primeiro período e 1,5 vezes superiores aos encontrados para o segundo período da secagem com aplicação de microondas.

De acordo com STRUMILO & KUDRA (1986), a taxa no período decrescente de secagem, que por sua vez é influenciada pelo gradiente de umidade no interior do material, é dependente da espessura. De maneira que a difusividade é proporcional ao comprimento característico do material. Dessa forma, no caso de não se considerar o encolhimento ou uma correção no valor da espessura da amostra considerando as mudanças ocorridas durante a secagem, encontra-se valores de difusividades maiores. QUEIROZ & NEBRA (2001) avaliaram a inclusão do encolhimento no modelo difusional de Fick para os dados de secagem por convecção de banana e confirmaram essa relação.

Logo, vê-se a necessidade do levantamento de dados relacionados à cinética de secagem, como a difusividade efetiva, considerando-se as variações nas condições do processo, na estrutura do material e, conseqüentemente, na própria cinética de perda de água ao longo da secagem.

A modelagem matemática e a obtenção das difusividades efetivas para as diferentes condições de processo favorecem a melhoria no dimensionamento das seções de secagem dos equipamentos, de maneira a respeitar as necessidades energéticas do processo e procurar obter as melhores condições de qualidade de acordo com a necessidade do produto e da cinética de perda de água, que estão correlacionados.

5.4.3 Característica do produto seco

Nesse item será realizada a análise das características de qualidade do produto seco com 0,18kg_a/kg_{ms}, em relação ao encolhimento, à porosidade, à capacidade de reidratação e à atividade de água. O desempenho da secagem com aplicação de microondas em dois

estágios, realizada em cavidade de múltiplos modos com movimentação da carga, também será avaliado com relação à obtenção de amostras queimadas.

A Tabela 5.2 apresenta os dados de razão de volume, da porosidade e da capacidade de reidratação das amostras secas, para as três potências de microondas aplicadas no período final da secagem. A potência de microondas foi mantida fixa em 279W durante o período inicial de secagem. Vale ressaltar que as variações sofridas pela banana no período inicial, até umidade final de 0,67kg_a/kg_{ms}, já foram discutidas no Capítulo 4.

Tabela 5.2 - Valores de razão de volume, porosidade e capacidade de reidratação das fatias de banana desidratadas e secas com ar quente a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de microondas em dois estágios.

P (W)	V/V_0 (%)	ε	CR (%)
73	57 ± 7	0,51 ± 0,03	75 ± 8
95	37 ± 3	0,21 ± 0,03	44 ± 3
188	46 ± 7	0,33 ± 0,05	64 ± 7

A razão V/V_0 é a relação entre o volume da amostra seca e o seu volume inicial, portanto a porcentagem de encolhimento da amostra foi encontrada como:

$$\% \text{ encolhimento} = 100-(V/V_0) \qquad \text{Eq. 5-7}$$

De acordo com os dados de V/V_0 da tabela, observa-se que o encolhimento sofrido pelas fatias de banana apresentou um valor máximo de 63% para a amostra seca com 95W de potência no período final, sendo que o menor valor encontrado foi de 43%, para a amostra seca com potência mais baixa, 73W.

Durante o estágio inicial (explorado no Capítulo 4), com a aplicação de 279W de potência de microondas, a amostra apresentou um encolhimento de 45%, relativo à redução de 65% da umidade do material. Com a aplicação de 73W no período final, a cinética de

secagem se deu de forma mais lenta em comparação às outras potências. Dessa forma pode-se supor que houve uma compensação entre a formação de uma camada superficial mais seca na amostra e a saída de água da mesma, com a manutenção do gradiente de pressão devido ao aquecimento interno gerado pela aplicação de microondas. Para potências intermediárias, como 95W, esse efeito não ocorre e a amostra apresenta um maior encolhimento. No entanto, com a elevação da potência de microondas para níveis maiores, 188W, ou seja, com aquecimento mais brusco, a temperatura superficial do material atingiu valores próximos a 80°C, favorecendo a formação da casca superficial, que tende a segurar as tensões superficiais que provocam o encolhimento, e pela absorção interna volumétrica das microondas maiores gradientes de pressão interna foram mantidos, favorecendo a formação de bolhas com a expulsão de umidade de dentro da matriz sólida (STRUMILLO & KUDRA, 1986). De acordo com KOWASLKI & RYBICKI (2006), o aquecimento de materiais dielétricos por meio da aplicação de microondas pode envolver efeitos mecânicos devido à ação de forças eletromotivas. De maneira que aquecimentos intensos podem causar rompimentos da estrutura interna pela rápida transição de fase no interior do material.

De acordo com os dados de porosidade apresentados na Tabela 5.2, observa-se que a amostra seca com aplicação de 73W de potência apresentou o maior porosidade, 51%, ao final da secagem. Com um aumento da potência para 95W, ou seja um aumento de potência de 30%, a porosidade diminuiu para 21%. Com aplicação de potência mais elevada, 188W, a porosidade voltou a aumentar, atingindo o patamar de 33%. No entanto, essa elevação não atinge a porosidade alcançada pela fruta seca com 73W. Esse resultado mostrou-se coerente aos encontrados para o encolhimento, pelo fato de haver uma correlação com a porosidade alcançada pelo material e o encolhimento sofrido pelo mesmo quando

submetido à secagem. Materiais que apresentam encolhimento acentuado, em geral apresentam uma estrutura densa, com poucos poros, devido ao rompimento das estruturas internas.

Os dados de capacidade de reidratação apresentados na Tabela 5.2, são referentes a quantidade de água absorvida pelas fatias secas, após permanecerem imersas em água a 25°C por 16 horas.

Observa-se que a capacidade de reidratação do material apresentou o mesmo comportamento que a porosidade e o encolhimento com relação à potência aplicada. A menor potência de microondas apresentou maior capacidade de reidratação, atingindo o valor de 75%. Com um aumento na potência de 30%, ou seja passando de 73 para 95W, a fruta apresenta a menor capacidade de reidratação para esse intervalo de potência estudado na fase final de 44%. Com a aplicação do dobro dessa potência, a capacidade de reidratação volta a aumentar atingindo um valor de 64%, próximo ao encontrado para o tratamento mais brando.

