

ESTUDO DO FENÔMENO DE ENCOLHIMENTO NA SECAGEM  
CONVECTIVA DE ABACAXI COM APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS

**FRANCEMIR JOSÉ LOPES**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
FEVEREIRO - 2013

ESTUDO DO FENÔMENO DE ENCOLHIMENTO NA SECAGEM  
CONVECTIVA DE ABACAXI COM APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS

**FRANCEMIR JOSÉ LOPES**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Nádia Rosa Pereira– UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FEVEREIRO – 2013

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCTA / UENF 039/2013

Lopes, Francemir José

Estudo do fenômeno de encolhimento na secagem convectiva de abacaxi com aplicação de micro-ondas / Francemir José Lopes. – 2013.

147 f. : il.

Orientador: Nádia Rosa Pereira.

Dissertação (Mestrado - Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2013.

Bibliografia: f. 129 – 136.

1. Micro-ondas variável 2. Produto seco 3. Cinética de encolhimento 4. Capacidade de reidratação I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. II. Título.

CDD – 664.84

# ESTUDO DO FENÔMENO DE ENCOLHIMENTO NA SECAGEM CONVECTIVA DE ABACAXI COM APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS

**FRANCEMIR JOSÉ LOPES**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Aprovado em 22 de fevereiro de 2013.

Comissão Avaliadora:



---

Dr. Antonio Marsaioli Junior (D.Sc., Engenharia de Alimentos) – ITAL e  
FEQ/UNICAMP



---

Dr<sup>a</sup>. Michele Nehemy Berteli (D.Sc., Engenharia de Alimentos) - ITAL



---

Prof<sup>a</sup>. Karla Silva Ferreira (D.Sc., Ciência e Tecnologia de alimentos) - UENF



---

Prof<sup>a</sup>. Nádia Rosa Pereira (D.Sc., Engenharia de Alimentos)– UENF

Orientadora

Dedico aos meus pais  
Francisco e Francisca pelo amor  
eterno, ensinamentos e esforços  
realizados para que eu  
continuasse estudando.

“E você aprende que realmente pode  
suportar, que realmente é forte, e que pode ir  
muito mais longe depois de pensar que não  
se pode mais.”

(William Shakespeare)

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela vida e por iluminar meu caminho;

À minha orientadora Prof<sup>a</sup> . Dr<sup>a</sup> . Nádia Rosa Pereira pela valiosa orientação, amizade e pelo conhecimento compartilhado durante a realização deste trabalho;

Ao CNPq pelo apoio financeiro;

À Prof<sup>a</sup> Dra. Karla pelo empréstimo do laboratório de análise de alimentos e das dependências;

À Prof<sup>a</sup> Selma Bergara, à Prof<sup>a</sup> Daniela e ao Prof. Victor pela boa convivência;

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Antonio Marsaioli Junior, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Michele Nehemy Berteli e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Karla silva Ferreira, pelas correções e valiosas sugestões visando à melhoria deste trabalho;

A Keila por todo amor, confiança e acima de tudo pelo incentivo, você é simplesmente incrível;

Aos meus amigos de laboratório, Pollyane, Lara, Carmozene, Ana Luiza e Thiago pela companhia, colaboração e pelos momentos de descontração;

Aos docentes e funcionários do Laboratório de Tecnologia de Alimentos (CCTA/LTA);

À técnica Valdinéia pela amizade e carinho;

Aos meus irmãos, Franciano, Franceline e Pablo por tornarem meus finais de semana mais divertidos;

Às minhas cunhadas Keise, Daniele e Daniela e ao cunhado Leandro Donda e aos queridos sobrinhos Paulo Henrique, Rafael e Sara pelas risadas. Ao Milton e a Rosilda pela amizade;

Aos meninos da república, Jefferson, André e Jacinto (Nice) pela convivência nestes dois anos;

Aos amigos dos laboratórios vizinhos Geraldo, Diana, Renê, Juliana Barreto, Patrícia, Luiz Fernando, Dandara, João Batista, Simone, Clara, Isabela, Suelen, Manuela, Nayara, Lorena, Rodrigo, Natalia, Ana Silvia que sempre souberam fazer do LTA um ambiente agradável e aconchegante para se trabalhar;

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) pela oportunidade;

A todos os demais que, de alguma forma, contribuíram com este trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	x
APÊNDICES .....	xvi
LISTA DE ABREVIACÕES.....	xvii
RESUMO .....	xix
ABSTRACT .....	xxi
1. INTRODUÇÃO .....	23
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	26
2.1. Abacaxi .....	26
2.2. Micro-ondas .....	28
2.3. Propriedades dielétricas.....	31
2.4. Secagem.....	33
2.4.1. Secagem com a utilização de micro-ondas .....	37
2.4.2. Secagem de abacaxi .....	41
2.4.3. Modelagem na cinética de secagem .....	42
2.5. Encolhimento .....	44
2.5.1. Modelagem do encolhimento .....	48
2.6. Isoterma de sorção .....	50
2.7. Objetivos .....	51
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	53
3.1. Caracterização da matéria-prima e dos produtos .....	54
3.1.1. Determinação do teor de umidade .....	54

3.1.2.	Atividade de água (Aw) .....	55
3.1.3.	Sólidos Solúveis Totais (SST) .....	55
3.1.4.	pH.....	55
3.2.	Volume aparente (Vap) e Encolhimento .....	56
3.3.	Porosidade.....	58
3.4.	Cinética de encolhimento na secagem de abacaxi .....	58
3.5.	Capacidade de reidratação (CR) .....	59
3.6.	Análises estatísticas.....	59
3.7.	Isotermas de sorção.....	59
3.8.	Secagem assistida por micro-ondas .....	61
3.8.1.	Forno de micro-ondas adaptado.....	61
3.8.2.	Cinética de secagem do abacaxi.....	63
3.9.	Procedimento experimental .....	64
3.9.1.	Efeito da temperatura do ar e potência de micro-ondas constante durante a secagem de pedaços de abacaxi.....	64
3.9.2.	Efeito da temperatura do ar quente e potência de micro-ondas variável durante a secagem de pedaços de abacaxi. ....	65
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	67
4.1.	Comparação das metodologias de análise de volume aparente.....	67
4.2.	Efeito da aplicação potência de micro-ondas constante e temperatura do ar na secagem.....	70
4.2.1.	Caracterização da matéria-prima .....	70
4.2.2.	Avaliação da cinética de secagem .....	71
4.2.3.	Ajuste por modelos matemáticos.....	78
4.2.4.	Cinética de encolhimento .....	81
4.2.5.	Modelagem do encolhimento na secagem dos pedaços de abacaxi.....	92
4.2.6.	Caracterização do produto seco.....	95
4.3.	Efeito da temperatura do ar quente e potência de micro-ondas variável durante a secagem de pedaços de abacaxi. ....	99
4.3.1.	Caracterização da matéria-prima .....	99
4.3.2.	Cinética de secagem .....	100
4.3.3.	Ajuste por modelos matemáticos.....	108
4.3.4.	Cinética de encolhimento .....	109

4.3.5. Modelagem do encolhimento da secagem dos pedaços de abacaxi	118
4.3.6. Caracterização do produto seco.....	120
4.3.7. Isoterma de sorção.....	122
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	124
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química média da polpa de abacaxi .....	27
Tabela 3.1 - Recomendação para preparo de soluções saturadas de sais a 25°C .....	60
Tabela 3.2 - Esquema ilustrativo das condições experimentais testadas para secagem de pedaços de abacaxi .....	66
Tabela 4.1 - Coeficiente de variação (CV%) dos volumes aparentes dos pedaços de abacaxis secos medidos pela imagem digital e deslocamento de fluidos. ....	69
Tabela 4.2- Características físicas e químicas do abacaxi <i>in natura</i> .....	70
Tabela 4.3 - Tempo final de secagem nas diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem .....	75
Tabela 4.4 - Parâmetros e coeficientes de determinação do modelo de Page .....	79
Tabela 4.5 - Parâmetros de ajuste obtidos dos modelos uniformes propostos por Suzuki <i>et al.</i> (1976) .....	92
Tabela 4.6 - Atividade de água e umidade final do abacaxi seco .....	95
Tabela 4.7 – Características físico-químicas do abacaxi <i>in natura</i> .....	99
Tabela 4.8 - Tempo final de secagem nos Períodos I e II das diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem.....	101
Tabela 4.9 - Parâmetros estimados pela equação de Page para os dados iniciais de secagem e coeficiente de determinação do modelo ajustado para todas as temperaturas e potência de micro-ondas.....	108
Tabela 4.10 - Médias do encolhimento ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi seco.....	111

Tabela 4.11- Parâmetros de ajuste obtidos do modelo uniforme proposto por Suzuki <i>et al.</i> (1976). .....	119
Tabela 4.12 - Atividade de água e umidade final do abacaxi <i>in natura</i> e seco a aproximadamente 15% de umidade.....	120
Tabela 4.13 - Teores de umidade de equilíbrio ( $X_e$ ) e atividade de água ( $a_w$ ) em diferentes soluções salinas saturadas .....	123

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Comprimento de onda (SMIT, 1998).....	29
Figura 2.2 - Diagrama de um sistema genérico de aquecimento por micro-ondas. (MARSAIOLI, 1991). .....	31
Figura 2.3 - Diagrama da migração de água no interior de um sólido.....	34
Figura 2.4 - Evolução do tempo (t), do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T) e da taxa de secagem (dX/dt), para um ar com propriedades constantes (BROD, 2003 e PARK <i>et al.</i> , 2007).....	35
Figura 2.5 - Curva Típica das isotermas de sorção.....	51
Figura 3.1 - Coloração da casca dos abacaxis utilizados nos experimentos. ....	53
Figura 3.2 - Cortador e pedaços de abacaxi fresco cortado em cilíndricos utilizados nos experimentos .....	54
Figura 3.3 - Pontos de medição da espessura ao longo da amostra de abacaxi. ....	56
Figura 3.4 - a) Imagem original dos pedaços de abacaxi <i>in natura</i> (esquerda) e depois do tratamento (direita), b) Imagem original dos pedaços de abacaxi seco (esquerda) e depois do tratamento (direita). .....	57
Figura 3.5 - Detalhes do pote com fechamento hermético.....	60
Figura 3.6 - Adaptação de forno de micro-ondas doméstico: (1) entrada de ar, (2) válvula, (3) tubo conector, (4) ventilador, (5) aquecedor elétrico, (6) Tubo flexível, (7) conector rápido, (8) controlador e indicador de temperatura, (9) Chave liga/desliga do controlador, (10) difusor de ar, (11) cavidade de micro-ondas, (12) suporte de produto, (13) janela de exaustão, (14), saída de ar, (15) ar de resfriamento do gerador de micro-ondas, (16) sensoriamento infravermelho, (17)	

prato giratório, (18) Sensor de temperatura (termopar tipo K). (Adaptado de SILVA, 2005).....	62
Figura 3.7 - Distribuição das amostras na bandeja utilizada nos experimentos....	63
Figura 4.1 - Volume aparente do abacaxi seco em micro-ondas analisados analisado pelo método de deslocamento de fluido e imagem digital em função do tempo de secagem.....	67
Figura 4.2 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) em função do tempo de secagem dos pedaços de abacaxi secos com micro-ondas e ar (70°C e 166W) analisados pelos métodos deslocamento de fluidos e imagem digital .....	68
Figura 4.3 - Umidade adimensional em função do tempo dos pedaços de abacaxi secos à temperatura fixa de 70°C nas quatro condições de potência de micro-ondas. ....	73
Figura 4.4 - Umidade adimensional em função do tempo dos pedaços de abacaxi secos à temperatura fixa de 55°C e potência de micro-ondas de 166W, 259W e 381W.....	73
Figura 4.5 - Umidade adimensional em função do tempo dos pedaços de abacaxi secos à temperatura fixa de 40°C e potência de micro-ondas de 166W, 259W e 381W.....	74
Figura 4.6 - Umidade adimensional em função do tempo dos pedaços de abacaxi secos com e sem aplicação de potência de micro-ondas e ar quente. ....	74
Figura 4.7 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem.....	75
Figura 4.8 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem até 40% de umidade (bu). ....	76
Figura 4.9 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem de 40% a 15% de umidade (bu). ....	76
Figura 4.10 - Temperatura superficial média dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem.....	78
Figura 4.11 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page para temperaturas fixas em 70°C.....	80

Figura 4.12 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page para temperaturas fixas em 55°C.....	80
Figura 4.13 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page para temperaturas fixas em 40°C.....	80
Figura 4.14 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com e sem aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page.....	81
Figura 4.15 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratado versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 70°C. ....	83
Figura 4.16 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratado versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 70°C para potências fixas a 166W.....	83
Figura 4.17 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratado versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 55°C. ....	84
Figura 4.18 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratado versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 40°C. ....	84
Figura 4.19 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratado versus umidade adimensional (bs) com e sem aplicação de energia de micro-ondas e ar quente. ....	85
Figura 4.20 - Cinética de encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo para temperaturas fixas em 70°C.....	86
Figura 4.21 - Cinética de encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo para temperaturas fixas em 55°C.....	86
Figura 4.22 - Cinética de encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo para temperaturas fixas em 40°C.....	87
Figura 4.23 - Cinética de encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo com e sem aplicação de energia de micro-ondas e ar quente. .	87
Figura 4.24 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratados em todas as condições de temperatura e potências de micro-ondas. ....	87

Figura 4.25 - Variação do volume de água removida das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de pedaços de abacaxi em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas de processo.....	89
Figura 4.26 - Variação do volume de água removida das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de pedaços de abacaxi em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas de processo.....	89
Figura 4.27 - Variação do volume de água removida das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de pedaços de abacaxi em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas de processo.....	90
Figura 4.28 - Variação da espessura (mm) e área superficial (cm <sup>2</sup> ) versus umidade adimensional (X/X <sub>0</sub> ) dos pedaços de abacaxi.....	91
Figura 4.29 - Ajuste das curvas de encolhimento dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas (0W, 166W, 259W, 381W) e ar quente pelo modelo de Suzuki <i>et al.</i> para temperaturas de 40°C, 50°C, 70°C e sem o ar de secagem.....	94
Figura 4.30 - Capacidade de reidratação e umidade do produto reidratado dos pedaços de abacaxi desidratados em todas as condições de temperatura e potências de micro-ondas.....	96
Figura 4.31 - Porosidade do abacaxi <i>in natura</i> e depois de seco.....	98
Figura 4.32 - Umidade adimensional em função do tempo de secagem dos pedaços de abacaxi nas diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar nos dois períodos da secagem.....	101
Figura 4.33 - Umidade adimensional em função do tempo de secagem dos pedaços de abacaxi nas diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar até 40% de umidade (bu).....	102
Figura 4.34 - Umidade adimensional em função do tempo de secagem dos pedaços de abacaxi nas diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de 40% até 15% de umidade (bu).....	102
Figura 4.35 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem ao longo do tempo.....	104
Figura 4.36 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem no período I (à esquerda) e período II (à direita).....	104

Figura 4.37 - Temperatura superficial média dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem ao longo do tempo de secagem.....	107
Figura 4.38 - Temperatura superficial dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem no período I (à esquerda) e período II (à direita) do processo de secagem.....	107
Figura 4.39 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page para temperaturas fixas em 70°C.....	109
Figura 4.40 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page para temperaturas fixas em 55°C.....	109
4.41 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratadas versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 70°C até 15% de umidade (bu).....	111
4.42 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratados versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 55°C até 15% de umidade (bu).....	112
Figura 4.43 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratados versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 70°C até 40% de umidade (bu).....	112
Figura 4.44 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratados versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 55°C até 40% de umidade (bu).....	112
Figura 4.45 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratados versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 70°C entre 40% e 15% de umidade (bu).....	113
Figura 4.46 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratados versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 55°C entre 40% e 15% de umidade (bu).....	113
Figura 4.47 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratados em todas as condições de temperatura e potência de micro-ondas. ....	114

Figura 4.48 - Encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo para temperaturas fixas do ar em 70°C. ....	115
Figura 4.49 - Encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo para temperaturas fixas do ar em 55°C. ....	115
Figura 4.50 - Espessura (mm) e área superficial (cm <sup>2</sup> ) versus umidade adimensional (X/X <sub>0</sub> ) dos pedaços de abacaxi desidratados. ....	117
Figura 4.51 – Dados experimentais do encolhimento da área e preditos pelo modelo proposto por Suzuki <i>et al.</i> (1976) para abacaxi seco com ar a 70°C. ....	118
Figura 4.52 - Dados experimentais do encolhimento da área e preditos pelo modelo proposto por Suzuki <i>et al.</i> (1976) para abacaxi seco com ar a 55°C. ....	118
Figura 4.53 - Capacidade de reidratação e umidade do produto reidratado dos pedaços de abacaxi secos com ar e micro-ondas para todas condições experimentais. ....	121
Figura 4.54 - Porosidade do abacaxi <i>in natura</i> e depois de seco. ....	122
Figura 4.55 - Isoterma de sorção dos pedaços de abacaxi em função da atividade de aguados sais. ....	123

## APÊNDICES

Apêndice 1 - Método de teste de medida de potência em forno de micro-ondas	134
Apêndice 2 - Potência real do forno de micro-ondas .....	135
Apêndice 3 - Dados do ajuste linear para potência de micro-ondas constante....	135
Apêndice 4 - Dados do ajuste linear para potência de micro-ondas Variáveis ....	135
Apêndice 5 - Dados experimentais da cinética de secagem com aplicação de potência de micro-ondas constante .....	136
Apêndice 6 - Dados experimentais da cinética de secagem com aplicação de potência de micro-ondas variável.....	142

**LISTA DE ABREVIações**

$A/A_0$	Área adimensional
ARQ	Princípio de Arquimedes
$A_w$	Atividade de água
bs	Base seca
bu	Base úmida
CR	Capacidade de reidratação (%)
CV	Coefficiente de Variação
$D_p$	Desvio Padrão
DP	Densidade de potência (W/g)
ID	Imagem digital
k	Constante de secagem do modelo de Page ( $m^{-1}$ )
n	Constante do Modelo de Page
P	Potência de micro-ondas (W)
PI	Período I
PII	Período II
R	Repetição
$R^2$	Coefficiente de determinação
S	Encolhimento
S/A	Sem ar quente
SST	Sólidos solúveis totais
T Amb	Temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ )
T saída M	Temperatura de Saída do micro-ondas ( $^{\circ}C$ )

Temperatura (SA)	Temperatura da superfície da amostra (°C)
UR Amb	Umidade relativa do ambiente
UR saída M	Umidade Relativa de Saída do micro-ondas
UV <sub>0</sub>	Umidade inicial medida no infravermelho
V/V <sub>0</sub>	Encolhimento volumétrico
V <sub>0</sub>	Volume aparente inicial
V <sub>f</sub>	Volume aparente final
W	Potência de micro-ondas
X/X <sub>0</sub>	Umidade adimensional
X <sub>0</sub>	Umidade inicial
X <sub>eq</sub>	Umidade de equilíbrio
X <sub>f</sub>	Umidade final

#### Letras gregas

$\varepsilon$	Porosidade
$\varepsilon^*$	Permissividade dielétrica relativa
$\varepsilon'$	Constante dielétrica relativa
$\varepsilon''$	Fator de perda relativa
$\rho$	Densidade (g/mL)
$\lambda$	Comprimento de onda

#### Subscritos

0	Referente à condição inicial
f	Referente à condição final
ap	Aparente
g	Gancho
eq	Equilíbrio

## RESUMO

LOPES, Francemir José, M.sc. Produção Vegetal. Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Fevereiro 2013. ESTUDO DO FENÔMENO DE ENCOLHIMENTO NA SECAGEM CONVECTIVA DE ABACAXI COM APLICAÇÃO DE MICRO-ONDAS. Orientadora: Prof<sup>a</sup>.Dr<sup>a</sup>. Nádia Rosa Pereira.

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de abacaxi. Entretanto, devido à alta perecibilidade da fruta, o país sofre com as perdas pós-colheita, decorrentes da sazonalidade da produção e da distância dos mercados consumidores, adicionados ainda à ausência de tratamentos e ao manuseio pós-colheita eficiente, dificultando o escoamento da produção e seu consumo *in natura*. A cultura é de grande importância para a economia brasileira, quando se verifica a possibilidade de expansão do cultivo, e sua aplicação na indústria. De modo geral, os materiais biológicos encolhem durante a secagem, e este encolhimento proporciona uma redução no custo da embalagem do produto final, facilitando seu armazenamento e transporte. No entanto, este encolhimento e as alterações estruturais ocasionadas pela secagem são fatores responsáveis pela perda de qualidade de alimentos desidratados. O conhecimento da influência das variáveis do processo de secagem sobre o encolhimento é essencial para melhorar a compreensão da cinética de secagem, bem como para a preservação da qualidade do produto. Com este objetivo a secagem dos pedaços de abacaxi foi conduzida por convecção a ar quente com aplicação de potência de micro-ondas constante e variável durante o processo. Avaliou-se a cinética de secagem,

a cinética de encolhimento e a qualidade do produto seco por meio da atividade de água, porosidade e capacidade de reidratação. Os resultados mostram que o aumento da temperatura do ar de secagem e da potência de micro-ondas proporcionou taxa de secagem maior para atingir o mesmo conteúdo de umidade, reduzindo o tempo de secagem. O encolhimento linear foi observado em todas as condições de processo. O modelo matemático de Page apresentou bom ajuste para os dados da cinética de secagem, para todas as condições e o de Suzuki *et al.* (1976) na cinética de encolhimento. A capacidade de reidratação dos pedaços de abacaxi secos não foi afetada pela escolha da condição de secagem com aplicação de micro-ondas variável ou constante nas diferentes temperaturas do ar, mas apresentou boa capacidade em absorver água. Os poros formados não foram suficientes para causarem diferenças no produto reidratado. O produto seco apresentou característica higroscópica, de acordo com a isoterma de adsorção a 25 °C, indicando cuidados na embalagem e durante seu armazenamento.

Palavra-chave: Micro-ondas variável, produto seco, cinética de encolhimento, capacidade de reidratação

## ABSTRACT

LOPES, Francemir José, M.sc. Vegetal Production. Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro. February, 2013. STUDY OF THE SHRINKAGE PHENOMENON ON MICROWAVE CONVECTIVE DRYING OF PINEAPPLE. advisor: Prof<sup>a</sup>.Dr<sup>a</sup>. Nádia Rosa Pereira.

Brazil is one of the largest world producers of pineapple. However, due to the highly perishable nature of the fruit, the country suffers from post-harvest losses, resulting from the seasonality of production and distance from consumer markets, added to the absence of treatments and an efficient post-harvest handling, hindering the outflow of production and its consumption as *in natura* fruit. The culture is of great importance to the Brazilian economy, when it is verified the possibility of expanding cultivation, and its application in industry. In general, biological materials shrink during drying, and this shrinkage promotes a reduction in the cost of packaging of the final product, favoring its storage and transportation. However this shrinkage and the structural alterations occasioned by the drying are factors responsible for loss of quality of dehydrated foods. The knowledge of the influence of process variables on drying shrinkage is essential to improve the understanding of the drying kinetics as well as for preserving product quality. Taking this as an objective drying the pineapple pieces was conducted by hot air convection with variable and constant microwave power application during the process. The drying and shrinkage kinetics as well the product quality were

evaluated in terms of water activity, porosity and rehydration. The results showed that increasing the temperature of the drying air and the microwave power provided higher drying rate to attain the same moisture content, decreasing the drying time. A linear shrinkage was observed in all process conditions. The mathematical Page model showed good fit for the data from kinetics of drying, for all conditions and the model from Suzuki et al. (1976) for the kinetics of shrinkage. The rehydration ability of dried pineapple pieces is not affected by the choice of drying condition with variable or constant microwave application at different air temperatures, but exhibited good ability to absorb water. The formed pores were not sufficient to cause differences in rehydrated product. The dried product presented hygroscopic characteristic according to the adsorption isotherm at 25 °C, indicating the need of care on packing and during storage.

Keyword: Variable microwave, dried product, shrinkage kinetics, rehydration capacity

## 1. INTRODUÇÃO

O abacaxi é um fruto de grande aceitação nos mercados interno e externo, consumido em várias partes do mundo, sendo rico em açúcares, sais minerais e vitaminas. A cultura é de grande importância para a economia brasileira, quando se verifica a possibilidade de expansão do cultivo e sua aplicação na indústria. A sazonalidade de produção dos frutos justifica a necessidade de se industrializar parte das colheitas como medida de amparo à agricultura, e visando maior disponibilidade de alimentos de alta qualidade para o mercado brasileiro e para a exportação durante a maior parte do ano.

Segundo estimativas da FAO, o Brasil é o maior produtor de abacaxi do mundo, seguido de Filipinas, Costa Rica, Tailândia e China (FAO, 2012). Atualmente no Brasil, as cultivares mais plantadas são Pérola e Smooth Cayenne.

Nas últimas décadas, muitos estudos foram realizados em relação à secagem de frutas como um método eficiente de conservação. Além disso, embora a fruta fresca seja apreciada por muitos, o seu processamento é uma forma de atender as exigências do consumidor quanto à praticidade e qualidade, além de agregar valor ao produto.

A secagem de produtos alimentícios é uma operação unitária largamente empregada com a finalidade de remover a água presente, como forma de reduzir a atividade de água ( $a_w$ ) para inibir o crescimento microbiano, evitando assim a deterioração dos mesmos. Esta remoção passou a ter grande importância na redução dos custos energéticos, de transporte, embalagem e armazenagem destes alimentos. Desta forma, a secagem possibilita o aumento da vida de

prateleira, a redução do peso e do volume dos alimentos. Também facilita o consumo e diversifica a oferta de produtos.

A aplicação de micro-ondas na secagem de produtos alimentícios, quando controlada, acelera a cinética de secagem, sendo que o produto processado pode atingir qualidade superior àquela obtida pelos métodos convencionais. Entretanto, a interação entre a energia eletromagnética de micro-ondas e os produtos é a principal meta em pesquisas sobre propriedades dielétricas. Essas propriedades determinam a quantidade de energia acoplada em um produto, sua distribuição dentro do mesmo e, por consequência, o tempo e a frequência de micro-ondas necessários para os processos que utilizam radiação como forma de transferência de calor.

De modo geral, os materiais biológicos durante a secagem encolhem e este encolhimento proporciona uma redução no custo da embalagem do produto final, facilitando seu armazenamento e transporte. No entanto, este encolhimento e as alterações estruturais ocasionadas pela secagem são fatores responsáveis pela perda de qualidade de alimentos desidratados. Dependendo do alimento e de sua aplicação, as propriedades de reidratação apresentam importância na sua aceitação sensorial e estão relacionadas ao encolhimento do material durante a secagem. Então, é de importância o estudo de encolhimento e de outras propriedades físicas como volume aparente, porosidade e capacidade de reidratação para a avaliação do processo de secagem e a qualidade do produto desidratado.

O estudo da cinética de secagem visa o conhecimento do comportamento do material ao longo do processo e a previsão do tempo de secagem, uma vez que a modelagem do processo é de importância para o desenvolvimento e a otimização dos secadores, além de possibilitar padronização do processo. O interessante em aplicar energias de micro-ondas e ar quente é tentar reduzir o tempo de processo para um determinado conteúdo de umidade, além disso, adquirir um produto poroso, que encolha menos e que tenha uma boa capacidade de reidratação

O objetivo do presente trabalho foi estudar o processo de secagem convectiva de abacaxi com aplicação de micro-ondas, avaliando as cinéticas de secagem, de encolhimento e a característica do produto final. Para isso os experimentos foram conduzidos com aplicação de potência de micro-ondas

constante e variável em dois períodos, e temperatura do ar fixa ao longo do processo de secagem.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Abacaxi

O abacaxizeiro (*Ananas comosus* L) é uma planta monocotiledônea perene, pertencente à família *Bromeliaceae* (Reinhardt, 2000). É uma das fruteiras tropicais mais cultivadas. As cultivares de abacaxi mais plantadas atualmente no Brasil são Smooth Cayenne e Pérola. A primeira variedade é encontrada apenas nos estados de São Paulo e Minas Gerais, enquanto o abacaxi Pérola é cultivado em todo o país e responsável por 74% da produção nacional, com destaque para os estados da Paraíba e Pará, que são os maiores produtores da variedade Pérola (RAMOS, 2006, VALENTE, 2007, ALMEIDA *et al.*, 2004 ).

O abacaxi apresenta grande aceitação tanto pelos consumidores brasileiros quanto pelos estrangeiros, devido a suas características físico-químicas (THÉ *et al.*, 2010). Tem sido a fruta não cítrica mais popular nos países tropicais e subtropicais, principalmente pelo seu atrativo sabor e aroma, contendo uma grande diversidade de vitaminas e sais minerais (VALENTE, 2007, ALMEIDA *et al.*, 2004).

É uma fruticultura em posição privilegiada pela sua importância não apenas no setor primário da economia, mas também na indústria e no comércio, sendo amplamente utilizadas na produção de doces cristalizados, geleias, sorvetes, cremes, gelatinas, pudins, compotas e sucos (RAMOS, 2006, GONÇALVES e CARVALHO, 2000).

No ano de 2011, no Brasil, foram produzidos 1.576.972 mil frutos de abacaxi, sendo que no centro-oeste registrou-se produção de 103.605 mil frutos, no Nordeste, 610.826 mil frutos, 452.155 mil frutos no Sudeste, 393.444 mil frutos na região Norte, e no Sul, 16.942 mil frutos. Já no ano de 2010, a produção de abacaxi foi de 1.470.391 mil frutos em todo o país. Em 2006, 1.707.088 mil frutos, e em 2001, registrou-se produção de 1.430.018 mil frutos (IBGE, 2012). Observa-se importante incremento na produção de abacaxi no país ao longo destes dez anos, ressaltando a sua representatividade econômica e comercial.

Trata-se de uma planta de clima tropical. Cresce adequadamente e apresenta melhor qualidade de fruto na faixa de temperatura de 22° a 32°C, com amplitude térmica, entre o dia e a noite, variando de 8°C a 14°C. É considerada uma planta bem adaptada aos solos ácidos, sendo a faixa de pH de 4,5 a 5,5 a mais recomendada para o seu cultivo (Reinhardt *et al.*, 2000). Compõe-se de um caule curto e grosso ao redor do qual crescem as folhas em forma de calhas estreitas e rígidas, e no qual também se inserem raízes axilares (Reinhardt, 2000). A forma do fruto é cilíndrica ou cônica, e sua massa varia entre 1 a 3 Kg (VALENTE, 2007).

Segundo BLEINROTH (1987), a variedade Pérola apresenta as seguintes características químicas, com variações segundo o estado de maturação: pH entre 3,6 a 4,15, teor de sólidos solúveis entre 11,6 e 16,2 °Brix, acidez total entre 0,35 e 0,81% (expressa em ácido cítrico), açúcares totais entre 9,73 a 15,01% e açúcares redutores entre 2,82 e 5,06%. Dos açúcares existentes, 66% são de sacarose e 34% açúcares redutores (glicose e frutose). A composição química do abacaxi está apresentada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição química média da polpa de abacaxi

Componente	Quantidade por 100g
Umidade	86,3 g
Carboidrato	12,3 g
Proteína	0,9 g
Lipídeos	0,1 g
Cálcio	22 mg
Cinzas	0,4 g
Fibras	1 g
Calorias	48 kcal

(Fonte: TACO, 2011)

A composição química das frutas varia de acordo com a época do ano em que são produzidas. A colheita de abacaxi é realizada ao longo do ano inteiro, porém a melhor safra ocorre no verão, de novembro a fevereiro, apresentando um fruto com maior teor de açúcares e menos ácido (BLEINROTH, 1987).

## 2.2. Micro-ondas

Micro-ondas são uma modalidade de radiação eletromagnética como a luz, a radiação ultravioleta, os raios-X, as ondas de televisão, rádio e a radiação infravermelho (COPSON, 1975), situada no intervalo de frequências compreendido entre 300 MHz e 300 GHz (REGIER e SCHUBERT, 2005). Graças ao seu pequeno comprimento, elas podem ser propagadas por antenas e guias de ondas de pequenas dimensões (SMIT, 1988). Em processos de aquecimento, as frequências mais utilizadas são de 915 MHz e de 2.450 MHz (comprimentos de onda de 32,8 cm e 12,5 cm, respectivamente, em espaço livre) e 5.800 MHz para processos de pequena escala. Estas frequências têm sido utilizadas para aplicações industriais, científicas e medicinais. A maioria dos fornos de micro-ondas domésticos opera a 2.450 MHz (MARSAIOLI, 1991, BARBOZA *et al.*, 2001).

Ondas eletromagnéticas são oscilações de campos elétricos e magnéticos associados que se propagam no espaço, regidas pelas equações de Maxwell (COPSON, 1975 e SMIT, 1988).

O comprimento de onda  $\lambda$ , Figura 2.1, se relaciona com a frequência de oscilação e com a velocidade de propagação pela seguinte relação:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Equação 2-1}$$

sendo:

- **Comprimento de onda ( $\lambda$ )**, a distância de um ponto de uma onda ao ponto correspondente da onda seguinte, por exemplo, de máximo positivo a máximo positivo (m),
- **Frequência de emissão ( $f$ )**, o número de ondas ou ciclos por segundos (1/ s ou Hz),
- Velocidade de propagação no vácuo ( $c$ ) =  $3 \times 10^8$  m/s

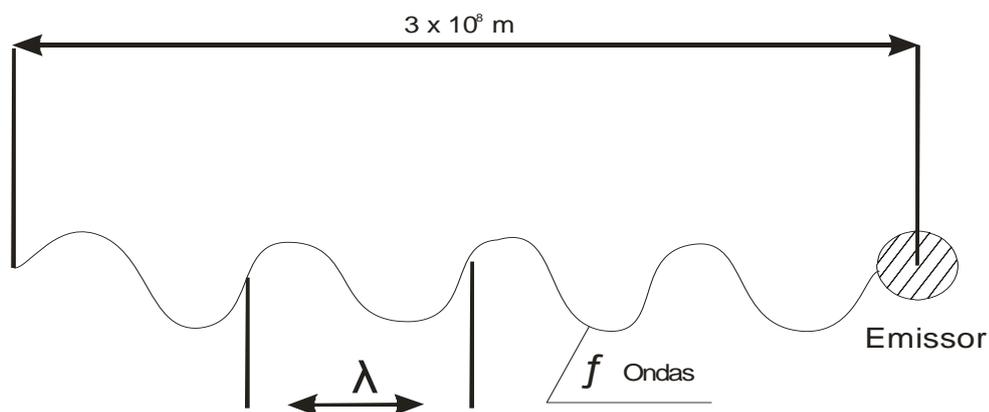


Figura 2.1 - Comprimento de onda (SMIT, 1998)

As micro-ondas são geradas por um tubo oscilador denominado "magnetron", alimentado por um circuito eletrônico capaz de converter energia elétrica de frequência industrial (60 Hz) em energia eletromagnética de micro-

ondas (por exemplo, 2.450 MHz). O campo eletromagnético se propaga na forma de onda eletromagnética no interior de um guia de onda metálico (linha de transmissão), até ser injetada no aplicador (uma cavidade com paredes metálicas onde está o produto a aquecer). A penetração e o aquecimento de alimentos em um campo de micro-ondas são praticamente instantâneos, em contraste com os métodos convencionais de aquecimento, onde o transporte de calor da superfície para o centro se dá 10 a 20 vezes mais lentamente (SILVA e MARSAIOLI, 2003, SILVA, 2005).

Marsaioli (1991) menciona um sistema genérico de micro-ondas composto por um conjunto de componentes que podem ser representados pela figura 2.2.

No guia de onda, o campo eletromagnético se propaga sob a forma de onda eletromagnética no seu interior. As seções podem ser retangulares ou circulares com dimensões dependentes do comprimento de onda. As múltiplas reflexões nas paredes do guia têm por resultante certa distribuição de campos elétricos e magnéticos no espaço interior e de correntes de condução na superfície das paredes, tendo-se campo elétrico máximo no centro do guia e caindo até zero junto às paredes. O conjunto forma um modo de propagação guiado ou em monomodo. Os acoplamentos executados mediante atenuadores e tocos permitem a transferência mais eficiente da energia de micro-ondas para o aplicador.

No aplicador, onde está o material dielétrico a ser aquecido, se passa a interação “produto – micro-ondas”. Distinguem-se dois tipos de aplicadores: em um tipo, a interação ocorrerá em um guia de onda preenchido pelo dielétrico, e em um outro, a interação ocorrerá dentro de uma cavidade. No primeiro, a propagação é monomodal. Já a distribuição do campo elétrico dentro de uma cavidade ocorre a partir de uma propagação multimodal, ocasionada por inúmeras reflexões causadas pelas paredes metálicas da cavidade, ocorrendo o fenômeno de onda estacionária, na qual as ondas refletidas e incidentes se superpõem de maneira construtiva. A relação entre as intensidades de campo elétrico máxima e mínima é denominada razão de onda estacionária (ROE). A onda refletida nos pontos em que chega em fase com a onda incidente, soma-se à mesma e aumenta o valor do campo elétrico, chegando defasada subtrai-se e diminui o campo elétrico. Isso resulta em uma distribuição não uniforme do campo elétrico dentro de um aplicador e conseqüentemente em um aquecimento não uniforme.

Este fenômeno gera um dos principais problemas associados com o aquecimento por micro-ondas: a produção de zonas quentes e frias na cavidade.

Uma parte deste aquecimento não uniforme é devida à geometria dos aplicadores. Porém, a geometria do material, assim como suas propriedades dielétricas, também afeta a uniformidade do aquecimento.

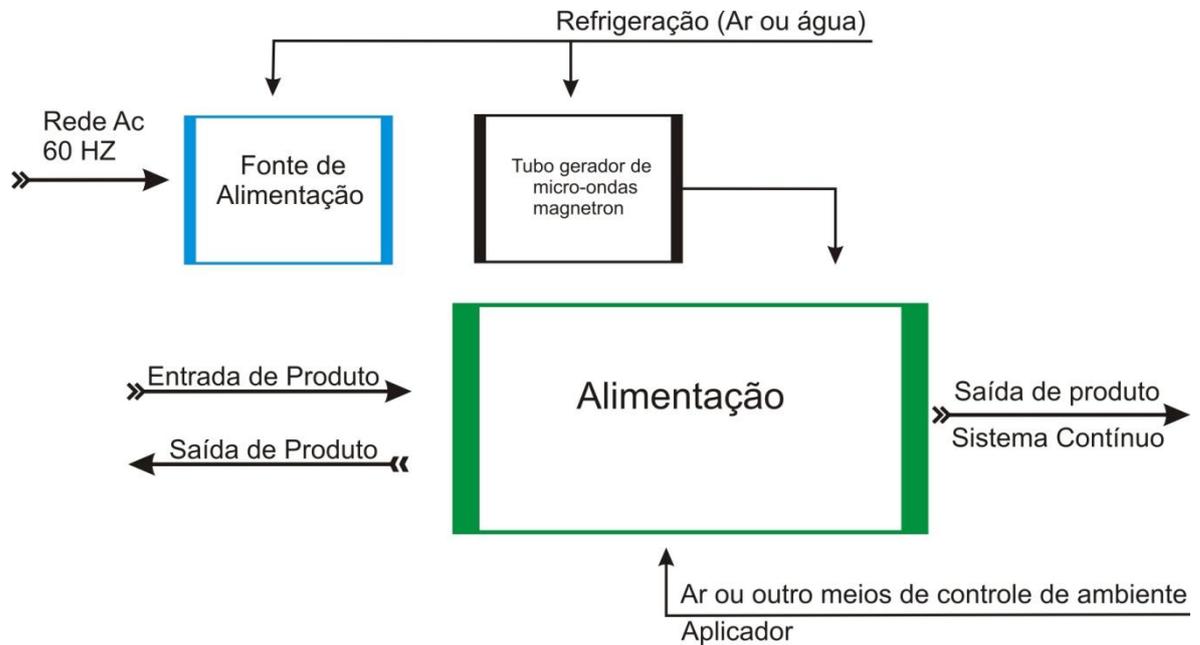


Figura 2.2 - Diagrama de um sistema genérico de aquecimento por micro-ondas. (MARSAIOLI, 1991).

A principal meta em pesquisas sobre propriedades dielétricas dos materiais é determinar os mecanismos de interação entre os produtos e a energia eletromagnética de micro-ondas. Essas propriedades determinam a quantidade de energia acoplada em um produto, sua distribuição dentro do produto e, por consequência, o tempo e a frequência de micro-ondas necessárias para o aquecimento em processos de transferência de energia por radiação (MUDGET, 1982).

### 2.3. Propriedades dielétricas

Material dielétrico refere-se àquele material que interage com um campo elétrico. Uma vez que este material é constituído de átomos que consistem de um núcleo atômico positivo envolto por uma nuvem eletrônica negativa, apresenta cargas que podem ser deslocadas, conferindo propriedade dielétrica. A interação entre um campo elétrico e um material dielétrico ocorre em função das partículas carregadas com as cargas do campo aplicado. Dessa forma, diante de um campo elétrico externo, elétrons são deslocados em direção ao núcleo ocasionando momentos dipolos induzidos, causando então, a polarização eletrônica dos materiais (VON HIPPEL, 1995).

Materiais dielétricos são caracterizados pela capacidade de armazenar energia elétrica. No entanto, são vários os mecanismos em escala molecular e atômica para a conversão de energia de micro-ondas em energia térmica. (BUFFLER, 1992). Em se tratando de aquecimento de materiais biológicos por micro-ondas, a migração iônica e a rotação dipolar são os mecanismos de maior importância (SHIFFMANN, 1987). Na migração iônica, tem-se que, ao introduzir um campo elétrico, elementos ionizados embatem-se aleatoriamente com outros não ionizados e também com eles próprios. Assim, a energia elétrica é convertida em calor durante as colisões. Na rotação dipolar, o mecanismo de aquecimento se dá por moléculas polares que se tornam “dipolos induzidos” mediante tensões geradas pelo campo, resultado das oscilações de polaridade do mesmo.