De acordo com WANG & XI (2005), a cenoura seca com microondas em dois estágios apresenta um aumento na sua capacidade de reidratação com o aumento da potência de microondas aplicada no segundo estágio para densidades de potência entre 0,5 a 2,6 W/g e um decréscimo para densidades de potência superiores a 2,6W/g. Os intervalos de densidades de potências disponíveis estudados pelos autores apresentam-se superiores aos estudados nesse trabalho que variaram de 0,2 a 0,5W/g, para 73W e 188W, respectivamente.

MASKAN (2000), afirma que a aplicação de microondas no período final da secagem de fatias de banana não apresentou diferenças significativas na capacidade de reidratação quando comparado aos resultados encontrados para secagem por convecção e

convecção combinada com microondas. Já no trabalho de DROUZAS & SCHUBERT (1996) a aplicação de microondas combinada com vácuo apresenta um incremento na capacidade de reidratação de banana até duas vezes superior àquela da amostra seca por convecção.

A Tabela 5.3 apresenta os valores encontrados para a atividade de água e umidade final medidas para as fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente e secas com aplicação de microondas em dois estágios. As medidas foram realizadas logo após o término da secagem.

Tabela 5.3 – Valores de atividade de água e umidade final atingidos pelas fatias de banana desidratadas e secas com ar quente a 70°C e 0,8 m/s combinado com aplicação de microondas em dois estágios.

P (W)	X_f (kg_a/kg_{ms})	a_w
73	0,13 ± 0,05	0,61 ± 0,04
95	0,24 ± 0,03	0,81 ± 0,04
188	0,18 ± 0,02	0,7 ± 0,1

De acordo com os resultados encontrados, observa-se que as amostras secas não apresentaram valores médios de atividade de água inferiores a 0,6. A aplicação de 73W de potência no segundo estágio apresentou o menor valor (0,61), com o menor valor da umidade final, e pode ter sido causado pelo maior tempo de secagem e possivelmente maior homogeneidade da secagem. Pois, para a maior potência testada de 188W, os desvios são maiores e podem ter sido causados pela aceleração da cinética nas fatias localizadas em regiões de maior intensidade do campo eletromagnético. O que indica que a movimentação do material apenas ameniza o efeito de campo estacionário, mas não o elimina por completo.

Os equipamentos utilizados neste capítulo e no Capítulo 3 apresentam configurações bem diferentes sob vários aspectos. Os formatos das cavidades aplicadoras de microondas apresentam formação de modos distintos. O escoamento de ar é realizado com fluxo paralelo ao produto no equipamento utilizado para o estudo deste capítulo, enquanto que naquele do capítulo 3, o escoamento é cruzado. A cavidade de microondas ressonante de múltiplos modos utilizada neste capítulo permitiu a movimentação da carga de banana depositada sobre o prato giratório. Respeitando as diferenças entre os equipamentos, uma comparação qualitativa da presença de fatias queimadas sugere que a movimentação da carga promoveu um melhor desempenho da secagem. Uma vez que, não foi observada a presença de fatias queimadas no sistema munido de movimentação do material, considerando o padrão estabelecido no item 3.3.2.

Essa observação é importante, pois ao longo da secagem em cavidade estática, com relação à amostra, as fatias mostraram sinais de queima mesmo com a secagem sem aplicação de microondas e ar a 50°C no período final da secagem, que corresponde a Fase III do Capítulo 3.

Esses resultados são importantes para a exploração do desenvolvimento do processo de secagem com aplicação de microondas, assim como de produtos com diferentes características, no que diz respeito aos equipamentos e seus desempenhos e às demandas energéticas e de qualidade do produto final. Por um lado, o sistema de secagem, sem movimentação do material, proporcionou um maior controle do processo e um acompanhamento contínuo da cinética de secagem e da evolução das temperaturas internas do material. Por outro lado, a montagem experimental munida de um sistema que permitia a movimentação do material possibilitou a verificação do desempenho da secagem com uma heterogeneidade de campo mais amena. De maneira que proporcionou a obtenção de

um lote de amostras secas mais homogêneo, sem a presença de peças queimadas. Vale ressaltar que essas observações são válidas para os intervalos de potência de microondas (ou de densidades de potência) estudados.

5.5 Conclusões

A aplicação de microondas na fase final da secagem apresentou uma redução na taxa de secagem de fatias de banana previamente desidratadas. O tempo de secagem apresentou uma redução de no mínimo quatro vezes com aplicação de microondas comparado à secagem somente por convecção em condições similares.

O ajuste realizado ao modelo de Fick simplificado apresentou dados de difusividades efetivas coerentes aos da literatura considerando a aplicação de microondas ao processo em dois estágios. Os valores encontrados para o primeiro estágio de secagem com aplicação de 279W de potência de microondas, correspondente ao período inicial de secagem englobando as umidades entre 1,96 a 0,67 kg_a/kg_{ms}, foram de $2,46x10^{-9}$ m^2/s e para o segundo estágio, período final de secagem até atingir 0,18 kg_a/kg_{ms}, de $0,51x10^{-9}$; $0,56x10^{-9}$ e $1,0x10^{-9}$ m^2/s, com a aplicação de 73, 95 e 188W de potência de microondas, respectivamente.

A difusividade efetiva foi maior para o período de secagem inicial como era esperado e, no segundo período, acompanhou o aumento da potência de microondas aplicada. O que confirma uma aceleração na cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas osmoticamente devido à aplicação de potência de microondas e, conseqüentemente, uma diminuição no tempo de secagem.

O aquecimento mais brando devido à aplicação de 73W de potência de microondas na secagem durante o segundo período apresentou amostras secas com menor encolhimento, maior capacidade de reidratação, maior porosidade e maior atividade de água.

A movimentação do material dentro da cavidade de microondas amenizou a heterogeneidade de campo eletromagnético, não sendo observada a presença de peças queimadas nas condições de potência de microondas estudadas.