Segundo Pereira (2007) e Copson (1975), as propriedades dielétricas interferem de forma importante no mecanismo de interação entre o material e o campo elétrico aplicado, sendo caracterizada pela permissividade complexa relativa ( $\epsilon^*$ ), a qual determina o armazenamento e a dissipação da energia elétrica. A parte real ( $\epsilon'$ ) corresponde a uma constante dielétrica relativa, que determina a capacidade de um material de armazenar energia elétrica, e a parte imaginária ( $\epsilon''$ ), fator de perdas dielétricas relativo, variável que indica a capacidade do material de dissipar energia elétrica na forma de calor, sendo definidas da seguinte maneira:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$$

Equação 2-2

$$\varepsilon^* = |\varepsilon^*|e^{-j\delta} \quad \text{Equação 2-3}$$

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

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad \text{Equação 2-4}$$

A literatura apresenta os alimentos como componentes dielétricos, portanto, com habilidade de armazenar e dissipar a energia elétrica de um campo eletromagnético. Como característico de materiais dielétricos, são também isolantes elétricos pobres, e, via de regra, também maus condutores térmicos. Em outras palavras, estes materiais dissipam quantidades consideráveis de energia elétrica na forma de calor internamente por meio de mecanismos de relaxação e condução relacionados primariamente à água livre e ao teor salino (JONES, 1986). Os alimentos não interagem com o componente magnético do campo eletromagnético em razão de sua baixa permeabilidade magnética.

Não obstante, as propriedades dielétricas são condicionadas pela frequência do campo aplicado, da temperatura, da composição e da estrutura do material. Portanto, em se tratando de alimentos, essa propriedade é fortemente influenciada pelo teor de água e pela estrutura do material, como porosidade e volume destes. A absorção preferencial das micro-ondas pelas moléculas de água promove um aquecimento focalizado, o que torna a aplicação dessa fonte de energia uma metodologia conveniente em processo de secagem de alimentos (PEREIRA, 2007).

## 2.4. Secagem

A secagem é a operação unitária na qual ocorre eliminação de água de um material por evaporação ou sublimação, mediante a aplicação de calor com condições controladas e, é provavelmente, o mais antigo método de conservação de alimentos (FELLOWS, 2006). Trata-se de um processo com transporte simultâneo de calor e massa, acompanhado de mudança de fase (BARBANTI *et al.*, 1995). A secagem tem como objetivo promover a redução da atividade de água, proporcionando inibição do crescimento microbiano, diminuição da atividade enzimática e velocidades das reações químicas. Desta forma, a secagem possibilita o aumento da vida de prateleira dos alimentos, a redução do peso e do volume dos alimentos, facilitando e reduzindo os custos de transporte e armazenamento. Também facilita o consumo e diversifica a oferta de produtos.

Durante a secagem, para que haja a evaporação de água da superfície do material para o ambiente, a água deve ser transportada do interior do sólido até a superfície. Park *et al.* (2007) demonstram o diagrama de migração de água no interior de um sólido (Figura 2.3).

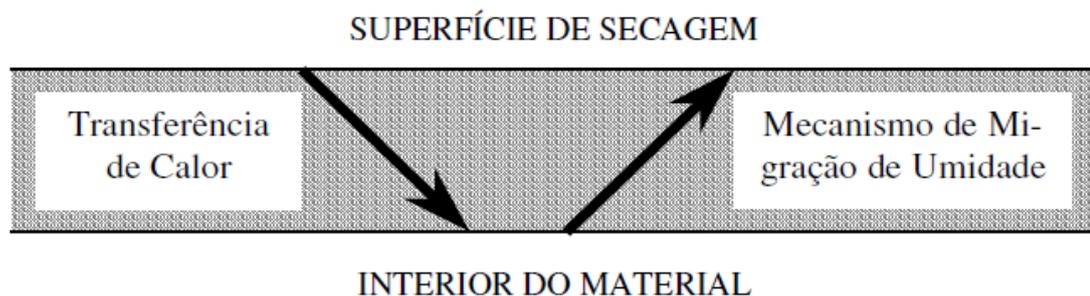


Figura 2.3 - Diagrama da migração de água no interior de um sólido.

Deve-se ressaltar que a escolha do tipo de secador que será utilizado no processo de secagem é de suma importância, uma vez que são encontradas grandes variedades de secadores no mercado. Segundo Mujumdar e Devahastin (2000), mais de 400 tipos de secadores têm sido relatados na literatura, enquanto mais de cem tipos distintos são comumente disponíveis. No entanto, deve-se escolher um secador que seja capaz de obter as propriedades do produto a ser desejado. A utilização de secadores em escala pequena ou laboratorial é sempre uma boa alternativa para a escolha final do secador que será utilizado em escala industrial, pois esses possibilitam a determinação das características de secagem do material dando uma prévia do modo como o material irá secar (KEEY, 1978).

Os mecanismos de transporte de água no interior dos sólidos durante a secagem segundo FORTES e OKOS (1980) são:

- difusão líquida devido ao gradiente de concentração;
- difusão de vapor devido ao gradiente de vapor, causado pelos gradientes de temperatura;
- movimento líquido devido às forças capilares;
- fluxo de líquido ou vapor devido à diferença na pressão total, causada pela pressão externa, pelo encolhimento, pelas temperaturas altas e capilaridade;
- escoamento por efusão que existe quando o caminho livre médio das moléculas de vapor for compatível com o diâmetro dos poros;
- movimento líquido em consequência da força gravitacional.

Os fatores que governam a velocidade dos mecanismos de transferência há pouco descritos determinam a taxa de secagem. Estes fatores são: pressão de vapor do material e do ar de secagem, temperatura e velocidade do ar, velocidade de difusão da água no material, espessura e superfície exposta para secagem (VAN ARSDEL, 1973).

As características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem. Entretanto, a transferência de calor e de massa que ocorre entre o ar e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de processo. Assim, a secagem pode ser dividida em três períodos, conforme apresentado na Figura 2.4.

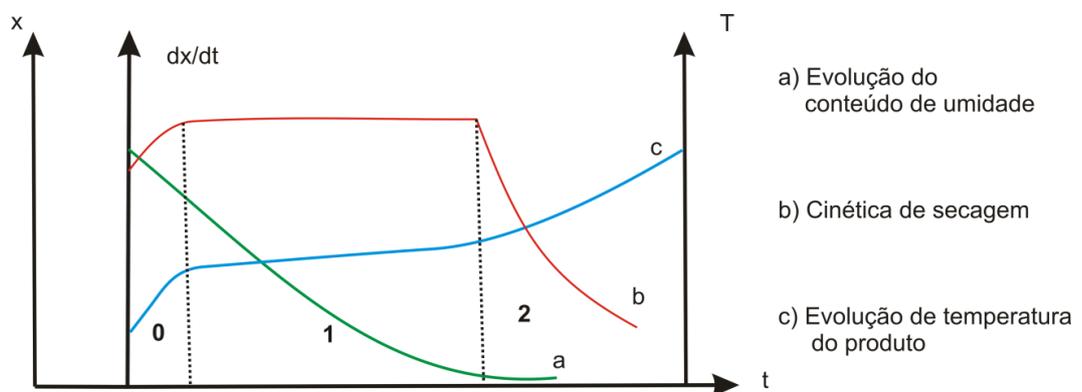


Figura 2.4 - Evolução do tempo ( $t$ ), do teor de água do produto ( $X$ ), de sua temperatura ( $T$ ) e da taxa de secagem ( $dX/dt$ ), para um ar com propriedades constantes (BROD, 2003 e PARK *et al.*, 2007).

A curva (a) representa a diminuição do conteúdo de umidade do produto ( $X$ ) em relação ao tempo ( $t$ ) durante o processo de secagem. A curva (b) mostra a velocidade ou taxa de secagem do produto ( $dX/dt$ ), isto é, a variação da umidade do produto por tempo, em relação à evolução do tempo ( $t$ ). A curva (c) representa a variação da temperatura da amostra ( $T$ ) com o tempo ( $t$ ) (BROD, 2003 e PARK *et al.*, 2007).

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:

- Período de indução (período até entrar em regime operacional): Corresponde à região 0 da Figura 2.4, na qual ocorre a adequação do produto às condições de secagem até atingir o equilíbrio (regime permanente). No início do processo, a temperatura do produto é inferior à do ar de secagem e a pressão parcial de vapor de água na superfície do produto é baixa. Consequentemente, a transferência de massa e a taxa de secagem também são. À medida que o ar entra em contato com o produto, a temperatura deste aumenta, havendo uma elevação na pressão de vapor de água e na velocidade de secagem. Esse processo continua até a transferência de calor compensar exatamente a transferência de massa,
- Período de taxa constante: Neste período, correspondente à região 1 da Figura 2.4, tem-se que a quantidade de água disponível no interior do sólido é grande, fazendo com que o movimento de água em seu interior ocorra com velocidade suficiente para manter as condições de saturação na superfície. Dessa forma, a transferência de umidade ocorre como se fosse a evaporação de uma massa líquida, sem haver influência direta do sólido na taxa de secagem. A pressão de vapor da água na superfície é igual à pressão de vapor da água pura na temperatura do produto (temperatura de bulbo úmido). Consequentemente, a velocidade de secagem é constante. O término deste período ocorre quando a migração de água do interior para a superfície não consegue compensar a taxa de evaporação da água superficial,
- Período de taxa decrescente: Corresponde à região 2 da Figura 2.4, onde a transferência de calor não é mais compensada pela transferência de massa e o

movimento do líquido do interior do sólido é insuficiente para manter a taxa de evaporação na superfície deste. Como consequência, a velocidade de secagem começa a decrescer e há uma elevação da temperatura da superfície, tendendo à temperatura do ar de secagem. O fator limitante neste período é a migração interna de água. A secagem continua até que atinja a umidade de equilíbrio.

Portanto, para minimizar os danos ao produto é necessário o controle da secagem através de três fatores principais: a quantidade de vapor d'água presente no ar, a velocidade do ar que passa pelo alimento e a temperatura do ar quente. Mas também existem outros fatores importantes que influenciam na secagem que são: as diferentes composições e estruturas dos alimentos e a quantidade de alimento colocada dentro do secador em relação à sua capacidade (FELLOWS, 2006).

#### **2.4.1. Secagem com a utilização de micro-ondas**

As frequências de micro-ondas 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 micro-ondas 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 micro-ondas, por meio da fricção intermolecular causada principalmente por rotação dipolar de moléculas polares, geram calor internamente no material. Dessa forma, proporcionam gradiente de calor menos acentuado (CAMPOS, 1986).

Segundo Buffler (1992), o aquecimento de alimentos por micro-ondas, nas frequências geralmente empregadas no processamento industrial dos alimentos, resulta do acoplamento de energia de um campo eletromagnético em uma cavidade de micro-ondas. Essas interações levam à geração de calor instantânea dentro do produto devido ao "atrito molecular", primariamente por causa da ruptura de pontes de hidrogênio fracas associadas 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. Esses efeitos estão

predominantemente relacionados com os constituintes iônicos solubilizados dos alimentos e seus constituintes sólidos associados e de sua dissipação dentro do produto. Isto resulta em elevação de temperatura instantaneamente dentro do produto, em contraste com os processos de aquecimento convencionais que transferem energia da superfície, com tempos longos e penetração lenta de calor (BUFFLER, 1992).

Zhang *et al.* (2006) relatam a tendência da utilização de micro-ondas na secagem de frutas e hortaliças, sendo que o mercado de frutas e hortaliças desidratadas é importante para a maioria dos países do mundo. No Japão, em 1998, o consumo de vegetais desidratados movimentou 7,6 bilhões dólares. Na China, a produção de vegetais desidratados gerou cerca de 800 milhões de dólares (Liu, 2003). Na Europa o mercado de vegetais desidratados foi estimado em 260 milhões dólares no início de 1990 (Tuley, 1996).

O mercado das frutas desidratadas possui uma tendência de crescimento em curto prazo. Uma análise das exportações mundiais desse produto apresentou entre 2003 e 2004 um crescimento de 27%, passando de 297.227 toneladas para 376.532 toneladas. A parcela brasileira no ano de 2004 foi de apenas 30 toneladas, representando um mercado potencial para se investir (FAO in Codevasf, 2008).

Botha *et al.* (2012, a) ao estudarem a secagem de abacaxi osmoticamente desidratado com ar quente e aplicação variável de micro-ondas, perceberam que a variação da potência de micro-ondas durante a secagem combinada com temperaturas baixas do ar, pode resultar num processo de secagem rápida, sem carbonização significativa de pedaços dos abacaxis. Botha *et al.* (2012, a) também observaram que a capacidade de reidratação dos pedaços secos de abacaxi não é afetada pela escolha das condições de secagem com micro-ondas, ou seja, independente da variação dos níveis de energia, do volume inicial ou do teor de água das amostras que tinham antes do processo de reidratação.

Prabhanjan *et al.* (1995) compararam a secagem de cubos de cenouras em forno de micro-ondas adaptado com a secagem convencional, observando que a secagem com micro-ondas resultou em uma diminuição no tempo de secagem, no entanto a utilização de níveis de energias mais baixos garantiu um produto de melhor qualidade. E Maskan (2001) observou que a secagem de kiwi por micro-ondas combinada com ar quente proporcionou um aumento da taxa de secagem

e encurtamento do tempo do processo em relação às secas apenas com energia de micro-ondas.

Karatas e Kamisli (2007) compararam os processos de secagem com infravermelho e com micro-ondas. Eles relataram que os tempos totais de secagem de damascos maduros e quase maduros foram menores quando se usa um secador de micro-ondas e que as concentrações de vitaminas e malondialdeído dos damascos secos com micro-ondas foram superiores aos secos com infravermelho.

Silva e Marsaioli (2003) confirmam que a energia de micro-ondas acelera o procedimento de secagem de amêndoas de castanha do Brasil, reduzindo substancialmente o tempo de secagem e provendo um melhor controle dos parâmetros do processo, tal como a uniformidade das amêndoas. Além disso, Silva *et al.* (2006), concluíram que é possível a secagem de noz de macadâmia por micro-ondas, sob o ponto de vista sensorial, obtendo-se um produto com características sensoriais semelhantes às do produto seco de forma convencional. A vantagem deste processo é o menor impacto quanto à rancificação, proporcionando o desenvolvimento de características de rancidez menos expressivas após o processo de secagem e após 6 meses de armazenamento.

Lombraña *et al.* (2010) estudaram a influência da secagem com aplicação de micro-ondas em cogumelos fatiados para diferentes condições operacionais relacionadas com controle de temperatura e pressão e seus efeitos sobre a cinética de secagem e qualidade do produto. Ressaltaram a importância da utilização e aplicação industrial de micro-ondas na inativação de enzimas responsáveis pelo escurecimento de cogumelos.

Rosa (2010) relatou que a velocidade de secagem de cenoura em micro-ondas foi influenciada pela forma de corte da amostra. O aumento da potência acelerou o processo de secagem, porém este aumento resultou no aumento da degradação do  $\beta$ -caroteno.

Heredia *et al.* (2007) estudaram a combinação de desidratação osmótica e secagem com micro-ondas com a finalidade de melhorar a qualidade de tomates secos, já que a qualidade do produto desidratado é muitas vezes deficiente devido ao colapso da estrutura, à descoloração e uma textura resistente. Não menos importante, embora não visualmente aparente, é a redução do aroma e do valor nutricional. Prepararam várias soluções osmóticas formuladas com sal,

açúcar e lactato de cálcio e as utilizaram em um tratamento osmótico antes da secagem com micro-ondas. Analisaram e correlacionaram a influência da energia de micro-ondas com as propriedades dielétricas das amostras. Observaram que a desidratação osmótica com soluções ternárias (27,5% de sacarose, 10% de sal e água (w/w) com a adição de 2% de lactato de cálcio) combinado com subsequente secagem com aplicação de micro-ondas fez com que fosse possível a obtenção de tomates secos mais estáveis durante o armazenamento e com melhor qualidade em relação ao produto tradicional seco por convecção.

Ozkan *et al.* (2007) estudaram a secagem de espinafre utilizando forno de micro-ondas com objetivo de avaliar a eficácia do processo e determinar as alterações de cor e teor de ácido ascórbico. Para isso secou 50 g de espinafre com 9,01 % de umidade (bs) usando oito níveis diferentes de energia, variando entre 90 e 1000W, até que a umidade sofresse um decréscimo para 0,1% de umidade em base seca. O tempo de processo de secagem foi realizado entre 290 e 4005 s, dependendo do nível de potência de micro-ondas. Observaram que a melhor qualidade em termos de cor e teores de ácido ascórbico foi obtida para secagem com aplicação de 750W de potência de micro-ondas em comparação a à aplicação de potência de 500W.

Lescano *et al.* (2008) discutiram o efeito das micro-ondas sobre a cinética de secagem de Okara, um resíduo sólido de alta umidade da extração de leite de soja, tratados em um forno de micro-ondas doméstico adaptado, com amostra inicial de 300g a 65% de umidade (bu), com duração de 80 minutos cada. Ressaltaram que a energia de micro-ondas exerceu uma grande influência sobre a cinética de secagem de Okara em comparação com outros parâmetros como temperatura e velocidade do ar.

Khraisheh *et al.* (2004) trabalharam com secagem de batata e observaram que em altas potência de micro-ondas proporcionou uma estrutura mais consolidada e rígida e conduziu à ausência de vias de entrada de água, isto é, baixa capacidade de reidratar. Khraisheh *et al.* (2004) também afirmam que as propriedades de reidratação das amostras de batata secas em micro-ondas foram melhores do que as de amostras secas somente por convecção. O grau de reidratação também aumentou com o aumento da potência de micro-ondas. Por conseguinte, elevada potência (38W) acarretou a gelatinização do amido presente nas amostra, resultando na diminuição da capacidade de reidratação.

Giri e Prasad (2007) estudaram a secagem de cogumelos com micro-ondas a vácuo. O processo resultou em uma diminuição de 70-90% no tempo de secagem comparados ao seco por convecção com ar quente e os produtos secos apresentaram melhores características de reidratação em comparação com a secagem por convecção. Com a combinação do processo, o produto obtido aparentou ser mais poroso e facilitou a reidratação.

Pereira *et al.* (2007) fizeram um estudo da fase final de secagem com micro-ondas para banana desidratada osmoticamente, enfocando os efeitos da potência de micro-ondas, temperatura do ar e velocidade do ar na cinética de secagem e na qualidade do produto, avaliados em termos de cor, volume aparente e porosidade. O estudo indicou que o aumento da potência de micro-ondas aumentou a velocidade de secagem e, conseqüentemente, diminuiu o tempo de secagem. Entretanto, provocou um rápido aumento na temperatura do produto e conseqüentemente, a carbonização do produto seco. Verificaram também que a menor temperatura ou alta velocidade do ar pode causar resfriamento na superfície do produto. Essa interação pode ser explorada para melhorar a aparência e qualidade do produto e diminuir a quantidade de pedaços carbonizados. A qualidade dos produtos avaliados em termos de cor, porosidade e volume aparente não foi fortemente afetada por parâmetros de processamento. Não foram observados efeitos sobre a cor da banana, mas alguns efeitos foram observados com relação à porosidade e ao volume aparente.

#### **2.4.2. Secagem de abacaxi**

Fernandes *et al.* (2008) estudaram o efeito da utilização de ultra-som como pré-tratamento na secagem de abacaxi (*Ananas comosus*) por desidratação osmótica e ar quente. O estudo permitiu estimar a difusividade de água no processo de secagem convectiva de abacaxis submetidos a ultrassom. Os resultados mostraram que a difusividade de água aumentou após a aplicação do ultrassom e que o tempo de secagem total foi reduzido em 8% (mais de 1 h na secagem com ar). Durante o tratamento ultrassônico em água destilada os abacaxis perderam 23,2% de açúcar em 30 min. Assim, nesta condição, a

utilização do pré-tratamento com ultrassom pode ser um processo interessante para a produção de frutos secos com baixo teor de açúcar.

Santos (2011) avaliou a influência da fermentação e do pH da solução osmótica sobre a perda de cor, textura e encolhimento de abacaxi desidratado. Os abacaxis, antes de serem desidratados foram submetidos a pré-tratamento utilizando solução de sacarose a 70%. Utilizaram-se 12, 36 e 60 horas de fermentação e solução com pH 5,59 e 3,5. Os frutos apresentaram atividade de água, pH, sólidos solúveis e umidade adequados para sua estabilidade. Em contrapartida, os tempos de fermentação e pH utilizados não tiveram efeito significativo sobre o encolhimento e a textura do abacaxi e os resultados indicaram que os frutos processados em pH 3,5 e tempo de fermentação de 36 horas apresentaram menor perda de cor. Valente (2007) estudou a secagem de pedaços de abacaxi (*Ananás comosus* (L.) Merrill) variedade Pérola, com e sem pré-tratamento osmótico, utilizando um secador de bandejas convectivo. Este autor percebeu que embora a temperatura de 70°C do ar tenha aumentado a taxa de secagem e propiciado os maiores valores para a difusividade efetiva, a qualidade do produto final foi afetada negativamente, resultando em uma maior alteração da cor e em uma maior rigidez do produto.

Botha *et al.* (2012, a) estudaram a secagem de abacaxi osmoticamente desidratado com aplicação variável de micro-ondas e ar quente durante o processo, como citado anteriormente. Botha *et al.* (2012, b) também estudaram a secagem de abacaxi osmoticamente desidratado assistida por micro-ondas com emissão de energia constante e ar quente, com o objetivo de determinar as condições ótimas de processamento para obter um produto de alta qualidade, considerando os danos causados pelo superaquecimento. Observaram que potência de micro-ondas e temperatura do ar foram os fatores mais importantes que influenciaram a qualidade do abacaxi seco pré-tratado osmoticamente. Não foram verificadas vantagens evidentes da desidratação osmótica sobre o volume ou a aparência, explicando que provavelmente este fato foi devido à natureza fibrosa da microestrutura do abacaxi, que o torna bastante resistente à perda de água.