Capítulo 6 - Considerações finais

A combinação de aquecimento por microondas com convecção por ar quente na secagem apresentou um aumento na taxa de perda de água dependendo das condições de temperatura e velocidade do ar. Ao longo da secagem, em cada um dos períodos de taxa de secagem, o efeito de interação dos parâmetros do ar na superfície com o aquecimento interno gerado pelas microondas pode provocar tanto uma elevação como uma diminuição do aquecimento internamente e superficialmente ao produto, dependendo das condições escolhidas. Essa interação entre as condições do escoamento do ar e a potência de microondas aplicada pode ser explorada tanto para o desenvolvimento de processos, como para produtos diferenciados, de acordo com a funcionalidade requerida para os mesmos.

A aplicação de potências elevadas no período inicial de secagem apresentou a vantagem de reduzir o tempo de secagem e de melhorar a qualidade do produto parcialmente seco. A combinação de desidratação osmótica ao processo de secagem, com aplicação de microondas, também auxiliou na melhoria da qualidade de um produto parcialmente seco, que apresentou menor encolhimento, maior porosidade e capacidade de reidratação em comparação à fruta *in natura* seca nas mesmas condições.

No período final de secagem, o fornecimento de energia eletromagnética foi aceitável em níveis moderados para a obtenção de um produto com maior capacidade de reidratação e porosidade e menor encolhimento. Mesmo com a utilização de potência de microondas baixa, a cinética de secagem é acelerada em relação à finalização da secagem somente por convecção a ar quente.

O desenvolvimento da secagem, com aplicação de microondas em cavidades que permitam a movimentação do material, apresentou vantagens em termos do aproveitamento do processo sem a obtenção de produtos queimados, dentro do intervalo de potências estudado. Cavidades com carga estática apresentaram até 30% da massa final de fatias queimadas, pelo aquecimento excessivo em algumas regiões de maior intensidade de campo elétrico.

A aplicação de microondas em dois estágios na secagem de banana desidratada apresentou-se viável, apresentando melhorias na qualidade final do produto. Os dados apresentados neste trabalho relacionam as características de qualidade do produto, como porosidade, encolhimento, capacidade de reidratação e atividade de água em função das condições de processo de potência de microondas e de temperatura e velocidade do ar. Essa mesma relação foi apresentada para os dados da cinética. Em síntese, este estudo pode ser útil para a exploração de processos de secagem acelerada que conjuguem o fornecimento de energia de acordo com a demanda do produto, buscando uma preservação das suas qualidades estruturais.

Os dados de difusividades efetivas e das constantes de secagem encontrados, considerando os diferentes períodos de secagem, podem auxiliar no projeto de equipamentos em seções, no qual, de forma mais realística, se considerem as necessidades tanto de fornecimento de energia para acelerar a secagem como as variações provocadas no material ao longo do processo.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Testar outros modelos para prever a cinética de secagem de banana considerando a geração de calor pela aplicação de microondas e o fenômeno de convecção na superfície do material;
- Correlacionar o comportamento da fruta durante a secagem e as propriedades dielétricas para diferentes teores de umidade;
- Avaliar a qualidade nutricional do produto seco em função da potência de microondas aplicada, para verificar se há degradação do valor nutricional da fruta após o processamento;
- Avaliar as mudanças estruturais por meio de microscopia ótica e eletrônica de varredura ao longo da secagem e acompanhar o encolhimento da amostra em função do tempo de secagem;
- Realizar o estudo de um aumento de escala para a secagem de banana, em um processo contínuo dividido em seções, considerando os diferentes períodos de secagem, com alterações de desenho da cavidade visando uma melhor distribuição do campo eletromagnético.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADU, B. & OTTEN, L. (1996). Effect of increasing hygroscopicity on the microwave heating of solid foods. **Journal of Food Engineering,** v.27, p.35-44.

AHRNÉ, L. (2005). **CombiDry first annual report**. European INCO-DEV project reference ICA4-CT-2002-10034

AL-DURI, B. & MCINTYRE, S. (1992) Comparison of drying kinetics of foods using a fan-assisted convection oven, a microwave oven and a combined microwave/convection oven. **Journal of Food Engineering**, v. 15, n. 2, p. 139–155.

ALVES, E. J. (1999). **A cultura da banana: aspectos técnicos, socioeconômico e agroindustrial**, 2ª Ed., Embrapa-SPI, Brasília, 585p.

ANTONIO, G. C. (2002). **Influência da estrutura celular e da geometria da amostra na taxa de transferência de massa do processo de desidratação osmótica de Banana Nanica (*Musa cavendishi*) e de Mamão Formosa (*Carica papaya* L.)**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 105p.

AOAC (1997), **Official Methods of Analysis**, Association of Official Analytical Chemists, Washington.

ARAÚJO, E. A. F. (2000). **Estudo da cinética de secagem de fatias de banana nanica (M*usa acuminata* var. *Cavendish*) osmoticamente desidratadas**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, SP, 87 p.

ARIAS, P.; DANKERS C.; LIU P. & PILKAUSKAS, P. (2003). **The world banana economy**, 1985-2002. Série: FAO Commodity Studies – 1, 97p.

BARBOSA-CANOVAS, G. V. & VEGAS-MERCADO, H. (1996). **Dehydration of foods**. Chapman & Hall, New York, 330p.

BEAUDRY, C.; RAGHAVAN, G. S. V & RENNIE, T. J.(2003). Microwave Finish Drying of Osmotically Dehydrated Cranberries. **Drying Technology**, v. 21, n. 9, pp. 1797–1810.

BEAUDRY, C.; RAGHAVAN, G. S. V, RATTI, C. & RENNIE, T. J.(2004). Effect of four methods on the quality of osmotically dehydrated cranberries. **Drying Technology**, v. 22, n. 3, p. 521-539.

BERTELI, M.N. (2005). Estudo comparativo de processos de secagem de sólidos granulados com e sem assistência de microondas. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, SP, 87 p.114.

BITTENCOURT, J. (2001). **Avaliação de um secador de banana tipo cabine com bandejas**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, SP, 75 p.