### **2.4.3. Modelagem na cinética de secagem**

A modelagem de processos de secagem é fundamental para a seleção e otimização dos mesmos. Entretanto, as equações de transferência de calor e massa demandam considerável conhecimento de cálculo numérico para sua solução analítica (BROD, 2003). Devido à complexidade dos mecanismos de transferência de massa em alimentos, os métodos para calcular a taxa de secagem diferem segundo o período de taxa constante ou taxa decrescente. Para frutas, o período de taxa decrescente é quase sempre o único observado, e nesse caso a transferência interna de água é que governa a taxa de secagem. A taxa de secagem pode ser calculada tanto pelas equações de transporte de calor e de massa, considerando-se para ambos os casos as variações nas condições externas (ARGANDOÑA, 2005).

A etapa limitante da secagem é o transporte de massa interno por difusão. Muitos são os mecanismos apresentados que discutem a forma na qual ocorre a migração da umidade para a superfície do material, no entanto, em materiais biológicos observa-se que a teoria da difusão líquida é a mais aceita como mecanismo de transporte de massa predominante e, portanto, a maioria dos trabalhos científicos que tratam do tema a utiliza (ARGANDOÑA, 2005).

Para descrever matematicamente os processos de secagem têm-se utilizado modelos matemáticos que se baseiam na teoria da difusão líquida de água baseada na 2ª Lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (equação 2-5).

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \cdot \nabla_x) \quad \text{Equação 2-5}$$

Sendo  $D_{ef}$  o coeficiente de difusão efetivo ( $m^2/s$ ) e  $x$  o conteúdo de umidade do material em base seca ( $kg/kg$  m/s).

São encontrados trabalhos que utilizam modelos empíricos mais simples para simular as curvas de secagem de alimentos, como o modelo exponencial e de Page (PARK *et al.*, 2007), que relacionam a umidade adimensional como uma função exponencial do tempo, obtendo resultados aceitáveis. Os parâmetros desses modelos não consideram as mudanças das propriedades físicas do

produto. O modelo mais simples é o conhecido modelo exponencial proposto por Lewis (1921) (Equação 2-6).

$$\frac{X_t - X_\infty}{X_0 - X_\infty} = \exp(-kt) \quad \text{Equação 2-6}$$

Sendo  $X_t$  o conteúdo de umidade média (base seca) para um tempo  $t$ ,  $X_0$  e  $X_\infty$  as umidades iniciais e no equilíbrio, respectivamente,  $k$  a constante da taxa de secagem ( $s^{-1}$ ) e  $t$  o tempo de secagem (s).

Este modelo não fornece simulações precisas das curvas de secagem de muitos produtos, subestimando valores no início da curva e superestimando nas fases posteriores. Para superar estas deficiências, o modelo de Page (Equação 2-7) é aplicado com uma modificação empírica para o parâmetro tempo, introduzindo um expoente “n”. Este modelo tem sido usado para simular as curvas de secagem de abacaxi (Hofsky *et al.* 2009), banana (Pereira, 2007), espinafre (Ozkan *et al.* 2007), entre outros.

$$\frac{X_t - X_\infty}{X_0 - X_\infty} = \exp(-kt^n) \quad \text{Equação 2-7}$$

Os parâmetros  $K$  e  $n$  têm sido correlacionados com diferentes variáveis do processo (temperatura, umidade inicial, entre outros). Estes modelos empíricos derivam diretamente da relação entre o conteúdo de umidade médio e o tempo de secagem. Porém, não fornecem uma visão precisa dos processos de transformação que ocorrem durante a secagem, embora possam descrever a curva da secagem para dados experimentais de uma situação específica.

## 2.5. Encolhimento

Um dos principais fatores relacionados à perda de qualidade de alimentos desidratados é relativo às alterações estruturais causadas pelo encolhimento durante a secagem. Mudanças na forma, a perda de volume e aumento da dureza na maioria dos casos podem causar uma impressão negativa no consumidor. Além disto, o encolhimento está diretamente relacionado à capacidade de reidratação do produto, como observado por Giri e Prasad (2007). Há, por outro lado, alguns produtos secos que têm tradicionalmente um aspecto encolhido, um requisito para o consumidor de uvas passas e ameixas secas (MAYOR, SERENO, 2004). Sendo assim, o estudo do fenômeno de encolhimento de materiais biológicos durante o processo de secagem é extremamente importante, uma vez que tal fenômeno interfere de maneira decisiva na difusividade de água através do alimento (WANG, BRENNAN, 1995).

A secagem de produtos agrícolas com alto teor de umidade inicial é acompanhada de uma redução do volume. A literatura relata que o encolhimento de produtos vegetais durante a secagem não é função exclusiva do teor de umidade, mas também das condições do processo e da geometria do produto, uma vez que materiais biológicos porosos quando desidratados contraem-se diferentemente nas direções longitudinais, tangencial e radial (FORTES E OKOS, 1980).

Este encolhimento (S) é normalmente expresso pela relação entre o volume da amostra antes e após a secagem. Em sua maioria, expressa em termos do volume aparente como representado na equação 2-8.

$$S = \frac{V_d}{V_0} \times 100 \quad \text{Equação 2-8}$$

O volume pode ser medido pelo princípio de Arquimedes ou por um número de técnicas de deslocamento onde  $V_d$  é o volume aparente da amostra após a secagem e  $V_0$  é o volume aparente da amostra inicial (YAN *et al.*, 2008).

Yan *et al.* (2008), definem porosidade ( $\epsilon$ ) como a fração de volume de ar na amostra. Pode ser calculado usando as equações 2-9 e 2-10, sendo que  $V$  é o

volume aparente,  $\rho$  é a densidade da amostra, os subscritos a e t referem-se à aparente e verdadeira, respectivamente.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_t}{V} \quad \text{Equação 2-9}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t} \quad \text{Equação 2-10}$$

Alguns autores vêm tentando estudar a influência das diferentes condições de processo nas mudanças de volume dos materiais durante a secagem. Na maioria dos casos, tal análise é realizada verificando o efeito de cada condição de processo como temperatura, velocidade do ar ou umidade relativa do ar. Infelizmente, os resultados encontrados na literatura não trazem valores que elucidem sobre a influência destas condições de processamento no encolhimento (MAYOR & SERENO, 2004).

Maskan (2001) estudou o encolhimento de kiwi durante a secagem com aplicação de micro-ondas e ar quente: observou que o encolhimento foi menor com a combinação dos dois métodos. Além disso, observou elevado encolhimento inicialmente, com estabilização no final do processo da secagem. Relatou que menor encolhimento do produto proporcionou maior capacidade de reidratação.

Rosa (2010) estudou a secagem de cenoura em micro-ondas e vácuo, concluindo que a associação ao vácuo resultou em um menor encolhimento e produto final mais poroso, porém estas características não foram garantia de melhor capacidade de reidratação. Já Changrue e Orsat (2009), na secagem de cenouras desidratadas osmoticamente e secas em micro-ondas a vácuo, concluíram que o baixo encolhimento resultou em menor capacidade de reidratação.

Raghavan e Silveira (2001) estudaram as características do encolhimento de morangos osmoticamente desidratados combinados com secagem utilizando micro-ondas. As amostras secas com densidade de potência de 0,2 W/g resultaram em menor diâmetro do que as amostras secas com densidades de potência de 0,1W/g, e a taxa de encolhimento foi de 8% a 18% menor em relação às amostras não tratadas osmoticamente. E Khraisheh *et al.* (2004), desidrataram alimentos ricos em amido com micro-ondas aplicando potências de 10,5W, 15W, 60W e ar quente 30°C, 40°C, 60°C. Concluíram que produtos ricos em amidos proporcionaram um menor encolhimento quando secos com aplicação de micro-ondas.

Ghanem *et al.* (2012) investigaram o efeito da desidratação de cascas de frutas cítricas aplicando potências de micro-ondas de 100, 180, 300, 450 e 600 W sobre o encolhimento. Concluíram que o encolhimento das cascas é principalmente devido à quantidade de água evaporada, e não para as condições de operação de secagem. Não observaram efeito significativo na redução de volume das cascas das frutas cítricas para níveis de potências constantes ao longo da secagem.

Hochheim *et al.* (2010) estudaram o encolhimento do abacaxi submetido a secagem em atmosfera modificada pela adição de etanol e verificaram que o etanol eleva a pressão de vapor da mistura etanol-água em relação à pressão de vapor da água, favorecendo assim a evaporação da água e acelerando o processo de secagem. Observaram que a aplicação de uma camada de etanol diretamente na superfície da amostra resultou em um menor encolhimento.

Nicoletti (2001) ao estudar o encolhimento de abacaxi seco em um secador de bandejas equipado com sistema de controle automático, observou que o emprego de temperatura fixa no fruto mostrou-se conveniente, com o aumento da difusividade aparente e redução do grau de encolhimento, quando comparado com as amostras *in natura* com temperatura fixa no ar. O encolhimento volumétrico não sofreu variações com a temperatura quando os ensaios foram conduzidos a velocidades altas, porém para velocidades menores, o encolhimento foi mais acentuado à medida que a temperatura decrescia. Além disso, o pré-tratamento osmótico levou a um menor encolhimento, mas resultou em menores difusividades.

Yan *et al.* (2008) compararam diferentes métodos de medida de volume aparente no encolhimento de banana, abacaxi e pedaços de manga durante a secagem com ar quente. Concluíram que o método de Arquimedes é o mais recomendado para medir o volume aparente de amostras frescas e secas, sendo que o solvente recomendado é o n-heptano, por apresentar um menor coeficiente de variação. Porém, a imagem digital é aplicável para medir o diâmetro e perímetro e descrever as mudanças estruturais de frutas durante a secagem. Observaram que no processo final da secagem o volume aparente, o encolhimento e a porosidade dos frutos diminuíram com a redução do teor de umidade.

A literatura carece de uma definição comum de colapso. O termo tem, em geral, sido usado para descrever a perda de estrutura, caracterizada por diferentes medidas: volume, porosidade, distribuição de tamanho dos poros, dimensões em diferentes pontos da amostra, textura e temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ). Colapso ou perda de estrutura e, em particular, uma drástica diminuição da porosidade em materiais desidratados, é um processo de importância para a indústria de alimentos (YAN *et al.*, 2008).

### **2.5.1. Modelagem do encolhimento**

Por muito tempo o fenômeno do encolhimento foi assumido como fator insignificante para facilitar as soluções equacionais de transferência de calor e massa, no entanto, durante a secagem de material biológico, este fenômeno físico é observado e deve ser levado em consideração.

De acordo com Mayor e Sereno (2004), os modelos que consideram o encolhimento na secagem de material biológico são divididos em dois grandes grupos:

- Modelos empíricos que consistem em aplicar um ajuste aos dados experimentais de encolhimento em função do conteúdo de umidade do material;
- Modelos fundamentais que são baseados em interpretações físicas dos sistemas alimentícios estudados e tentam prever mudanças na geometria do material baseados nas leis da conservação de massa e volume. Em ambos os casos, são utilizados modelos lineares e não lineares a fim de descrever o

encolhimento como função do conteúdo de umidade da amostra.

Um dos modelos fundamentais apresentados por MAYOR & SERENO (2004) é o modelo proposto por SUZUKI *et al.* (1976), os quais tentam relacionar as mudanças na área superficial total do material com o decréscimo no seu conteúdo de umidade, levando-se em consideração dados de densidade *bulk* do material na condição inicial ou no equilíbrio. SUZUKI *et al.* (1976) representaram o modelo uniforme 2 considerando que o volume do material seja expresso como sendo a diferença entre o volume inicial da amostra e o volume de água perdido por evaporação, a área superficial do material sofre a seguinte modificação (Equação 2-11). O parâmetro  $n$  indica o grau de proporcionalidade existente entre a variação da área superficial total das amostras e o volume das mesmas ao longo do processo.

$$\frac{A}{A_0} = (cX(t) + d)^n \quad \text{Equação 2-11}$$

Onde:

$A$  = Área da superfície da amostra no instante  $t$ ,

$A_0$  = Área de superfície inicial da amostra,

$n$  = Coeficiente de encolhimento.

Os parâmetros  $c$  e  $d$  podem ser expressos como:

$$c = \frac{\rho_0}{X_0 + 1} \quad \text{Equação 2-12}$$

$$d = 1 + c - \rho_0$$

Equação 2-13

$\rho_0$  = densidade inicial da amostra (g/m<sup>3</sup>).

## 2.6. Isoterma de sorção

A isoterma de sorção é uma curva que indica o conteúdo de água retida pelo alimento em função da umidade relativa do ambiente em que se encontra, no equilíbrio e para uma determinada temperatura e pressão (DITCHFIELD, 2000, GABAS, 2002, ORDÓÑEZ *et al.*, 2005). Ainda, segundo ORDÓÑEZ *et al.*, 2005, são próprias de cada grupo de alimentos e permitem estimar a estabilidade de um produto diante dos diversos agentes alterantes. Segundo Park *et al.* (2008), a relação de equilíbrio depende da composição química dos alimentos (gordura, amido, açúcar, proteínas, etc.). Deve-se ressaltar que o conhecimento dessas curvas de sorção é indispensável para a determinação do teor de água final necessário para um produto final estável.

A importância da construção dessas isotermas está na predição de alterações que o material possa sofrer se condicionado em determinada umidade relativa ambiente. Entre as aplicações mais conhecidas, pode-se encontrar o projeto de secadores, a predição das condições finais de misturas de diversos ingredientes em alimentos formulados, o projeto de embalagens e simulação de alterações de umidade que ocorrem durante a estocagem, além da predição da estabilidade e vida de prateleira do produto (GABAS, 2002, IGUEDJTAL, 2008).

A curva de uma isoterma pode apresentar-se de duas formas: isotermas de adsorção e isotermas de dessorção. As isotermas de adsorção são obtidas quando um alimento totalmente seco é colocado em atmosferas com diversos incrementos de umidade relativa, sendo medido o aumento de peso desse alimento devido ao ganho de água durante a hidratação. Já as isotermas de dessorção são obtidas quando o alimento inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições atmosféricas criadas para adsorção, sendo medida neste caso a diminuição de peso do alimento, provocada pela perda de água durante a desidratação. Essas curvas de adsorção e dessorção não coincidem, e esta diferença entre as isotermas é conhecida como o fenômeno de histerese

(HOSSAIN *et al.*, 2001). Uma curva típica de isoterma de sorção é apresentada na Figura 2.6 (PARK e NOGUEIRA, 1992).

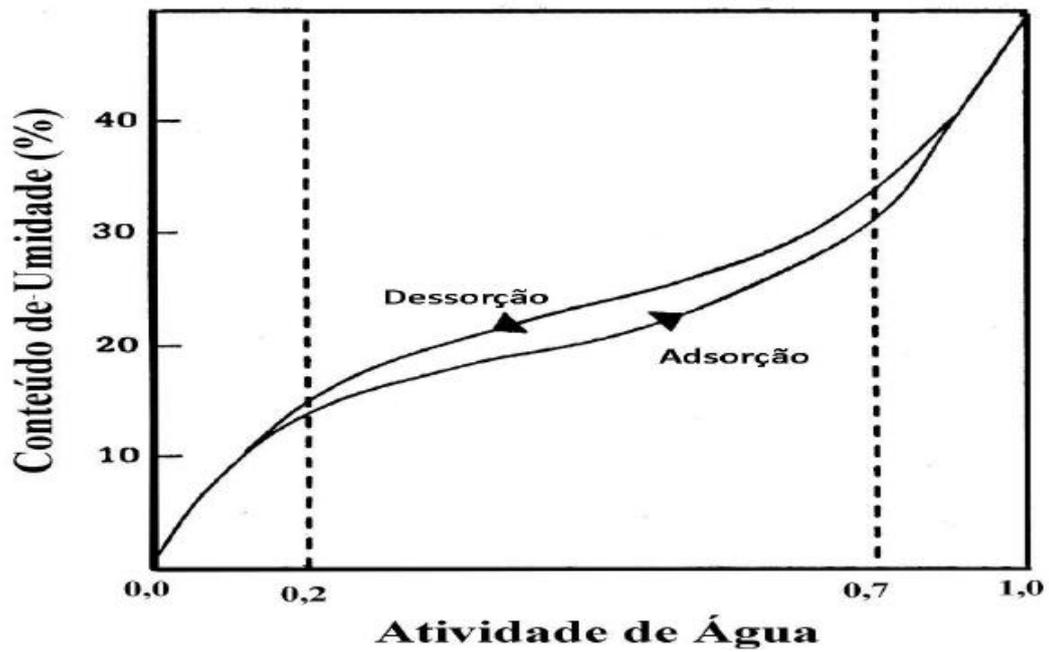


Figura 2.5 - Curva Típica das isotermas de sorção

Fonte: Park e Nogueira (1992)

## 2.7. Objetivos

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da aplicação potência de micro-ondas constante e variável e temperatura do ar, na secagem convectiva de pedaços de abacaxi até um teor de umidade de 15% (bu) e considerando dois períodos de secagem: entre umidade inicial até 40% e entre 40% e 15% de umidade (bu).

Os objetivos específicos foram:

- 1) Comparar dois diferentes métodos de análise de volume aparente, deslocamento de fluidos e imagem digital, para o acompanhamento da cinética de encolhimento durante a secagem de abacaxi;
- 2) Estudar o efeito da temperatura e da potência de micro-ondas na cinética de secagem e encolhimento dos pedaços de abacaxi até 15% de umidade (bu);
- 3) Estudar o efeito da temperatura do ar e potência de micro-ondas na cinética de secagem e encolhimento de pedaços de abacaxi nos períodos I e II da secagem;
- 4) Modelar as curvas de secagem e de encolhimento dos processos de secagem de abacaxi aos modelos matemáticos de Page e Suzuki *et al.* (1976), respectivamente;
- 5) Avaliar a influência da temperatura do ar e da potência aplicada durante a secagem dos pedaços de abacaxi, na qualidade da fruta seca a 15% de umidade (bu) por meio da análise de atividade de água, volume aparente, encolhimento, porosidade e capacidade de reidratação;
- 6) Construir a isoterma de sorção dos pedaços de abacaxi seco com aplicação constante de potência de micro-ondas de 259W combinado com ar a 70°C.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de abacaxis firmes e maduros da cultivar pérola (*Ananas comosus*) foram fornecidas por único produtor, do município de São João da Barra - RJ. Os abacaxis foram escolhidos de acordo com seu grau de maturação, pela coloração da casca (casca amarela), como demonstrado na Figura 3.1, e pelo teor de sólidos solúveis totais (entre 10 e 15°Brix). Os frutos foram descascados manualmente até a remoção completa da casca. Os miolos foram removidos e a polpa foi cortada em pedaços cilíndricos com 25 mm de diâmetro e 10 mm de espessura (Figura 3.2) com o auxílio de um cortador projetado para este fim (Figura 3.2). Os abacaxis tinham em média 166 cm de comprimento, 123 cm de largura e pesavam em média 1,359 Kg, desconsiderando a coroa.



Figura 3.1 - Coloração da casca dos abacaxis utilizados nos experimentos.

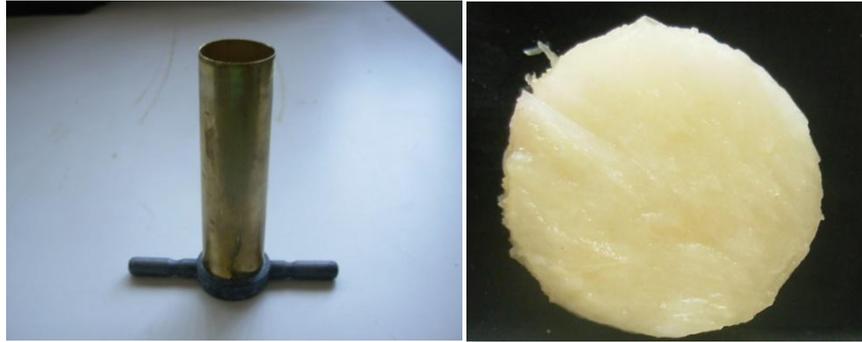


Figura 3.2 - Cortador e pedaços de abacaxi fresco cortado em cilindros utilizados nos experimentos

### 3.1. Caracterização da matéria-prima e dos produtos

Amostras da matéria-prima (fruta *in natura*) foram avaliadas antes do processo de secagem e o produto seco, logo após o processamento. As frutas *in natura* foram caracterizadas pelas análises do teor de umidade, atividade de água, sólidos solúveis totais (SST), pH e volume aparente. Os produtos secos foram analisados quanto ao teor de umidade, à atividade de água, ao volume aparente, à porosidade e quanto à capacidade de reidratação. As análises foram realizadas com cinco repetições, exceto para atividade de água que foi em triplicata.

#### 3.1.1. Determinação do teor de umidade

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

O teor de umidade inicial instantes antes do processamento foi obtido por meio de uma balança de infravermelho da marca GEHAKA modelo IV2000 – Versão 4.21. Para definição da condição de secagem na balança, determinou-se o tempo e a temperatura de secagem mais adequados para o produto. Inicialmente assumiu-se  $120^{\circ}\text{C}$ , com aumento gradativo da temperatura a cada

5°C até que as amostras se apresentassem queimadas, quando foi observada a carbonização diminuiu-se 5°C. Ajustou-se o valor de tempo em 15 minutos. Adotou-se como padrão a temperatura de 140°C durante 15 minutos considerando a condição de peso constante, para a determinação de umidade pelo analisador de infravermelho. Foram pesadas e maceradas aproximadamente 3 g de amostra em um Becker. A amostra macerada foi transferida para um prato de alumínio vazio sobre o suporte do prato acoplado na balança, tomando-se a precaução de espalhar sobre todo o prato sem criar acúmulos que dificultassem a secagem, logo se fez a leitura.

### **3.1.2. Atividade de água (Aw)**

A determinação da atividade de água foi realizada a 25°C por meio do instrumento Aqualab, modelo DEW - 4TEV - Decagon. O princípio do método consiste na medida do ponto de orvalho da amostra acondicionada em uma cápsula plástica dentro de um sistema de temperatura constante.

### **3.1.3. Sólidos Solúveis Totais (SST)**

Para determinação do teor de sólidos solúveis totais, uma parte da fruta foi esmagada para retirada do suco e uma gota do mesmo foi colocada no prisma de um refratômetro (Quimis Q-109B, N° Serie \*064\*). A leitura foi realizada a 20°C.

### **3.1.4. pH**

Amostra de 10 g triturada em 100 mL de água destilada foi utilizada para a determinação do pH. A amostra foi macerada até homogeneização, realizando, em seguida, a leitura direta do pH por potenciometria. Foi utilizado um pHmetro digital (Analyses pH/Ian 450M, N° Serie 4379/02), devidamente calibrado com soluções de pH 4,0 e 7,0, conforme as Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (1985).

### 3.2. Volume aparente (Vap) e Encolhimento

O volume aparente das amostras foi medido por dois métodos: pelo princípio de Archimedes e por análise de imagem digital. Na determinação do volume por análise de imagem, as amostras foram fotografadas no mesmo instante em que foram pesadas. A área superficial foi medida diretamente pelas fotografias, por meio de cinco amostras diferentes. A espessura das mesmas foi determinada por meio de uma média aritmética das medidas realizadas em cinco diferentes pontos da amostra, como demonstrado na figura 3.3, com a utilização de um paquímetro. Esta análise foi repetida em 5 amostras diferentes.

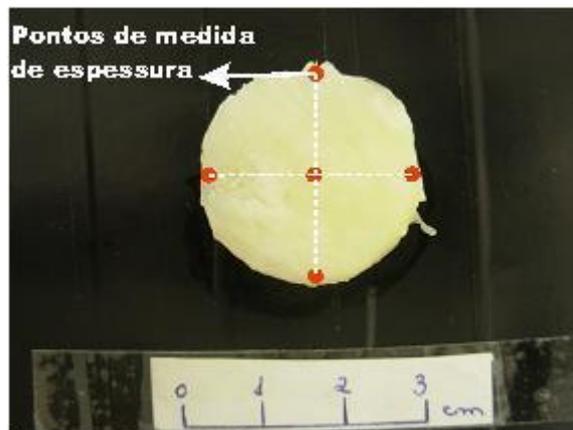


Figura 3.3 - Pontos de medição da espessura ao longo da amostra de abacaxi.

A análise de imagem foi realizada pelo tratamento de 5 amostras por meio do *software* livre ImageJ para obtenção da área superficial. O *software* livre ImageJ relaciona o tamanho do objeto na imagem ao tamanho no mundo real, por isso a importância da escala da imagem. Ao capturar as imagens e salvá-las no computador o *software* é capaz de converter o número de pixels dos pedaços de abacaxi para as dimensões reais. Os dados de volume aparente foram obtidos multiplicando-se a área superficial fotografada pela espessura média do material em cada tempo de secagem.

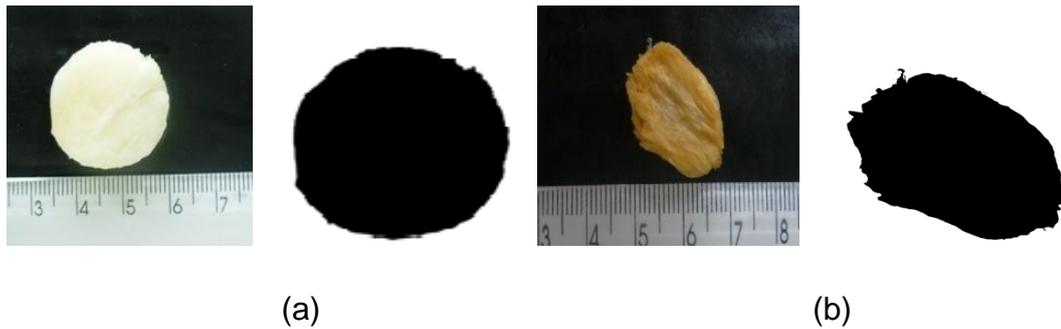


Figura 3.4 - a) Imagem original dos pedaços de abacaxi *in natura* (esquerda) e depois do tratamento (direita), b) Imagem original dos pedaços de abacaxi seco (esquerda) e depois do tratamento (direita).

O método de Arquimedes relaciona o empuxo com deslocamento de líquido quando uma amostra é imersa em um líquido. Segundo Yan *et al.* (2008), este é o método mais recomendado para medir o volume aparente de amostras usando o n-heptano como líquido de imersão. Um gancho foi suspenso na parte inferior de uma balança semianalítica para a realização da medida da massa da amostra mergulhada em n-heptano. O volume foi calculado da seguinte forma:

$$V_{ap} = \frac{(W_{s+g} - W_g) - (W_{s+g,n-heptano} - W_{g,n-heptano})}{\rho_{n-heptano}} \quad \text{Equação 3-1}$$

sendo que:

$W_g$  = massa do gancho,

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

$W_{s+g,n-heptano}$  = massa da amostra e gancho mergulhados no n-heptano,

$W_{g,n-heptano}$  = massa do gancho mergulhado no n-heptano.

O encolhimento foi calculado como sendo a relação entre o volume aparente da amostra seca ( $V_d$ ) e o seu volume aparente inicial ( $V_0$ ) conforme a

equação 3.2. Foram feitas marcações na bandeja, Figura 3.7, para obter o volume aparente das mesmas amostras durante a secagem.

$$S = \frac{V_d}{V_0} \times 100$$

Equação 3-2

### 3.3. Porosidade

Para calcular a porosidade das fatias de abacaxi seco, foi levado 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 utilizando a equação 3.3.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{sa}}{V_{ap}}$$

Equação 3-3

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

### 3.4. Cinética de encolhimento na secagem de abacaxi

A cinética de encolhimento foi realizada pelo acompanhamento das variações de volume aparente e área superficial das amostras em relação à amostra *in natura*, medidos por imagem digital conforme descrito no item 3.2, seguindo a mesma metodologia adotada para cinética de secagem (item 3.8.2).

### 3.5. Capacidade de reidratação (CR)

As amostras secas foram reidratadas 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:

$$CR(\%) = \frac{W_{rei} - W_{seca}}{W_{seca}} 100 \quad \text{Equação 3-4}$$

### 3.6. Análises estatísticas

Os dados obtidos do encolhimento e capacidade de reidratação foram tabulados e analisados estatisticamente pelo programa estatístico SAS – Statistical Analysis System (2003), versão 9.3, empregando-se a análise de variância (ANOVA) utilizando o teste Tukey, em nível de 5% de significância ( $p < 0,05$ ).

### 3.7. Isotermas de sorção

As isotermas de sorção do abacaxi desidratado foram determinadas pelo método gravimétrico estático, utilizando-se soluções salinas saturadas preparadas com água destilada a 25°C. As amostras, em triplicata, foram colocadas em cadinhos de alumínio e, em seguida, armazenadas em potes herméticos (Figura 3.5) com as soluções salinas de atividade de água conhecida. Os sais utilizados foram: acetato de potássio ( $KC_2H_3O_2$ ), carbonato de potássio ( $K_2CO_3$ ), Nitrito de sódio ( $NaNO_2$ ), cloreto de sódio ( $NaCl$ ) e cloreto de potássio ( $KCl$ ) com as seguintes atividades de água ( $A_w$ ): 0,22, 0,43, 0,62, 0,75 e 0,85, respectivamente. Com a finalidade de evitar possíveis contaminações das amostras, adicionaram-se três gotas de formol a cada solução salina.

As soluções foram preparadas segundo recomendações de Spiess, Wolf (1987) - citados por Ditchfield (2000), que indicam a quantidade de água e sal necessários para obter uma solução supersaturada a 25°C (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Recomendação para preparo de soluções saturadas de sais a 25°C

Sal	Quantidade	
	Sal (g)	Água (mL)
KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	200	65
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	200	90
NaNO <sub>2</sub>	200	50
NaCl	200	60
KCl	200	80

FONTE: SPIESS, WOLF, 1987

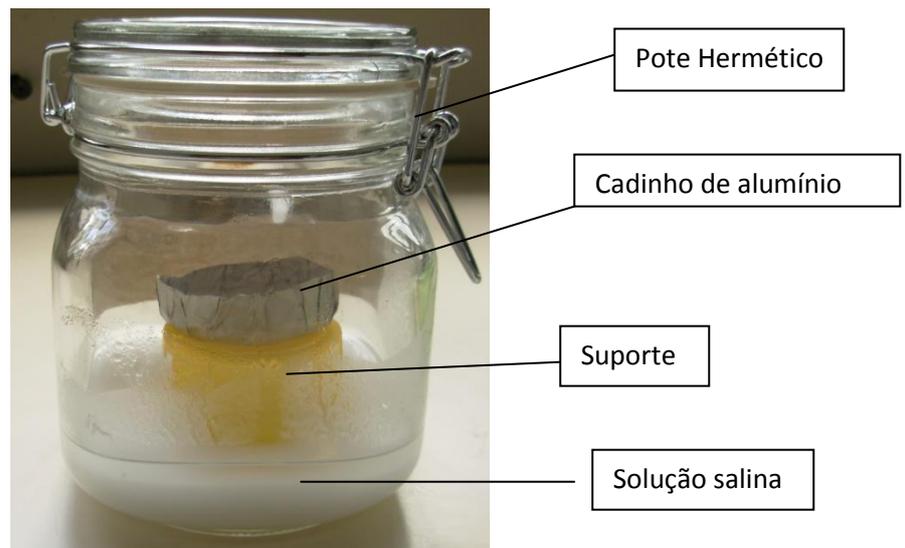


Figura 3.5 - Detalhes do pote com fechamento hermético.

Os potes herméticos foram colocados em temperatura controlada de 25 °C até as amostras atingirem a umidade de equilíbrio. As amostras alcançaram o equilíbrio após 2 a 3 semanas, baseando-se na mudança de peso das mesmas. Após terem alcançado o equilíbrio, determinou-se a massa seca em estufa à pressão atmosférica, utilizando a temperatura de 105°C, até atingir peso constante. As medidas foram realizadas em triplicata.

As umidades de equilíbrio foram calculadas de acordo com a seguinte equação:

$$X_{eq} = \frac{m_e - m_s}{m_s} \quad \text{Equação 3-5}$$

Onde:

$X_{eq}$  = umidade de equilíbrio (g água/g massa seca),

$m_e$  = massa da amostra quando atingido o equilíbrio (g),

$m_s$  = massa seca da amostra (g).

### **3.8. Secagem assistida por micro-ondas**

#### **3.8.1. Forno de micro-ondas adaptado**

Para a realização do processo de secagem assistida a micro-ondas, os experimentos foram conduzidos em um forno doméstico a micro-ondas, da marca Brastemp, cavidade com volume de 38 litros, modelo BMC38-A, com 900W de potência nominal máxima, devidamente adaptado a um sistema de ar quente no Laboratório de Tecnologia de Alimentos (LTA/CCTA/UENF). A montagem deste equipamento foi desenvolvida neste trabalho de acordo com Silva (2005) e Pereira (2007).

Os vidros interno e externo de proteção da porta do forno foram removidos, mantendo a tela metálica, que mantém as micro-ondas dentro da cavidade de aplicação, não permitindo que escapem. Assim, foi possível permitir a admissão do ar dentro da cavidade do forno por meio 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. Ainda como parte do sistema, um aquecedor por resistência elétrica foi colocado após a descarga do ventilador, controlado por um sistema composto por um termopar tipo K e controlador digital Delta DTT 4848 (CEMAR). Durante todo o trajeto do ar após a sua passagem no aquecedor até a

entrada no forno, o sistema foi revestido por manta de lã de vidro, para o isolamento térmico. Dentro da cavidade do forno de micro-ondas foi colocado um suporte para suspensão da bandeja até atingir o plano central do forno. A temperatura das amostras foi monitorada por sensor de temperatura de infravermelho Raytek M13.

As medidas de potência no forno do micro-ondas foram determinadas pelo método de teste “IMPI 2 – Litros” adaptado de Buffler (1991) citado por Marsaioli (2001), Apêndice 1. A adaptação do forno está mostrada na Figura 3.6.

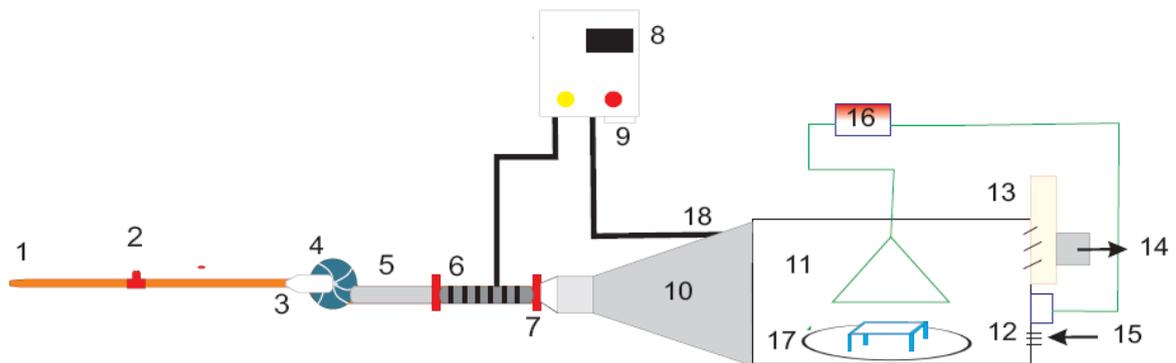


Figura 3.6 - Adaptação de forno de micro-ondas doméstico: (1) entrada de ar, (2) válvula, (3) tubo conector, (4) ventilador, (5) aquecedor elétrico, (6) Tubo flexível, (7) conector rápido, (8) controlador e indicador de temperatura, (9) Chave liga/desliga do controlador, (10) difusor de ar, (11) cavidade de micro-ondas, (12) suporte de produto, (13) janela de exaustão, (14), saída de ar, (15) ar de resfriamento do gerador de micro-ondas, (16) sensoriamento infravermelho, (17) prato giratório, (18) Sensor de temperatura (termopar tipo K). (Adaptado de SILVA, 2005).

### 3.8.2. Cinética de secagem do abacaxi

A cinética de secagem foi estudada mediante o acompanhamento da perda de água ao longo do tempo de processo. Para isto, a massa dos pedaços de abacaxi foi determinada em balança semianalítica a cada 15 minutos de secagem nos primeiros 30 minutos e a cada 10 minutos no restante do processo até atingir massa correspondente a 15% de umidade. O procedimento experimental está detalhado no item 3.9.

A temperatura superficial média do produto foi medida por meio de um sensor infravermelho da marca Raytek M13. As variáveis do processo monitoradas foram: umidade relativa e temperatura de saída do ar do micro-ondas, temperatura e umidade relativa do ambiente conforme apresentado no apêndice 4 e 5.

Os pedaços de abacaxi *in natura* foram cortados em forma cilíndrica, imediatamente pesados em uma bandeja de polipropileno e direcionados para o sistema de secagem com aplicação de micro-ondas como demonstrado na figura 3.6. Foram pesadas e utilizadas 400 g de pedaços de abacaxi distribuídos na bandeja de polipropileno vazada (Figura 3.7), que foi disposta sobre uma base suspensa na parte central da cavidade do forno sobre o prato giratório.



Figura 3.7 - Distribuição das amostras na bandeja utilizada nos experimentos

As equações 3-6 e 3-7 foram utilizadas para calcular a massa de amostra correspondente à umidade desejada durante a secagem. A umidade inicial foi adquirida com auxílio de uma balança infravermelho conforme descrito no item 3.1.1.

$$M_S = M_T - M_W$$

Equação 3-6

$$M_W = M_T \cdot IV_0 \quad \text{Equação 3-7}$$

$M_T$  = Massa total (g);

$M_W$  = Massa de água (g);

$M_S$  = Massa de sólidos (g);

$IV_0$  = Umidade inicial (g/g);

Sabendo a umidade inicial calculou-se a massa de água e pela diferença entre a massa total e massa de água encontrou-se a massa de sólidos no início. Considerando a massa de sólidos constante, obteve-se a massa total que a amostra teria com 40% e 15% de umidade.

Onde:

$$M_T(X\%(bu)) = \frac{M_s}{y_{sol}} \quad \text{Equação 3-8}$$

$y_{sol}$  = Teor de sólidos (g)

### 3.9. Procedimento experimental

#### 3.9.1. Efeito da temperatura do ar e potência de micro-ondas constante durante a secagem de pedaços de abacaxi.

A fim de se estudar o encolhimento do abacaxi durante a secagem foram utilizadas com intuito de comparação duas metodologias de análise de volume, uma mais utilizada, que é baseada no princípio de Arquimedes e destrutiva e outra não destrutiva por análise de imagem digital. Os experimentos de secagem foram conduzidos a uma vazão aproximada de 0,5 m<sup>3</sup>/min, temperatura do ar de

70°C e potência de micro-ondas de 166W, correspondente à densidade de potência de 0,4 W/g com 3 repetições. Como a análise de deslocamento de fluidos (princípio de Arquimedes) é uma análise destrutiva, foi necessário reiniciar o processo de secagem a cada tempo da cinética do encolhimento, ou seja, fez-se então um total de 8 corridas para cada repetição estabelecida. No total foram feitas 24 corridas. Os experimentos foram conduzidos até umidade de equilíbrio (bu).

Depois de realizada a comparação das metodologias, utilizou-se o método de análise de volume aparente por imagem digital para acompanhamento da cinética de encolhimento no estudo da secagem com micro-ondas com aplicação de potência de micro-ondas e temperatura do ar constante ao longo da secagem.

Nestes experimentos as amostras foram secas até teores de 15% de umidade (bu). As potências de micro-ondas aplicadas foram de 0W, 166W, 259W e 381W, correspondentes a densidades de potência de 0W/g, 0,4W/g, 0,64W/g e 0,95W/g, respectivamente. As densidades de potência (DP, em W/g) foram calculadas dividindo-se a potência aplicada pela massa inicial de amostra. As temperaturas do ar utilizadas foram de 40°C, 55°C, 70°C e sem a passagem de ar. Os experimentos foram conduzidos a uma vazão aproximada de 0,5 m<sup>3</sup>/min. Foram feitas combinações das variáveis do processo, potências de micro-ondas e temperatura do ar, totalizando 13 experimentos. O experimento na condição 70°C/166W foi realizado em triplicata. Realizou-se um experimento com ar a 70°C com o micro-ondas desligado e outro com aplicação de 381W de potência sem a passagem do ar de secagem.

### **3.9.2. Efeito da temperatura do ar quente e potência de micro-ondas variável durante a secagem de pedaços de abacaxi.**

Os frutos foram colhidos no mês de julho e as amostras foram preparadas conforme descrito no item 3.8.2. O processo de secagem foi dividido em dois períodos (I e II) como ilustrado na Tabela 5.1. No período I, o processo de secagem foi conduzido até que as amostras atingissem um teor de umidade de 40% (bu), enquanto no período II, o processo foi realizado entre 40% a 15% de umidade (bu). A potências de micro-ondas aplicadas ao processo foram de 89,

166 e 259W, correspondentes a 0,22, 0,4 e 0,64W/g com referência à massa inicial da fruta.

Os testes de secagem foram realizados com temperaturas do ar quente a 55°C e 70°C e vazão de ar fixados em 0.5 m<sup>3</sup>/min.

O período I, foi conduzido com duas diferentes potências de micro-ondas e temperatura do ar, 166W e 259W, e 70°C e 55°C, respectivamente. Essas condições foram escolhidas visando acelerar o período de indução térmica, de maneira que tanto o ar quanto as micro-ondas forneçam energia para o material. Neste período as amostras foram secas até aproximadamente 40% de umidade (bu).

No período II de secagem, aplicou-se 89W e 259W de potência e as mesmas condições de temperatura do ar aplicadas no período I (70°C e 55°C), e foi conduzido até que o produto atingisse, aproximadamente, 15% de umidade (bu). A partir do período I, correspondente a 40% de umidade (bu), a secagem do abacaxi torna-se mais lenta e é considerado o período crítico da secagem. As amostras secas foram avaliadas quanto aos teores de umidade, atividade de água, volume aparente, porosidade e capacidade de reidratação.