BITTENCOURT, J; QUEIROZ, M. R. de & NEBRA, S.A. (2004). Avaliação econômica da elaboração de banana-passa proveniente de cultivo orgânico e convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, potência 473-483.

CAMPOS, M.S., (1986). **Influencia da energia de microondas na qualidade tecnológica do trigo**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, UNICAMP, Campinas, SP, 120 p.

CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A.B. (1994). **Pós-colheita de frutos e hortaliças**: **fisiologia e manuseio**. Lavras: ESAL-FAEPE, 320 p.

CRANK, J.(1975). **The Mathematics of Diffusion**, 2ª ed. S.I Claredon Press Oxford, 414p.

CONFORTI, E & TEJO, R. T. (1976). **Desenvolvimento de um forno a microondas para fins domésticos e comerciais**. Convenio MIC-STI Atecil, Projeto 15.02.01, Relatório final.

DANDAMRONGRAK, R.; YOUNG, G. & MASON, R. (2002). Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. **Journal of Food Engineering,** v.55, p.139-146.

DANTAS, J.L.L.; SOARES FILHO, W. S. (1995). Classificação botânica, origem e evolução. In: ALVES et al. (Eds), **Banana para exportação**: aspectos técnicos da produção. Cruz das Almas: MAARA-SDR-BA/EMBRAPA-SPI; p.9-13. (FRUPEX. Publicações Técnicas, 18).

DATTA, A. & ANANTHESWARAN, R. C. (2001). **Handbook of microwave technology for food aplications**, Marcel Dekker Inc., Nova York, 511p.

DE LOS REYES, R.; HEREDIA, A.; FITO, P.; DE LOS REYES, E. & ANDRÉS, S.(2007) Dielectric spectroscopy of osmotic solutions and osmotically dehydrated tomato products, **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 1218-1225.

DECAREAU, R.V. & PETERSON, R.A. (1986). **Microwave processing and engineering**. Chichester : Ellis Horwood, 224 p.

DEMIREL, D. & TURHAN, M. (2003). Air drying behaviour of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices, **Journal of Food Engineering,** v.59, p.1-11.

DIBBEN, D. (2001). Eletromagnetics: Fundamental aspects and numerical modeling. In: DATTA, A. & ANANTHESWARAN, R. C. (Ed), **Handbook of microwave technology for food aplications**, Marcel Dekker Inc., Nova York, 511p.

DROUZAS, A. E. & SCHUBERT, H. (1996). Microwave application in vacuum drying of fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 28, n.2, p.203–209.

EL-AOUAR, A. A. (2005). **Estudo do processo de secagem de mamão formosa (*Carica papaya* L.) fresco e pré-tratado osmoticament**e. Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, SP, 215 p.

ENGELDER, D. & BUFFLER, C. 1991. Measuring dielectric properties of food products at microwave frequencies. **Microwave World**, v.12, 2, p.6-15.

ERLE, U. & SCHUBERT, H. (2001). Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries. **Journal of Food Engineering**, v. 49, n.2–3, p.193–199.

ERLE, U. (2005). **The microwave processing of foods**. Cap. 8: Drying using microwave processing. Editado por Helmar Shubert e Marc Regier, CRC Press LLC, Flórida, EUA.

FAO. Food Agriculture Organization: crops and livestock primary and processed. Disponível em:<http.fao.org> Acesso em 12 de março de 2007.

FENG, H. & TANG, J., (1998). Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. **Journal of Food Science**, v. 63, p.679-683.

FERNANDES, F.A.N; RODRIGUES, S.; GASPARETO, O.C.P. & OLIVEIRA, E.L. (2005), Optimization of osmotic dehydration of bananas followed by air-drying. Journal of Food Engineering, v. , p.

FUMAGALLI, F. & SILVEIRA, M. (2005). Quality evaluation of microwave-dried Packham's Thriumph pear. **Drying Technology**, v. 23, p. 2215-2226.

FUMAGALLI, F. (2003). **Secagem de Pêra em secador a microondas**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 130 p.

FUNEBO, T & OHLSSON, T. (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. **Journal of Food Engineering**, v. 38 n. 3, p.353–367.

GARCIA, R.; LEAL, F. & ROLZ, C., (1988). Drying of bananas using microwave and air ovens. **International Journal of Food Science and Technology**, v.23, p.73-80.

HENG, K.; GUILBERT, S. & CUQ, J.L. (1990). Osmotic dehydration of papaya: influence of process variables on the product quality. **Sciences des Aliments**, v. 10, n. 4, p. 831-848.

HEREDIA, A.; BARRERA, C. & ANDRÉS, A. (2007). Drying of cherry tomato by a combination of different dehydration techniques. Comparison of kinectics and other related properties. **Journal of Food Engineering,** v.80, p.111-118.

IEC – International Electrotechnical Commission (2004). **International Standard: Household microwave ovens – Methods for measuring performance**, Edition 3.1, Switzerland, 17.

JANNOT, Y; TALLA, A.; NGANHOU, J & PUIGGALI, J-R (2004). Modelling of banana convective drying by the characteristic curve (DCC) method. **Drying Technology**, v. 22, n. 8, p. 1949-1968.

JONES, P.L. (1986). High frequency dielectric heating in paper making. **Drying Technology**, v.4, 2, p.103-107.

JUMAH, R. Y. & RAGHAVAN, G. S. V. (2001). Analysis of heat and mass tranfer during combined microwave-convective spouted-bed drying. **Drying Technology**, v. 19, n. 3 e 4, p. 485-506.

KHRAISHEH, M.A.M.; COOPER, T.J.R. & MAGEE, T.R.A., (1997a). Microwave air drying. Fundamental considerations and assumptions for the simplified thermal calculations of volumetric absorption. **Journal of Food Engineering**, v. 33, p. 207-219.

KHRAISHEH, M.A.M.; COOPER, T.J.R. & MAGEE, T.R.A., (1997b). Shrinkage characteristics of potatoes dehydrated under combined microwave and convective air conditions. **Drying Technology International**, v.15, p.1003-1022.

KHRAISHEH, M.A.M.; McMINN, W. A. M. & MAGEE, T.R.A., (2004). Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying, **Food Research International**, v. 37, p. 497-503.

KOWALSKI, S.J. & RYBICKI, A. (2006). Thermomechanical model of combined convective and microwave drying. **Proceedings of the 15th International Drying Symposium (IDS 2006)**, Hungria, v. A, p.279-286.

KROKIDA, M.K.;KIRANOUDIS, C.T.; MAROULIS, Z.B. & MARINOS-KOURIS, D., (2000). Drying related properties of apple. **Drying Technology**, v.18, 6, p.1251-1257.

LAZARIDES, H. N., GEKAS, V & MAVROUDIS, N. (1997). Apparent mass diffusivities in fruit and vegetable tissues undergoing osmotic processing. **Journal of Food Engineering**, v.31, n. 3, p.315-324.

LIMA, A. G. B.; QUEIROZ, M. R. & NEBRA, S. A. (2002). Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration. **Chemical Engineering Journal**, v. 86, p. 85-93.

LIN, T. M.; DURANCE, T. D. & SCAMAN, C. H. (1998), Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices, **Food Research International**, v. 31, n. 2, p. 111–117.

MARSAIOLI JR., A. (2004). Estudo Comparativo da Conservação de Castanha do Brasil (bertholletia excelsa) Seca por Microondas e Convencionalmente. **Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 22, n. 2, p. 387-404.

MARSAIOLI, Jr. A. (1991). **Desenvolvimento da tecnologia de aplicação de microondas em secador cilíndrico-rotativo combinado com ar quente para produtos granulados**. Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, SP, 197 p.

MARSAIOLI, Jr. A., (2001). **Tecnologia das microondas no processamento de alimentos**. Apostila de aula da disciplina TP 331. Faculdade de Engenharia de Alimentos, INICAMP, Campinas, SP, 249p.

MASKAN, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. **Journal of Food Engineering**, v. 44, n. 2, p. 71–78.

MATSUURA, F.C.A.U. (1999). Avaliação sensorial dos frutos de híbridos de bananeira da cultivar Prata Anã. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.21, n.1, p.29-31.

MATSUURA, F.C.A.U.; CARDOSO, R.L.; RIBEIRO, D.E. (2002). Qualidade sensorial de frutos de híbridos de bananeira cultivar Pacovan. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.263-266.

MATTHIESEN, M. L. & BOTEON, M. (2003). Análise dos prinicipais polos proditores de banana no Brasil. Revista Hortifuti Brasil, CEPEA/USP/ESALQ, Piracicaba, agosto, 2003.

MAURO, M. A. & MENEGALLI, F. C. (1995). Evaluation of diffusion coefficients in osmotic concentration of bananas (*Musa Cavendish* Lambert). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 30, p. 199-213.

MAYOR, L. & SERENO, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering,** v.61, p.373-386.

MAZZA, G. & LEMAGUER, M., (1980). Dehydration of carrots: effects of pré-drying treatments on moisture transport and product quality. **Journal of Food Technology**, v. 18, p. 113-123.

MEDINA, J. C.; GARCIA, J. L. M.; KATO, K.; DE MARTIN, Z. J.; VIEIRA, L. F. & RENESTO, O. V. (1985). **Banana – Da cultura ao processamento e comercialização**. Série Frutas Tropicais 6 – Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas.

METAXAS, A. C. & MEREDITH, R. J. (1983). **Industrial Microwave Heating**, 1 ed., Peter Peregrinus, Londres, 357p.

MOTA, R.V.; LAJOLO, F.M. & CORDENUNSI, B.R. (1997) Composição em carboidratos de algumas cultivares de banana (*Musa* spp.) durante o amadurecimento. **Ciência e Tecnologia de Alimentos,** Campinas, v.17, n.2 p.94-97.

MOTA, R.V.; LAJOLO, F.M.; CIACCO, C. & CORDENUNSI, B.R. (2000). Composional and functional properties of banana flour from different varieties. **Starch**, v. 52, p. 63-68.

MUDGETT, R. E. (1986). Microwave properties and heating characteristics of foods. **Food Technology**, v. 40, n. 6, p. 84-93.

MUI; W. W. Y.; DURANCE, T. D. & SCAMAN, C. H. (2002). Flzvour and texture of banan chips dried by combinations of hot air, vacuum and microwave processing. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, p. 1883-1889.

NGUYEN, M-H & PRICE, W. E. (2007). Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. **Journal of Food Engineering,** v.79, p.200-207.

NIJHUIS, H.H.; TORRINGA, H.M.; MURESAN, S.; YUKSEL, D.; LEGUIJT, C. & KLOEK, W., (1998). Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. **Trends in Food Science &Technology**, v. 9, p.13-20.

OHLSSON, T. & RISMAN, P. O. (1978). Temperature distributions of microwave heating-spheres and cylinders. **Journal of Microwave Power**, v. 13, n. 4, p. 303-310.

PANADÉS, G,; CHIRALT, A.; FITO, P.; RODRÍGUEZ, I.; NUÑEZ, M.; ALBORS, A. & JIMÉNEZ, R., (2003). Influence of operating conditions on sensory quality of minimally processed osmotically dehydrated guava. **Journal of Food Quality**, v. 26, p.91-103.

PARK, K. J. (2001). **Secagem de produtos agrícolas**. Guarapuava, Paraná, 122p.

PIOTROWSKI, D.; LENART, A.; WARDZYNSKI, A., (2004). Influence of osmotic dehydration on microwave-convective drying of frozen strawberries. **Journal of Food Engineering**, v.65, n.4, p. 519-525.

PONNE, C. T. & BARTELS, P. V. (1995). Interaction of electromagnetic energy with biological material – relation to food processing. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 45, n. 4, p. 591-607.

PRABHANJAN, D.G.; RAMASWAMY, H.S. & RAGHAVAN, G.S.V. (1995). Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. **Journal of Food Engineering**, v.25, p.283-293.