Tabela 3.2 - Esquema ilustrativo das condições experimentais testadas para secagem de pedaços de abacaxi

T°C	Período I	Período II
	P (W)	P (W)
55°C	166	89
	259	259
70°C	166	89
	166	259
	259	259

Para construção das isotermas de sorção dos pedaços de abacaxi seco, os frutos foram desidratados em temperatura do ar de 70°C com aplicação constante de potência de micro-ondas de 259W. A isoterma foi determinada pelo método gravimétrico estático, conforme descrito na metodologia do item 3.7.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Comparação das metodologias de análise de volume aparente

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as curvas de encolhimento dos pedaços de abacaxi para as três repetições. As curvas foram construídas em relação ao encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) e seu volume aparente analisados pelo método de deslocamento de fluido (ARQ) e imagem digital (ID) em função do tempo de secagem.

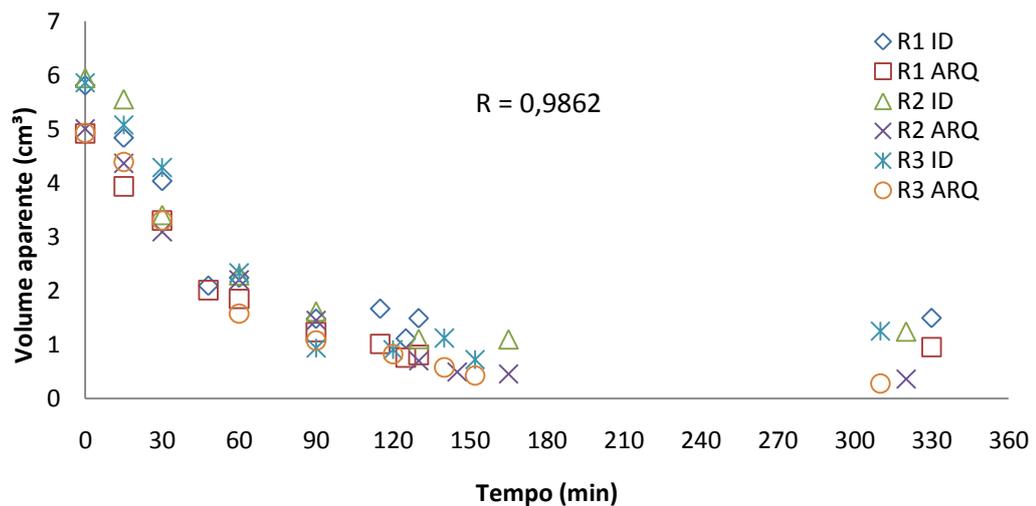


Figura 4.1 - Volume aparente do abacaxi seco em micro-ondas analisado pelo método de deslocamento de fluido e imagem digital em função do tempo de secagem.

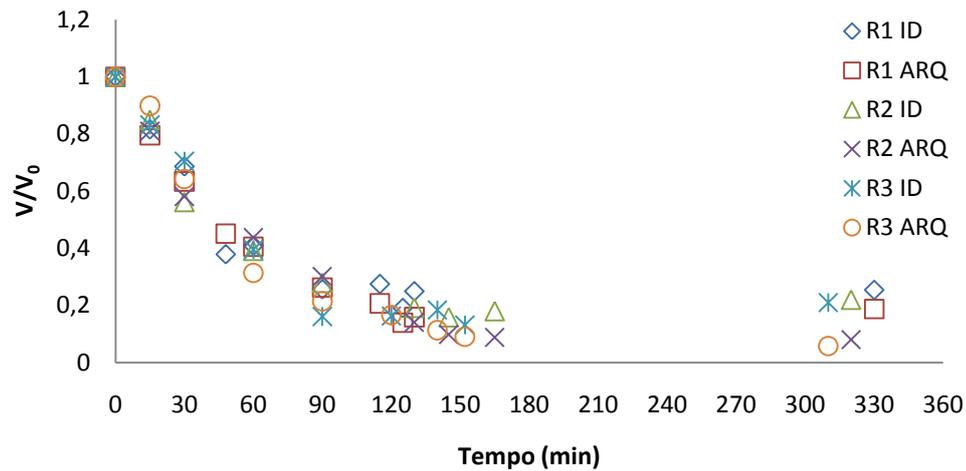


Figura 4.2 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) em função do tempo de secagem dos pedaços de abacaxi secos com micro-ondas e ar ( $70^\circ\text{C}$  e  $166\text{W}$ ) analisados pelos métodos deslocamento de fluidos e imagem digital

De acordo com os resultados a metodologia de imagem digital obteve valores de volume aparente em média 25,2% superiores aos encontrados pelo método de Arquimedes. Este resultado deve-se principalmente ao fato de a análise de imagem digital desconsiderar as imperfeições da superfície que são consideradas pelo princípio de Arquimedes. Mas, uma das principais vantagens da aplicação da análise de imagem digital é o fato de tratar-se de uma metodologia não destrutiva.

Observa-se na tabela 4.1 que a análise da imagem digital do produto seco resultou em um coeficiente médio de variação de 12,5% e o princípio de Arquimedes de 32,5%. Ou seja, o método de imagem digital resultou em uma menor dispersão dos dados e boa precisão, já que o coeficiente de variação (CV) é uma forma de estimar o erro experimental, e é uma das medidas estatísticas mais utilizadas pelos pesquisadores na avaliação da precisão dos experimentos. Se o coeficiente de variação for inferior a 10% considera-se o mesmo como baixo, ou seja, o experimento tem alta precisão, de 10% a 20% os coeficientes de variação são considerados médios, implicando em boa precisão, de 20% a 30% são julgados altos, significando baixa precisão e acima de 30% são tidos como muito altos, indicando baixíssima precisão (PIMENTEL-GOMES, 2009).

O coeficiente de correlação entre os dois métodos em relação ao volume aparente foi de 0,9862, uma excelente concordância entre os dados.

Tabela 4.1 - Coeficiente de variação (CV%) dos volumes aparentes dos pedaços de abacaxis secos medidos pela imagem digital e deslocamento de fluidos.

% Coeficiente de variação		
Repetição	<b>Imagem digital</b>	<b>Arquimedes</b>
1	8,820	26,278
2	19,189	36,078
3	9,523	35,315
Média	12,511	32,556

Yan *et al.* (2008) compararam diferentes métodos de medida de volume aparente no processo de encolhimento de banana, abacaxi e pedaços de manga durante a secagem com ar quente. Observaram que o princípio de Arquimedes com *n*-heptano produziu o menor coeficiente de variação para as fatias de banana e pedaços de abacaxi, seguido das fatias de manga. Porém, a análise de imagem utilizando um software Imagem J1.29X (National Institutes of Health, EUA, JAVA1.3.1 \_03) foi aplicada com sucesso para medir o diâmetro e para descrever as mudanças estruturais das frutas durante a secagem.

El-Aouar (2005) utilizou a análise de imagem para as medidas de dimensões, da área superficial e do volume aparente das amostras com o objetivo de estudar a cinética de encolhimento de mamão formosa (*Carica papaya L.*) fresco e pré-tratado osmoticamente. O autor determinou a área superficial através da impressão das fotos em folhas de papel, tamanho A4, recortando-se a forma da amostra e estabelecendo uma relação entre área e peso, considerando o mesmo papel. Obteve o volume aparente multiplicando a área superficial fotografada pela espessura média do material.

A metodologia de análise de imagem adotada neste estudo é menos trabalhosa que a utilizada por El-Aouar (2005), pois elimina a etapa de impressão e recorte das fotos.

## 4.2. Efeito da aplicação potência de micro-ondas constante e temperatura do ar na secagem

Neste item apresentam-se os resultados da avaliação do efeito da potência de micro-ondas constante aplicada e da temperatura do ar na secagem do abacaxi. Para isso serão apresentadas as cinéticas de secagem e a cinética de encolhimento para as diferentes temperaturas e potência de micro-ondas ao longo da secagem. Além disso, serão apresentados a caracterização do fruto *in natura*, a capacidade de reidratação, encolhimento e a porosidade do produto seco.

### 4.2.1. Caracterização da matéria-prima

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos das análises de caracterização dos frutos, utilizados nos ensaios de secagem com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente, realizados no forno de micro-ondas adaptado. Os valores de umidade (UV) são referentes às umidades iniciais das amostras, em base úmida, medidos no infravermelho.

Tabela 4.2- Características físicas e químicas do abacaxi *in natura*.

Experimentos	pH	SST (°Brix)	Umidade (g/100g)	Aw	Umidade (UV)
40°C - 166W	3,26 ± 0,08	12,14 ± 0,22	87,32 ± 0,42	0,988± 0,002	87,16 ± 0,81
40°C - 259W	3,21 ± 0,02	12,04 ± 0,18	87,62 ± 0,49	0,9898± 0,002	88,3 ± 0,98
40°C - 381W	3,49 ± 0,05	12,18 ± 0,49	87,76 ± 0,77	0,986± 0,002	87,26 ± 0,15
55°C - 166W	3,594 ± 0,02	11,02 ± 0,13	87,77 ± 0,95	0,991± 0,005	87,93 ± 0,82
55°C - 259W	3,63 ± 0,02	11,18 ± 0,21	88,02 ± 0,66	0,987 ± 0,001	87,2 ± 0,15
55°C - 381W	3,83 ± 0,01	10,5 ± 0,43	86,65 ± 1,76	0,991± 0,002	86,43 ± 0,31
70°C - 0W	3,41 ± 0,09	11,5 ± 0,55	87,79± 0,05	0,955± 0,060	86,50± 0,44
70°C - 166W	3,95 ± 0,01	12,27 ± 0,32	88,21 ± 0,59	0,992 ± 0,005	87,13 ± 1,32
70°C - 166W	3,42 ± 0,02	12,16 ± 0,18	87,82 ± 0,55	0,989± 0,002	87,3 ± 0,96
70°C - 166W	3,35 ± 0,02	13,96 ± 0,11	86,97± 1,36	0,989± 0,0002	87,76 ± 0,50
70°C -259W	3,59 ± 0,03	10,8 ± 0,82	88,89 ± 0,77	0,996± 0,003	86,33 ± 0,88
70°C - 381W	3,09 ± 0,08	10,42 ± 0,49	87,51 ± 0,43	0,991± 0,0009	87,03 ± 0,31
S/A - 381W	3,57 ± 0,09	13,72 ± 0,34	87,01± 1,69	0,987± 0,0006	87± 0,55
Média	3,5	12	87,6	0,9872	87,18
Desvio Padrão	0,2	1	0,6	0,0098	0,58
CV %	7	9	0,7	1	0,7

\*S/A = Sem ar quente

Os teores de umidade (bu) do abacaxi *in natura* estão de acordo com os encontrados por Valente (2007) e Taco, (2011). Seu alto teor de umidade e atividade de água, em média 87% e 0,98, respectivamente, o torna susceptível à deterioração tanto físico-química como microbiológica. Os frutos apresentaram pH de 3,49 em média e sólidos solúveis totais de 11,83 °Brix. Algumas variações foram observadas, no entanto, os resultados obtidos para umidade, sólidos solúveis totais, pH e atividade de água, estão bastante próximos dos valores registrados na literatura, e as variações devem-se ao grau de maturação das frutas analisadas e a diferenças na composição centesimal da fruta em relação à época do ano e à região de cultivo. Os abacaxis neste estudo foram colhidos no mês de setembro, sendo que a melhor safra ocorre no verão, de novembro a fevereiro, apresentando um fruto com maior teor de açúcares e menos ácido (BLEINROTH, 1987).

Valente (2007) e Sarzi e Durigan (2002) encontraram teores de sólidos solúveis totais de 13,4 e 13,7 °Brix, respectivamente, e Ramallo e Mascheroni (2012) teores de 11,2 e 12,8 °Brix. Para o pH foram observados valores similares aos de Silva *et al.* (2003), Sarzi e Durigan (2002) e Rodrigues (2006), os quais encontraram valores entre 3,7 a 4,1, respectivamente.

#### **4.2.2. Avaliação da cinética de secagem**

Verifica-se pelas Figuras 4.3 a 4.6 e tabela 4.3 que a potência de micro-ondas e a temperatura do ar de secagem afetaram o tempo de processo. Comparando os ensaios realizados com e sem a utilização da energia de micro-ondas (Figura 4.6) o último apresentou um maior tempo de secagem para atingir o mesmo conteúdo de umidade. A redução do tempo de secagem com aplicação de potências de micro-ondas de 381W e temperatura do ar de 70°C foi de 265 minutos e de 245 minutos com aplicação apenas de micro-ondas em comparação à condição sem aplicação da potência de micro-ondas.

Com a utilização de condições mais extremas, temperatura a 70°C e potência de micro-ondas de 381W, o tempo de secagem pôde ser reduzido comparado ao tempo de secagem sem aplicação de potência, mas levou ao aparecimento de pedaços de abacaxi queimado em função do aquecimento não uniforme ou do excesso de energia. Este mesmo efeito foi observado no

experimento com apenas aplicação de potência de micro-ondas (Figura 4.6). Além disso, quando se aumentou a temperatura do ar de 40°C para 55°C com potência de 259W o tempo foi reduzido em 105 minutos. Mesmo analisando em uma mesma temperatura do ar de secagem, tendo como parâmetro de análise o tempo demandado para a amostra atingir o teor de umidade desejado, o processo realizado com potências maiores levou menores tempos para a secagem.

Prabhanjan *et al.* (1995), compararam a secagem de cubos de cenouras em micro-ondas adaptados com a secagem convencional e observaram que a secagem com micro-ondas resultou em diminuição de 25 a 90% no tempo de secagem, mas a qualidade do produto era melhor quando secos com potências mais baixas. Maskan (2001) observou que a secagem de kiwi por micro-ondas combinada com ar quente resultou em aumento da taxa de secagem e redução do tempo de secagem em relação às secas apenas com energia de micro-ondas. Ainda, Maskan (2000) obteve uma redução do tempo de secagem de banana em 63,4% quando utilizou micro-ondas comparado com a secagem convectiva.

Botha *et al.* (2012, b), confirmam que altas potências de micro-ondas precisam ser reduzidas mais rapidamente do que a diminuição no teor de água poderia sugerir para minimizar a carbonização. Os mesmos autores relatam que o uso da energia de micro-ondas variável combinada com a baixa temperatura do ar pode resultar em um processo de secagem rápida, evitando a carbonização de pedaços de abacaxi.

As vantagens na redução do tempo de secagem e a melhoria da qualidade dos frutos secos ocasionada pela utilização de micro-ondas são conhecidas. No entanto, o encolhimento durante o processo de secagem ainda não é.

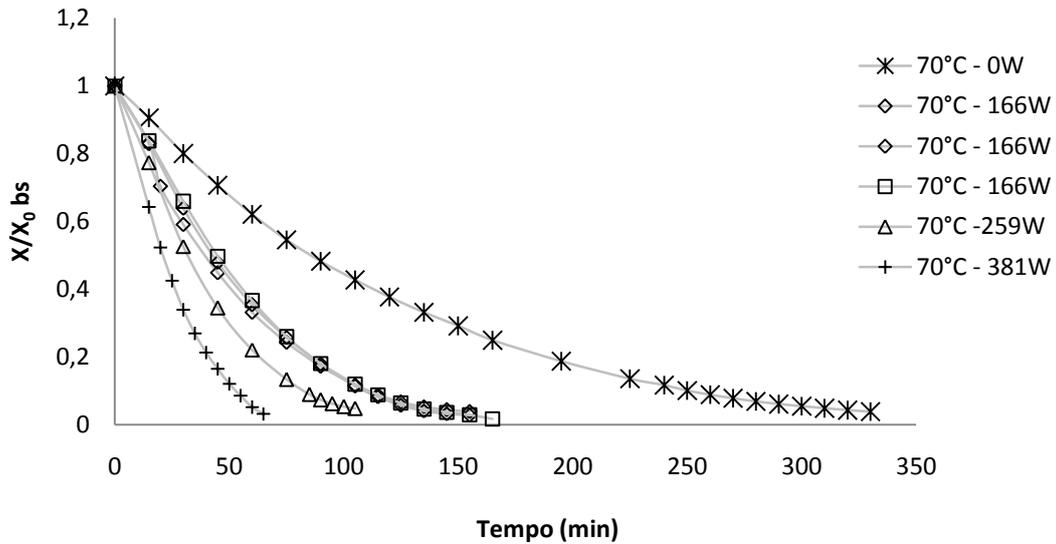


Figura 4.3 - Umidade adimensional em função do tempo dos pedaços de abacaxi secos à temperatura fixa de 70°C nas quatro condições de potência de micro-ondas.

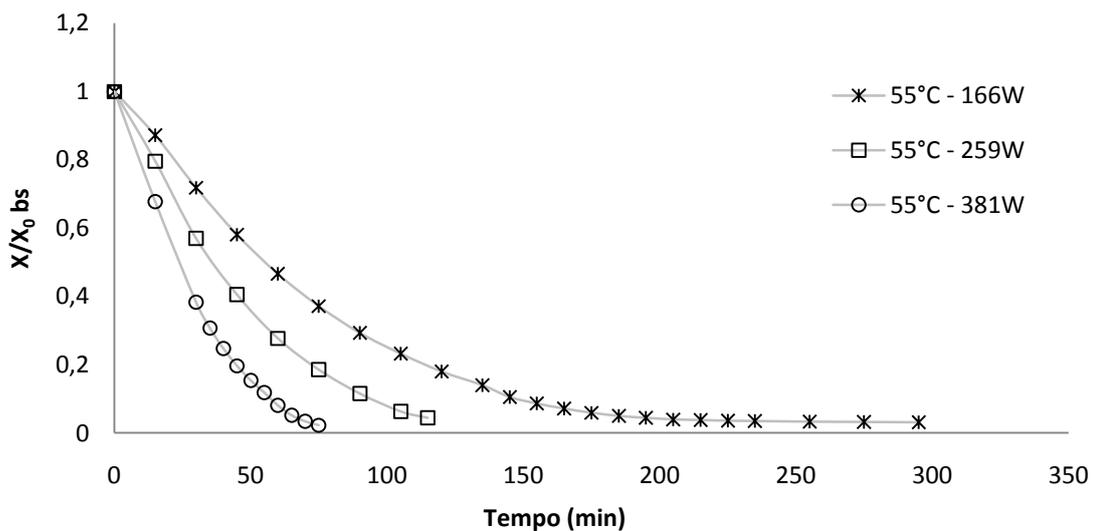


Figura 4.4 - Umidade adimensional em função do tempo dos pedaços de abacaxi secos à temperatura fixa de 55°C e potência de micro-ondas de 166W, 259W e 381W.

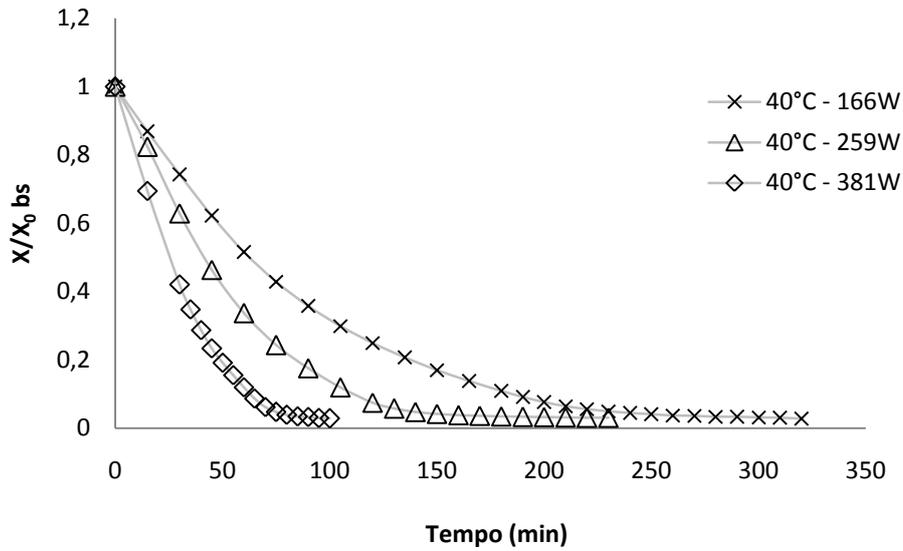


Figura 4.5 - Umidade adimensional em função do tempo dos pedaços de abacaxi secos à temperatura fixa de 40°C e potência de micro-ondas de 166W, 259W e 381W.

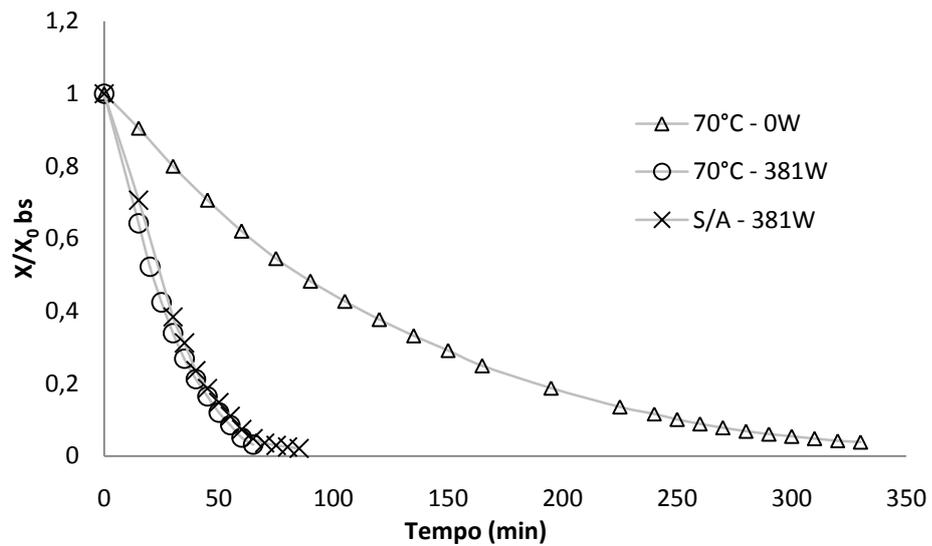


Figura 4.6 - Umidade adimensional em função do tempo dos pedaços de abacaxi secos com e sem aplicação de potência de micro-ondas e ar quente.

Tabela 4.3 - Tempo final de secagem nas diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem

Tempo final (min)	
40°C - 166W	320
40°C - 259W	230
40°C - 381W	100
55°C - 166W	295
55°C - 259W	125
55°C - 381W	75
70°C - 0W	330
70°C - 166W	155
70°C - 166W	155
70°C - 166W	165
70°C - 259W	105
70°C - 381W	65
S/A - 381W	85

As Figura 4.7 a 4.9 ilustram as curvas de taxa de secagem dos pedaços de abacaxi, utilizando potência de micro-ondas de 0W, 166W, 259W e 381W combinadas com temperaturas do ar quente de 40°C, 55°C, 70°C e sem a aplicação do ar de secagem.

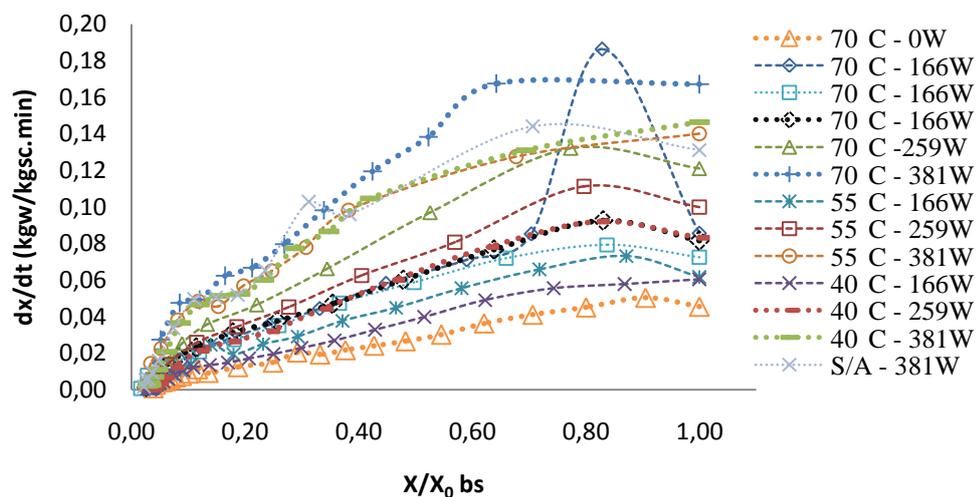


Figura 4.7 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem.

\*S/A = Sem ar quente

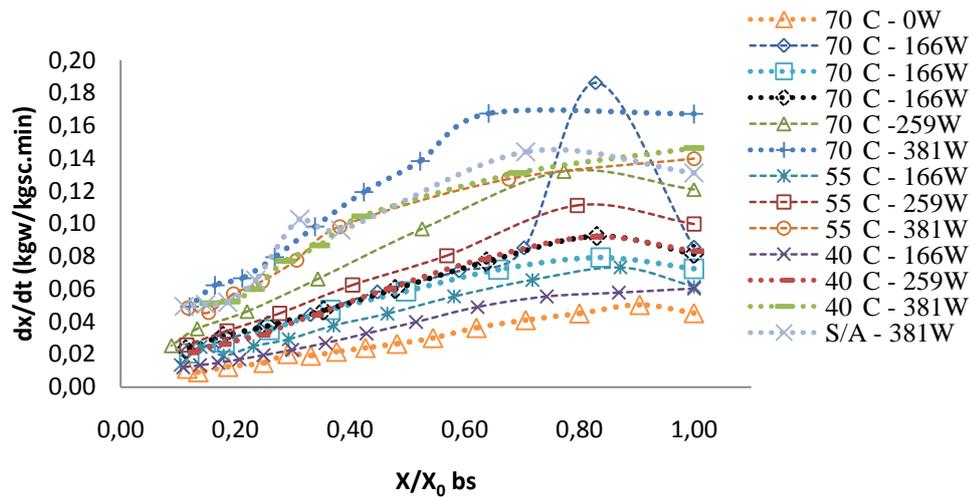


Figura 4.8 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem até 40% de umidade (bu).

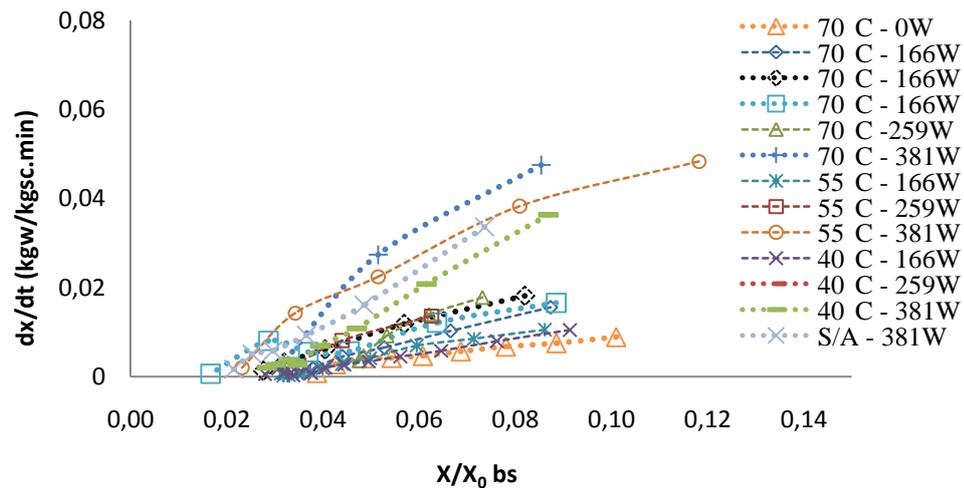


Figura 4.9 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem de 40% a 15% de umidade (bu).

Pelas Figuras 4.7 a 4.9 observa-se que a temperatura do ar de secagem e a potência de micro-ondas influenciaram a cinética de secagem, sendo que o aumento da potência aumentou a velocidade de secagem dos pedaços de abacaxi. As Figuras ilustram um rápido período de taxa crescente, seguido de dois períodos decrescentes. Para as condições experimentais adotadas, a taxa de secagem constante não foi observada. Isto significa que a quantidade de água disponível no interior do sólido não é suficiente para manter as condições de

saturação na superfície. Desse modo, a pressão de vapor da água na superfície não é igual à pressão de vapor da água pura na temperatura do produto.

Observou-se que as taxas de secagem são mais altas no início do processo de secagem, quando o conteúdo de umidade adimensional (bs) é maior. Para potências de micro-ondas de 381W e temperaturas de 70°C foi observado a maior taxa de secagem, o contrário foi observado quando utilizou temperatura de 40°C e menor potência, 166W. Nos primeiros 15 minutos, em algumas condições, ocorre um leve aumento, a partir deste ponto ocorre um rápido declínio nas taxas de secagem para todos os ensaios. Após esse período de rápido declínio nas taxas de secagem e abaixo de um determinado conteúdo de umidade, as curvas de taxa de secagem continuam a cair mais lentamente até o final do processo.

Analisando a evolução da temperatura ao longo da secagem (Figura 4.10), observa-se também que um aumento na potência de micro-ondas proporcionou um aumento na temperatura do produto para uma mesma condição de temperatura do ar. Resultados semelhantes foram observados por Pereira (2007), que fez um estudo sobre a aplicação de micro-ondas na secagem de banana desidratada osmoticamente, que em algumas condições levou a carbonização do produto.

Portanto, quanto maior a potência de micro-ondas aplicada, maior é o aumento de temperatura do material ao longo do tempo. A taxa de aumento da temperatura é menor para potências de micro-ondas mais baixas.

Apesar de ser observado que o aumento da temperatura do ar e da potência de micro-ondas proporcionou uma taxa de secagem maior, o aumento da temperatura da amostra em algumas dessas condições levou a queima de alguns pedaços de abacaxi na bandeja. Tal comportamento está intimamente relacionado com a redução do conteúdo de umidade e do volume neste período, o que poderia estar dificultando a saída de água e levando ao superaquecimento do produto seco.

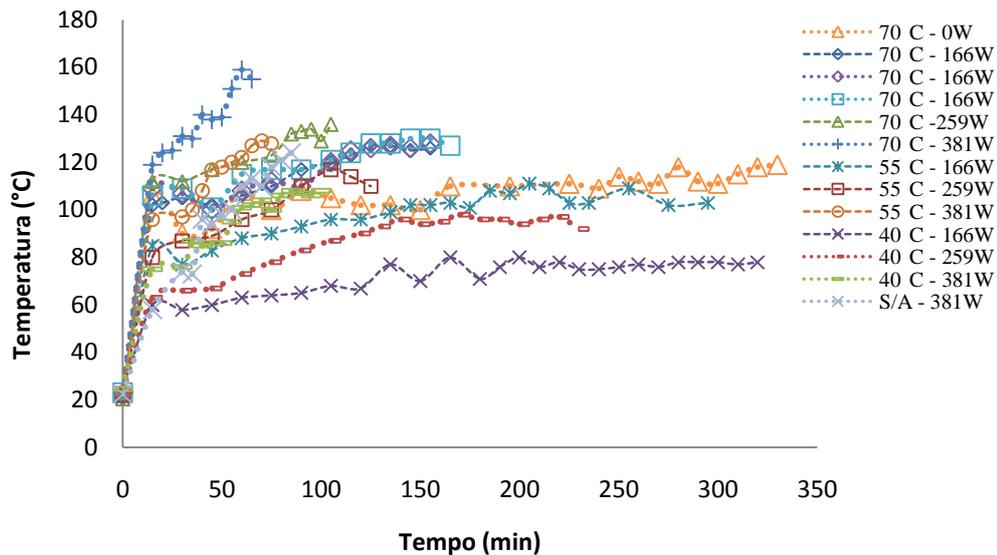


Figura 4.10 - Temperatura superficial média dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem.

#### 4.2.3. Ajuste por modelos matemáticos

As Figuras 4.11 a 4.14 apresentam os ajustes dos dados das curvas de secagem dos pedaços de abacaxi ao modelo de Page (Equação 2-7) para todos os ensaios.

Os parâmetros do modelo ( $k$  e  $n$ ) com seus respectivos desvios padrões encontram-se na Tabela 4.4, juntamente com os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Verifica-se que os dados experimentais ajustaram muito bem ao modelo de Page, apresentando baixos valores de desvio padrão e  $R^2$  próximos de 1, explicando no mínimo 99,8% das variações dos dados observados. Portanto, pode ser considerado um bom modelo para prever a cinética de secagem de pedaços de abacaxi por convecção assistidos por energia de micro-ondas.

VEGA *et al.* (2006) também notaram em sua pesquisa, que se tratava da modelagem matemática da cinética de secagem de pimentão vermelho, que o modelo de Page apresentou melhor ajuste da cinética de secagem do que os modelos Exponencial e de Henderson-Pabis. Assim como Pereira (2007), estudando a aplicação de micro-ondas na secagem de bananas tratadas osmoticamente e Hofsky *et al.* (2009) para secagem de abacaxi, observaram que o modelo de Page ajustou melhor aos dados experimentais, podendo ser

aplicados na predição da secagem de frutas.

Tabela 4.4 - Parâmetros e coeficientes de determinação do modelo de Page

Modelo de Page						
T°C	P (w)	K (min <sup>-1</sup> )	Dp (min <sup>-1</sup> )	n	Dp	R <sup>2</sup>
40°C	166W	0,0071	0,0003	1,11	0,01	0,9995
	259W	0,008	0,001	1,19	0,03	0,9977
	381W	0,0108	0,0008	1,29	0,02	0,9993
55°C	166W	0,006	0,0005	1,19	0,02	0,9987
	259W	0,0077	0,0005	1,25	0,02	0,9996
	381W	0,009	0,001	1,35	0,03	0,9991
70°C	0W	0,0049	0,0003	1,11	0,01	0,9993
	166W	0,01	0,001	1,15	0,02	0,9981
	166W	0,0057	0,0004	1,27	0,02	0,9994
	166W	0,0049	0,0002	1,31	0,01	0,9997
	259W	0,0083	0,0003	1,274	0,009	0,9999
	381W	0,012	0,001	1,32	0,02	0,9991
S/A	381W	0,0072	0,0004	1,43	0,02	0,9997

Observa-se na Tabela 4.4, que os valores de K aumentaram com o aumento da potência de micro-ondas e da temperatura do ar de secagem, como era esperado para todas as amostras. Com a utilização de condições mais extremas, temperatura de 70°C e potência de micro-ondas de 381W, os valores de K apresentaram-se 60% e 41% maiores em comparação com a condição sem utilização do ar quente de secagem e com apenas micro-ondas, respectivamente. A constante n foi crescente com o aumento da temperatura do ar e da potência de micro-ondas. Segundo Pereira (2007) e Heredia *et al.* (2007), a relação entre o aumento do parâmetro K e a potência é linear e está de acordo com os resultados encontrados na literatura para secagem com aplicação de micro-ondas em diversos produtos alimentícios.

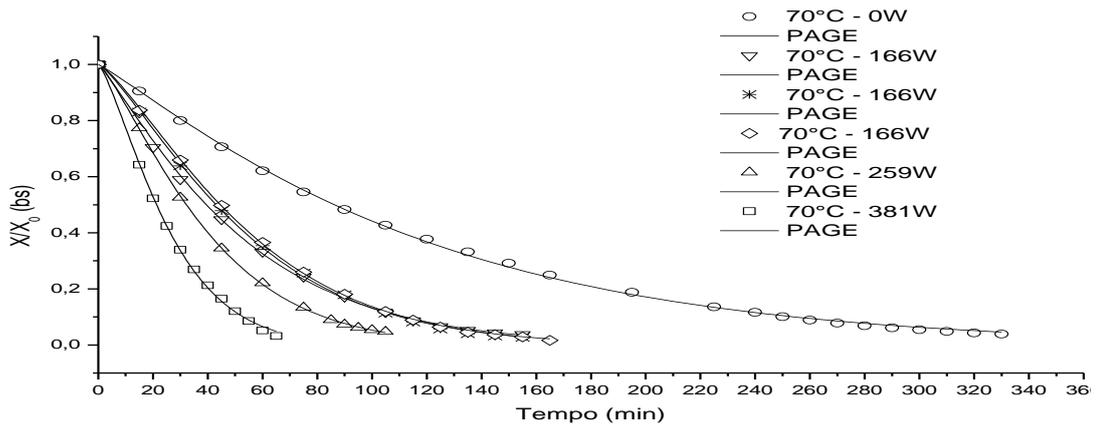


Figura 4.11 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page para temperaturas fixas em 70°C.

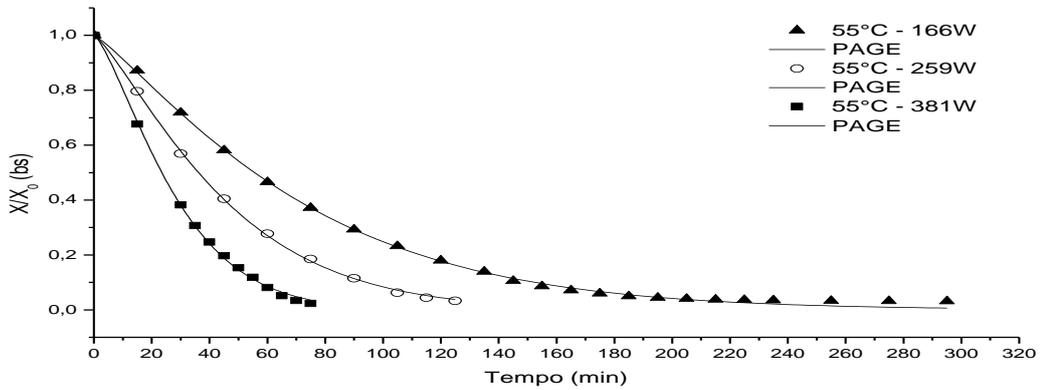


Figura 4.12 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page para temperaturas fixas em 55°C.

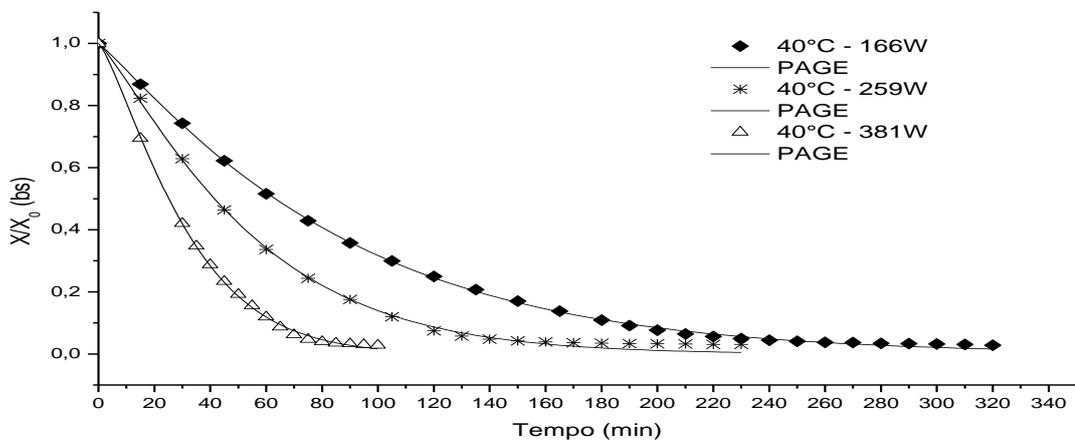


Figura 4.13 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page para temperaturas fixas em 40°C.

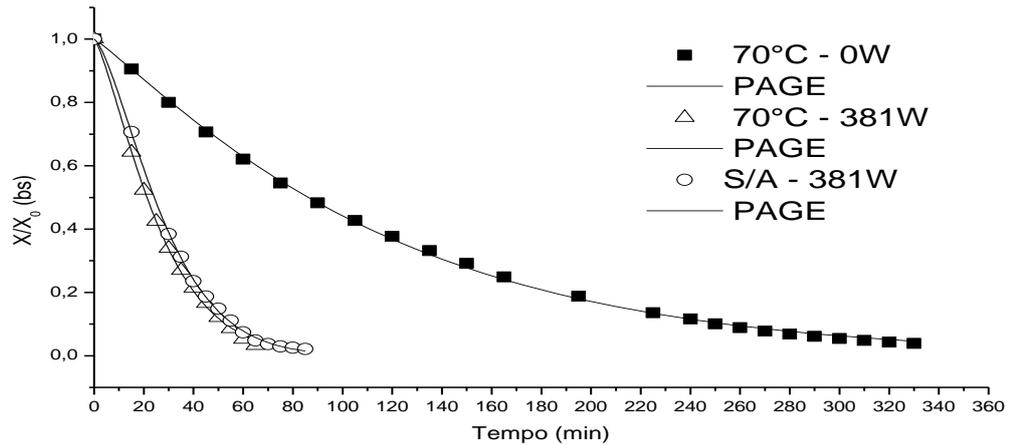


Figura 4.14 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com e sem aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page.

#### 4.2.4. Cinética de encolhimento

As Figuras 4.15 a 4.19 apresentam a cinética de encolhimento por meio da razão de volume ( $V/V_0$ ) das amostras de abacaxi em relação à umidade adimensional em base seca representada por ( $X/X_0$ ). O fenômeno do encolhimento foi observado em todas as condições de processo estudadas, e possivelmente está relacionado com a deformação do produto e colapso da estrutura celular. Mayor e Sereno (2004) argumentam que o encolhimento de materiais biológicos aumenta com o aumento do volume de água removida, uma vez que, quanto maior a quantidade de água removida do material, maior serão as tensões de contração originadas no interior do mesmo. Observou-se que o encolhimento foi linear para todas as condições experimentais adotadas. Uma excelente concordância foi encontrada entre os dados experimentais e previstos por ajuste linear ( $R^2 \geq 0,983$ ) (Apêndice 2). Resultados semelhantes foram encontrados por López *et al.* (2012) estudando o encolhimento de chuchu na secagem com temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C. Contudo, a partir de  $X/X_0$  igual a 0,1, que representa o final do processo de secagem, a maioria das curvas obtidas indica uma estabilização do volume, que correspondente ao enrijecimento das amostras em umidades muito baixas. Esse comportamento já foi observado por Nicoletti (2001) ao estudar a cinética de encolhimento de fatias de abacaxi em secador de bandejas. O comportamento linear do encolhimento também foi

observado por Raghavan & Silveira (2001) na secagem de morango osmoticamente desidratado com aplicação de micro-ondas, Khraisheh *et al.* (2004) na secagem com micro-ondas em alimentos ricos em amido, Hatamipour e Mowla (2002) no encolhimento de cenouras durante a secagem em leito fluidizado com inerte e por Michelis *et al.* (2008) na desidratação de cerejas, enquanto Hofsetz (2007) observou o comportamento linear do encolhimento nos estágios iniciais da secagem, seguido de um ligeiro desvio da linearidade para valores baixos de conteúdo de umidade, na secagem de banana nanica submetida com pulsos HTST.