QUEIROZ, M. R. & NEBRA, S. A. (2001). Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. **Journal of Food Engineering**, v.47, p.127-132.

RAGHAVAN, G. S. V. & SILVEIRA A. M. (2001). Shrinkage characteristics of strawberries osmotically dehydrated in combination with microwave drying. **Drying Technology**, 19(2), p. 405-414.

RAOULT-WACK, A.; RIOS, G.; SAUREL, R.; GIROUX, F. & GUILBERT, S., (1994). Modeling of dewatering and impregnation soaking process (Osmotic Dehydration). **Food Research International**, v.27, p.207-209.

RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S.; NIRANJAN,K. & KNORR, D.(2002). Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. **Trends in Food Science & Technology**, v. 13, p. 48-59.

REMMEN, H. H. J.; PONNE, C. T.; NIJHUIS, H. H.; BARTELS, P. V. & KERKHOF, P. J. A. M. (1996). Microwave heating distribution in slabs, spheres and cylinders with relation to food processing. **Journal of Food Science**, v. 61, n. 6, p. 1105-1113.

REN, G. & CHEN, F., (1998). Drying of American ginseng (*Panax quinquefolium*) roots by microwave-hot air combination. **Journal of Food Engineering**, v.35, p.433-443.

RUÍZ DIAZ, G.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J., FITO, P. & CHIRALT, A. (2003). Modelling of dehydration-rehydration oranges slices in combined microwave/air drying. **Innovative Food Sciences and Emerging technologies**, v. 4, p. 203-209.

RYYNÄNEN, S.; RISMAN, P. O. & OHLSSON, T. (2004) Hamburguer composition and microwave heating uniformity. **Journal of Food Science**: Food Engineering and Physical Properties, v. 69, n. 7, p. 187-196.

SACCHETTI, G, GIANOTTI, A. & DALLA ROSA, M. (2001). Sucrose–salt combined effects on mass transfer kinetics and product acceptability. Study on apple osmotic treatments. **Journal of Food Engineering**, v.49, n.2-3, p.163-173.

SACHAROW, S. & SCHIFFMANN, R. (1992). **Microwave Packanging**. Pira International, UK, 155p.

SANKAT, C. K.; CASTAIGNE, F. & MAHARAJ, R. (1996). The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. **International Journal of Food Science and Technology**, v.31, p.123–135.

SENISE, J.T., (1985). A utilização de rádio freqüência e microondas na eletrônica industrial. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v.8, 1, p.51-61.

SILVA, F. A. (2002). Aplicação de microondas no processo de beneficiamento da Castanha do Brasil. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, SP, 93 p.

SILVA, F. A.; MÁXIMO, G. J.; MARSAIOLI JR., A.; GONÇALVES, L. A. G & SILVA, M. A. A. P. da (2006). Microwave Assisted Drying of Macadamia Nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 77, p. 550-558.

SILVA, S.O. (1995). Cultivares de banana para exportação. In: ALVES et al. (eds.), **Banana para exportação**: aspectos técnicos da produção. Cruz das Almas: MAARA-SDR-BA/EMBRAPA-SPI, . p.13-18. (FRUPEX. Publicações Técnicas, 18).

SILVEIRA, E. T. F.; TRAVAGLINI, D. A.; AGUIRRE, J. M.; MORI, E. E. M. & FIGUEIREDO, I. B., 1984. **Secagem de ameixa cultivar carmesim: II efeito da pré-secagem osmótica nas características organolépticas do produto final**. Boletim ITAL, Campinas, v. 21, n. 2, p. 239-256.

SINGH, R. P. & HELDMAN, D. R. (2001). **Introduction to Foo Engineering**, 3th ed., Academic Press, Inc., 659p.

SKILIUTAS, A. R., 2002. **Estudo do desenvolvimento de barra dietética de cereais e goiaba desidratada pelo processo de osmose à vácuo com utilização de frutooligossacarídeo**. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia de Alimentos, Unicamp, Campinas, SP, 116 p.

SOUSA, W. A., (2002). **Secagem de bananas utilizando microondas**. Tese de Doutorado Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, SP. , 200p.

SOUSA, W. A.; MARSAIOLI JR, A. & RODRIGUES, M**.** I. (2004). Optimizing a microwave assisted banana drying process. **Proceedings of the 14th International Drying Symposium**. Silva, M. A. & Rocha, S. C. S. (Ed.), São Paulo, Brazil, vol.C, 1938-1945.

SOUSA, W. A.; PITOMBO, R. M. N.; DA SILVA, M. A. A. P. & MARSAIOLI Jr, A. (2006). Sensory evaluation of dried bananas obtained from air dehydration assisted by microwaves. **Advances in Microwave and Radio Frequency Processing.** 8th International Conference on Microwave and High-Frequency Heating. Willert-Porada, M. (Ed.), Bayreuth, Germany, p. 289-302.

STRUMILO, C. & KUDRA, T. (1986). **Drying: principles appications and design**. Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland, v. 3, 448p.

TACO (2006). **Tabela brasileira de composição de alimentos**. NEPA – Núcleo de estudos e pesquisas em alimentos, Gráfica e editora Flamboyant Ltda, Campinas, 44p.

THOSTENSON, E. T. & CHOU, T. –W., 1999. Microwave processing: fundamentals and applications. **Composites, Part A: Applied science and manufacturing**, v. 30, p. 1055-1071.

TORREGIANNI, D. (1993). Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. **Food Research International: Applied Technology**, v. 26, p. 59-68.

TORRINGA, E.; ESVELD, E. SCHEEWE, I. BERG, R. van der; BARTELS, P. (2001). Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms, **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 185-191.

TULASIDAS, T.N.; RAGHAVAN, G.S.V. & NORRIS, E.R., (1996). Effects of dipping and washing pre-treatments on microwave drying of grapes. **Journal of Food Process Engineering**, v. 19, p.15-25.

VARITH, J.; DIJKANARUKKUL, P.; ACHARIYAVIRIYA, A. & ACHARIYAVIRIYA, S. (2007). Combined microwave-hot air drying of peeled longan, **Journal of Food Engineering**, v. 81, p. 459-468.

VENKATACHALAPATHY, K. & RAGHAVAN, G. S. V. (1997). Microwave drying of osmotically dehydrated blueberries. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy,** v. 33, n. 2, p.95–102.

WALLACE, B. & VAN ARSDEL, B.S., 1964. Introduction to drying and driers. **Food Dehydration**. London: The Avi Publishing Company , INC., p. 1-131, Products and Technology, 2.

WANG, J. & XI, Y. S. (2005). Drying characteristics and quality of carrot using a two-stage microwave process. **Journal of Food Engineering**, v. 68, p. 505-511.

WANG, Z.; SUN, J.; CHEN,F.; LIAO, X. & HU, X. (2007). Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. **Journal of Food Engineering,** v.80, p.536-544.

YANG, H. W. & GUNASEKARAN, S. (2004). Comparison of temperature distribution in model food cylinders based on Maxwell's equation and Lambert's law during pulsed microwave heating. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 4, p. 445-453.

YONGSAWATDIGUL, J. & GUNASEKARAN, S., 1996. Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 20, potência 145-156.

APÊNDICE I – CONDIÇÕES DA CALIBRAÇÃO E DE OPERAÇÃO DO ANALISADOR DE UMIDADE SMART 5

Tabela A 1 - Condições de operação calibradas para a análise de umidade de banana no medidor de umidade a microondas SMART 5 (CEM)

Parâmetros	Valores
T(°C)	90
Potência (%)	90
limite	0,1mg/30segundos
tempo máx (min)	40

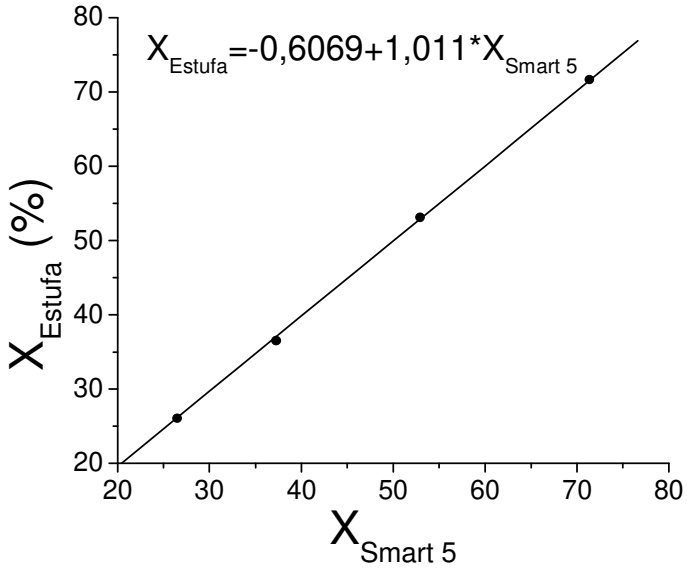


Figura A 1 – Curva de calibração de umidade medida pelo equipamento de acordo com o método 934.06 (AOAC, 1997).

APÊNDICE II - DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE SECAGEM REFERENTES AO CAPÍTULO 4

Tabela A 2 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana *in natura* secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 95W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)
0	2,64	1,00	0,7257	0,0214	0,25
10	2,43	0,92	0,7085	0,0232	0,26
20	2,18	0,82	0,6856	0,0225	0,28
30	1,98	0,75	0,6646	0,0192	0,30
40	1,80	0,68	0,6425	0,0173	0,32
60	1,46	0,55	0,5938	0,0160	0,37
80	1,16	0,44	0,5368	0,0147	0,42
100	0,87	0,33	0,4665	0,0131	0,48
112	0,74	0,28	0,4255		0,52

Tabela A 3 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana *in natura* secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 188W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)
0	2,73	1,00	0,7319	0,0333	0,50
10	2,40	0,88	0,7056	0,0351	0,55
20	2,03	0,74	0,6698	0,0359	0,62
30	1,68	0,61	0,6266	0,0324	0,70
40	1,38	0,51	0,5798	0,0285	0,78
50	1,11	0,41	0,5255	0,0258	0,89
70	0,60	0,22	0,3766		1,16

Tabela A 4 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana *in natura* secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 188W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)
0	2,516669	1	0,72	0,0440	0,189259
10	2,077042	0,825314	0,68	0,0444	0,195465
20	1,628068	0,646914	0,619492	0,0421	0,202238
30	1,235172	0,490797	0,552607	0,0341	0,208562
40	0,946834	0,376225	0,486345	0,0314	0,213461
45	0,764798	0,303893	0,433363	0,0316	0,216674
50	0,630543	0,250547	0,386707		0,219106

Tabela A 5 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 95W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)
0	2,18	1,00	0,6855	0,0147	0,260417
10	2,03	0,93	0,6703	0,0178	0,273
20	1,82	0,84	0,6459	0,0191	0,293169
30	1,65	0,76	0,6228	0,0163	0,312305
40	1,50	0,69	0,5998	0,0146	0,331345
50	1,36	0,62	0,5763	0,0136	0,350877
60	1,23	0,56	0,5510	0,0119	0,371747
80	1,00	0,46	0,5010	0,0110	0,413223
100	0,79	0,36	0,4401	0,0101	0,463607
120	0,60	0,27	0,3743		0,518135

Tabela A 6 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 188W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)
0	2,33	1,00	0,6993	0,0242	0,487567
10	2,08	0,90	0,6757	0,0273	0,525901
20	1,78	0,77	0,6402	0,0283	0,583431
30	1,52	0,65	0,6029	0,0250	0,643915
40	1,28	0,55	0,5614	0,0227	0,711238
50	1,06	0,46	0,5157	0,0204	0,785238
60	0,87	0,37	0,4658	0,0172	0,866176
80	0,55	0,24	0,3542		1,04712

Tabela A 7 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 188W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)
0	1,94	1,00	0,6598	0,0284	0,75
10	1,66	0,85	0,6234	0,0306	0,83
20	1,33	0,68	0,5705	0,0309	0,95
30	1,04	0,53	0,5092	0,0281	1,09
40	0,77	0,39	0,4336	0,0262	1,26
45	0,64	0,33	0,3919	0,0234	1,35
48	0,58	0,30	0,3666		1,40

Tabela A 8 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 150 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 95W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)	
0	1,725538	1	0,6331	0,0126	0,248139	0,639088
10	1,599068	0,926707	0,615247	0,014947	0,260213	0,592247
20	1,426608	0,826761	0,587902	0,015386	0,278707	0,528373
30	1,291346	0,748373	0,563575	0,012681	0,295159	0,478276
40	1,172991	0,679783	0,539805	0,011024	0,311236	0,434441
50	1,070868	0,620599	0,517111	0,009976	0,326584	0,396618
60	0,973479	0,56416	0,493281	0,009705	0,3427	0,360548
70	0,876766	0,508112	0,467169	0,009215	0,36036	0,324728
80	0,789184	0,457355	0,441086	0,008623	0,378	0,29229
90	0,704307	0,408166	0,413251	0,008099	0,396825	0,260854
100	0,627207	0,363485	0,38545			0,232299

Tabela A 9 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 150 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 188W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)
0	1,77	1,00	0,6390	0,0213	0,49
10	1,56	0,88	0,6089	0,0223	0,54
20	1,32	0,75	0,5698	0,0215	0,59
30	1,13	0,64	0,5298	0,0188	0,64
40	0,95	0,54	0,4866	0,0168	0,70
50	0,79	0,45	0,4417	0,0151	0,77
60	0,65	0,36	0,3925		0,83

Tabela A 10- Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 150 minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 279W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)
0	1,62	1,00	0,6176	0,0304	0,81
10	1,31	0,81	0,5673	0,0289	0,92
20	1,04	0,64	0,5092	0,0244	1,04
30	0,82	0,51	0,4512	0,0194	1,17
40	0,65	0,40	0,3936	0,0184	1,29
43	0,58	0,36	0,3683	0,0184	1,34

APÊNDICE III - Dados experimentais da cinética de secagem referentes ao Capítulo 5

Tabela A 11 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 279W e o período final a 73W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)
0	1,82	1,00	0,65	0,0315	0,78
5	1,77	0,97	0,64	0,0357	0,80
7	1,73	0,95	0,63	0,0315	0,81
10	1,51	0,83	0,60	0,0219	0,87
20	1,24	0,68	0,55	0,0236	0,98
30	1,00	0,55	0,51	0,0170	1,09
43	0,78	0,43	0,44	0,0157	1,23
57	0,56	0,31	0,35	0,0094	0,37
67	0,47	0,26	0,31	0,0024	0,39
77	0,44	0,24	0,30	0,0039	0,39
87	0,40	0,22	0,28	0,0023	0,41
104	0,37	0,20	0,27	0,0052	0,42
107	0,35	0,19	0,26	0,0039	0,43
117	0,31	0,17	0,24	0,0016	0,44
127	0,29	0,16	0,23	0,0031	0,44
137	0,26	0,14	0,21	0,0016	0,46
147	0,25	0,14	0,20	0,0039	0,46
157	0,21	0,11	0,18	0,0039	0,48
167	0,17	0,09	0,14		0,49

Tabela A 12- Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 279W e o período final a 95W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)
0	2,19	1,00	0,6868	0,0403	0,72
10	1,79	0,82	0,6416	0,0398	0,82
20	1,40	0,64	0,5829	0,0360	0,95
30	1,07	0,49	0,5169	0,0291	1,10
40	0,82	0,37	0,4493	0,0277	1,25
43	0,71	0,32	0,4151	0,0164	1,33
53	0,60	0,28	0,3762	0,0082	0,48
63	0,55	0,25	0,3531	0,0086	0,50
73	0,43	0,20	0,3013	0,0074	0,54
83	0,40	0,181	0,2849	0,0025	0,55
93	0,38	0,174	0,2765	0,0061	0,56
103	0,28	0,126	0,2161	0,0061	0,61
113	0,26	0,118	0,2059	0,0045	0,62
123	0,19	0,085	0,1565		0,66

Tabela A 13 - Dados experimentais da cinética de secagem de fatias de banana pré-desidratadas por 60minutos em solução de sacarose e secas com aplicação de microondas durante o período inicial a 279W e o período final a 188W e ar a 70°C

tempo (min)	Xbs	X/Xo	Xbu	dX/dt	DP (W/g)
0	1,94	1,00	0,6597	0,0381	0,723173
2	1,86	0,96	0,6507	0,0355	0,742416
5	1,76	0,91	0,6372	0,0109	0,771144
12	1,68	0,87	0,6268	0,0419	0,793064
20	1,34	0,69	0,5735	0,0338	0,906433
36	0,80	0,41	0,4456	0,0165	1,178209
42	0,70	0,36	0,4134	0,0343	1,246649
44	0,64	0,33	0,3889	0,0152	1,298883
46	0,61	0,31	0,3773	0,0008	0,891841
56	0,60	0,31	0,3743	0,0107	0,896092
66	0,49	0,25	0,3295	0,0168	0,960163
76	0,32	0,17	0,2447	0,0066	1,081703
91	0,22	0,12	0,1836		1,169154
96	0,22	0,12	0,1836	0,0178	1,169154
99	0,17	0,09	0,1465		1,222367

Apêndice IV – Publicações resultantes do trabalho

Os dados obtidos neste trabalho resultaram nas seguintes publicações:

PEREIRA, Nádia Rosa; MARSAIOLI, Antonio & AHRNÉ, Lilia M. (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. **Journal of Food Engineering**, v. 81, n. 1,p. 79-87.

PEREIRA, Nádia Rosa ; MARSAIOLI JÚNIOR, Antonio ; AHRNÉ, Lilia. (2006). Effect of sugar uptake from osmotic dehydration on the subsequent combined hot air and microwave drying of banana.. In: 15th International Drying Symposium, 2006, Budapeste. **Proceedings of the 15th International Drying Symposium**. Gödöllö: Szent István University Publisher, v. C. p. 1329-1333.