Comparando o encolhimento deste estudo com outros processos de secagem, este apresentou ter reduzido seu volume ( $V/V_0$ ) em maior porcentagem, aproximadamente 10% a 15% dependendo da condição, em relação a outros processos de secagem como na secagem de banana nanica submetida a pulsos HTST (High Temperature and Short Time) Hofsetz (2007). O autor observou um decréscimo do volume  $V/V_0$  de 30% a 59% do volume inicial da amostra. Estes valores foram alcançados em função dos pulsos HTST proporcionarem o efeito *puffing* que promoveu o aumento do volume da banana a partir da liberação da água em seu interior, propiciando a expansão da estrutura.

Diferente de El-Aouar (2005), que obteve uma redução do seu volume  $V/V_0$  de aproximadamente 10% na secagem convectiva de mamão formosa (*Carica papaya L.*) fresco e 20% a 30% nos frutos pré-tratados osmoticamente e secos por convecção. Mas, Khraisheh *et al.* (2004), que compararam a secagem com micro-ondas ( 10,5W, 15W, 60W) e ar quente ( 30°C, 40°C, 60°C), afirmaram que produtos ricos em amidos levaram ao menor encolhimento quando secos com aplicação de micro-ondas. Além disso, Raghavan & Silveira (2001) no pré-tratamento osmótico para secagem de morangos com aplicação de micro-ondas a 0,1 e 0,2W/g, relataram em seu trabalho que a taxa de encolhimento foi de 8% a 18%.

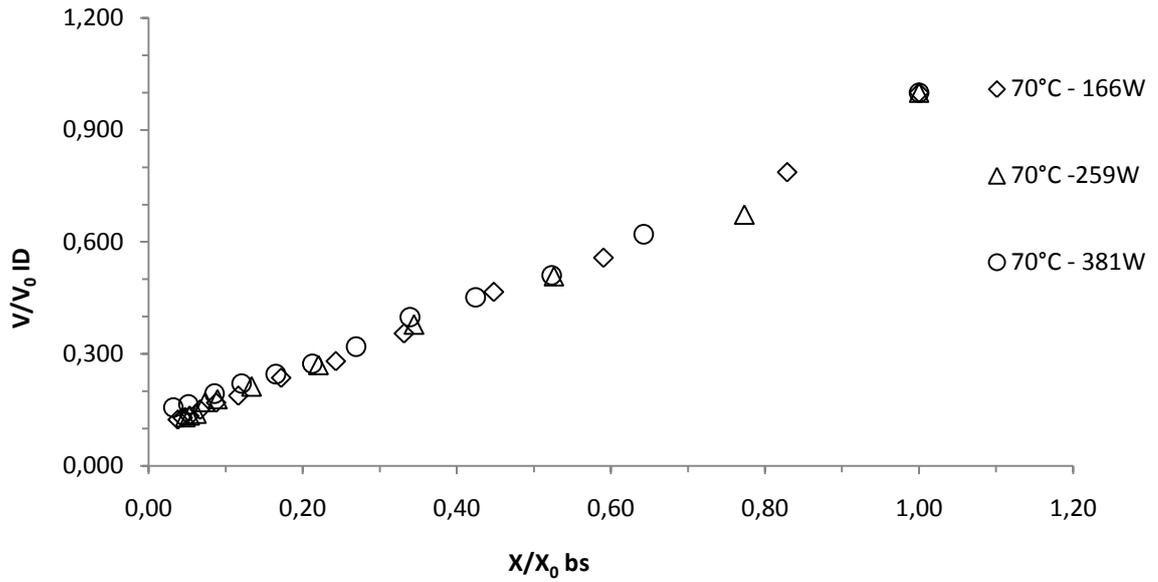


Figura 4.15 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratado versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 70°C.

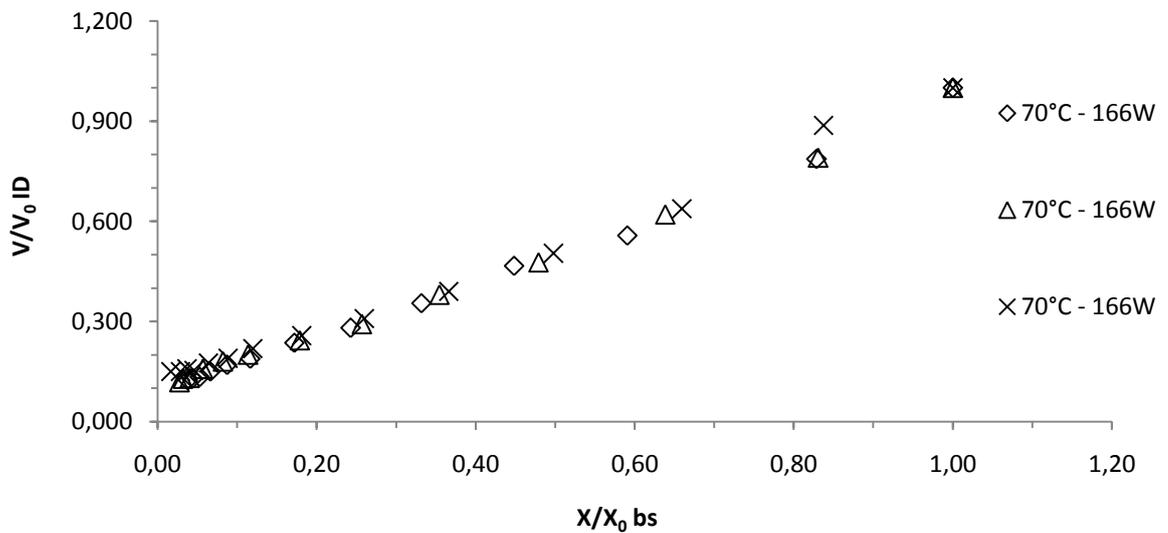


Figura 4.16 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratado versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 70°C para potências fixas a 166W.

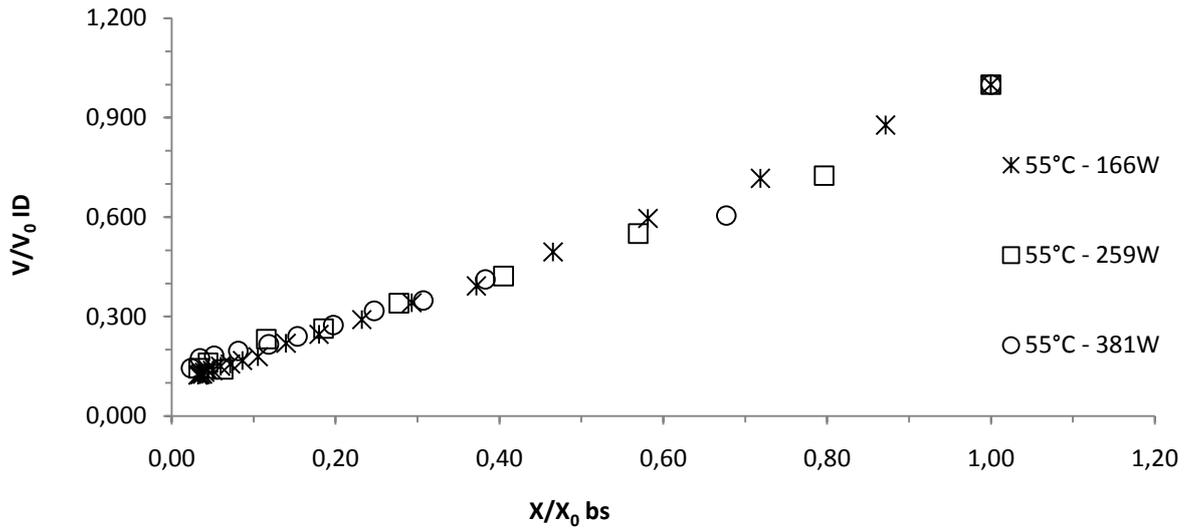


Figura 4.17 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratado versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 55°C.

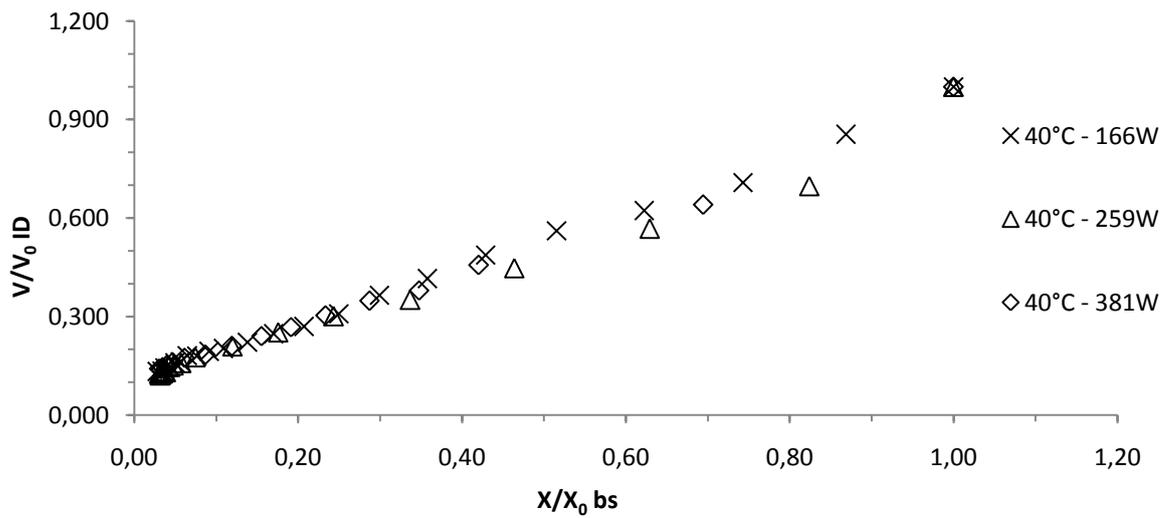


Figura 4.18 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratado versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 40°C.

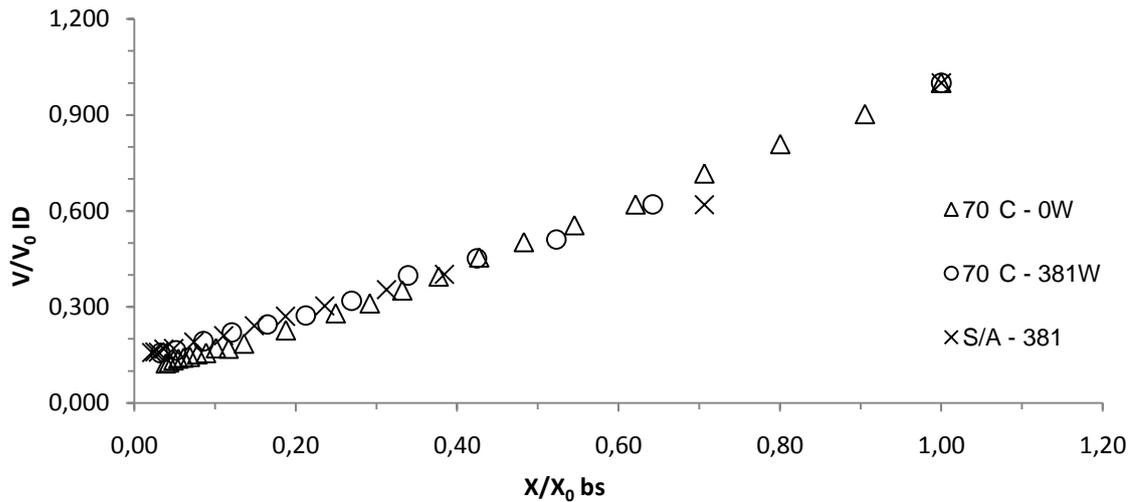


Figura 4.19 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratado versus umidade adimensional (bs) com e sem aplicação de energia de micro-ondas e ar quente.

Nas Figuras 4.20 a 4.23, que ilustram  $V/V_0$  em função do tempo ( $t$ ), observa-se que os tempos de secagem foram menores quando utilizaram uma maior potência para um mesmo conteúdo de umidade. Além disso, potências mais altas necessitaram de menos tempo para atingir um mesmo grau de encolhimento. Não foram observadas diferenças no comportamento da redução do volume para um mesmo período de tempo na potência de micro-ondas de 381W a 40°C e sem utilização do ar quente de secagem. Não há diferenças significativas em nível de  $P < 0,05$  pelo teste de F no encolhimento volumétrico final das amostras secas nas condições do processo estudadas, mas há uma tendência da elevação das potências proporcionarem um aumento de  $V/V_0$  (Figura 4.24), ou seja, reduzir o encolhimento, para temperaturas de 70°C e 55°C. Efeito contrário é observado para 40°C. Além disso, observou-se que para uma mesma potência de micro-ondas o tempo gasto para atingir o mesmo encolhimento foi menor em temperaturas do ar mais elevadas. Os mesmos efeitos foram observados até o final do processo de secagem, correspondente a 15% de umidade. Segundo Nicoletti (2001), estes efeitos são compatíveis com a teoria da transição vítrea, considerando-se que a secagem a temperaturas mais baixas expõe o material a temperaturas maiores que a ambiente por um período prolongado. As altas taxas de secagem, devido a altas temperaturas do ar e maiores potências, podem provocar uma desidratação muito rápida na superfície do material, passando ao estado vítreo, que é caracterizado por uma estrutura rígida. O mesmo autor estudando o encolhimento das fatias de abacaxi em um

secador de bandejas com diferentes velocidades do ar e temperaturas, concluiu que o encolhimento volumétrico não sofre variações quando os ensaios são conduzidos a velocidades altas, porém para velocidades menores, o encolhimento é mais acentuado à medida que a temperatura decresce. Enquanto El-Aouar (2005) ao estudar o processo de secagem de mamão formosa fresco e pré-tratado osmoticamente observou que para um mesmo tempo de secagem, as amostras processadas em sacarose sofreram um encolhimento volumétrico maior do que as amostras desidratadas em xarope de milho. Isto mostra que quanto maior a perda de água, devido ao processo, maior a redução no volume da amostra.

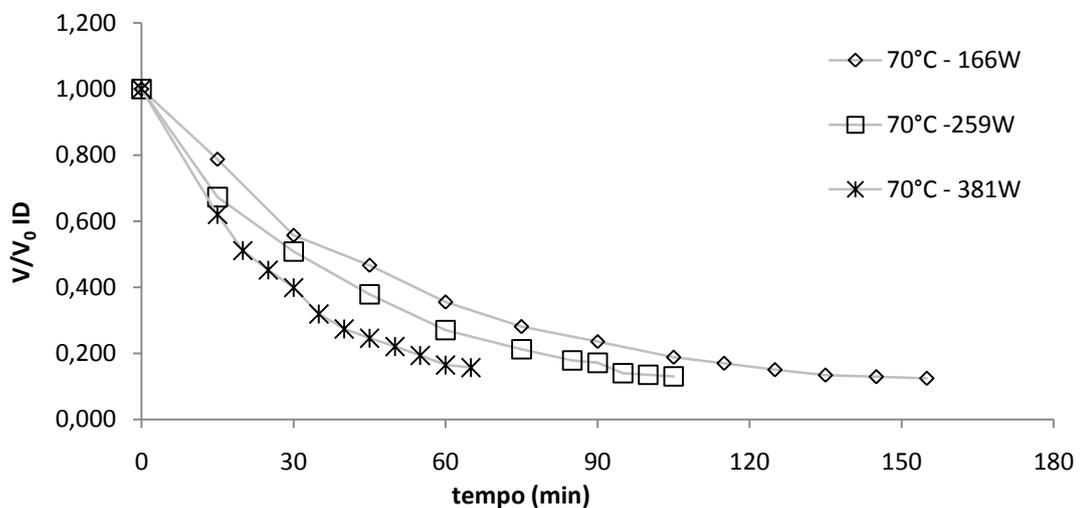


Figura 4.20 - Cinética de encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo para temperaturas fixas em 70°C.

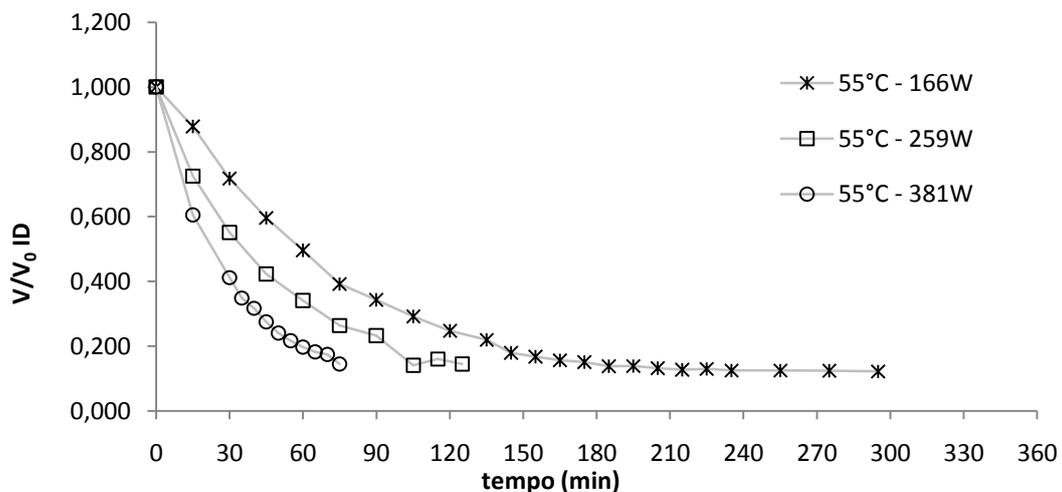


Figura 4.21 - Cinética de encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo para temperaturas fixas em 55°C.

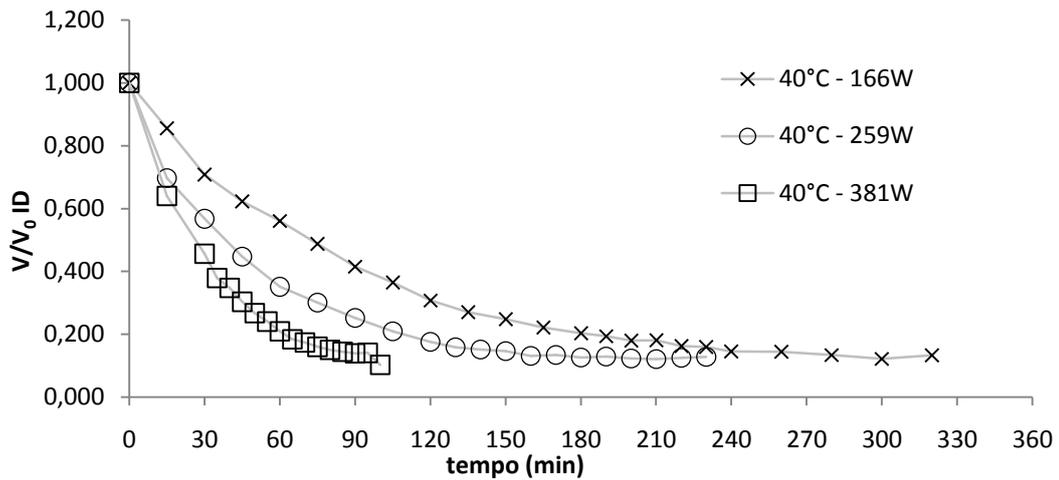


Figura 4.22 - Cinética de encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo para temperaturas fixas em 40°C.

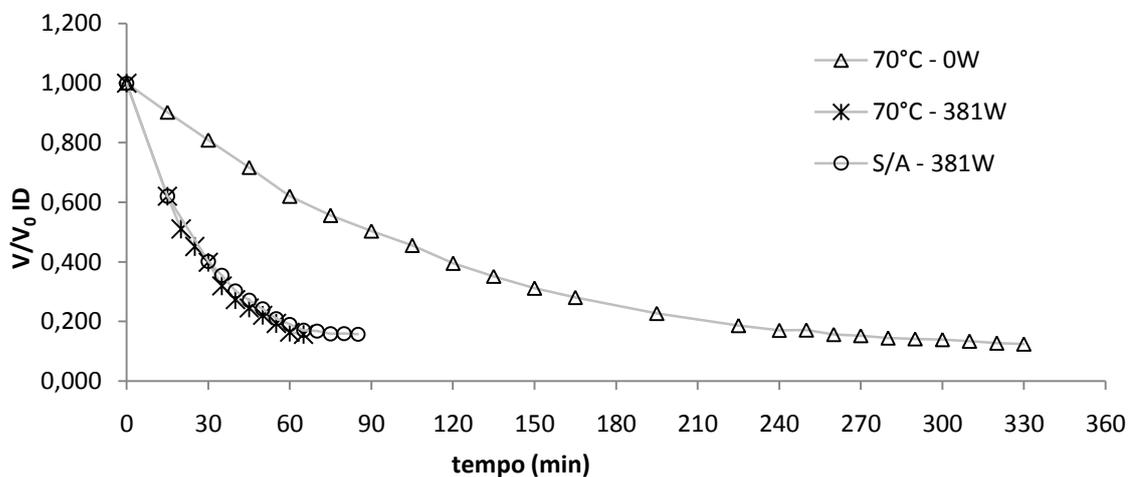


Figura 4.23 - Cinética de encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo com e sem aplicação de energia de micro-ondas e ar quente.

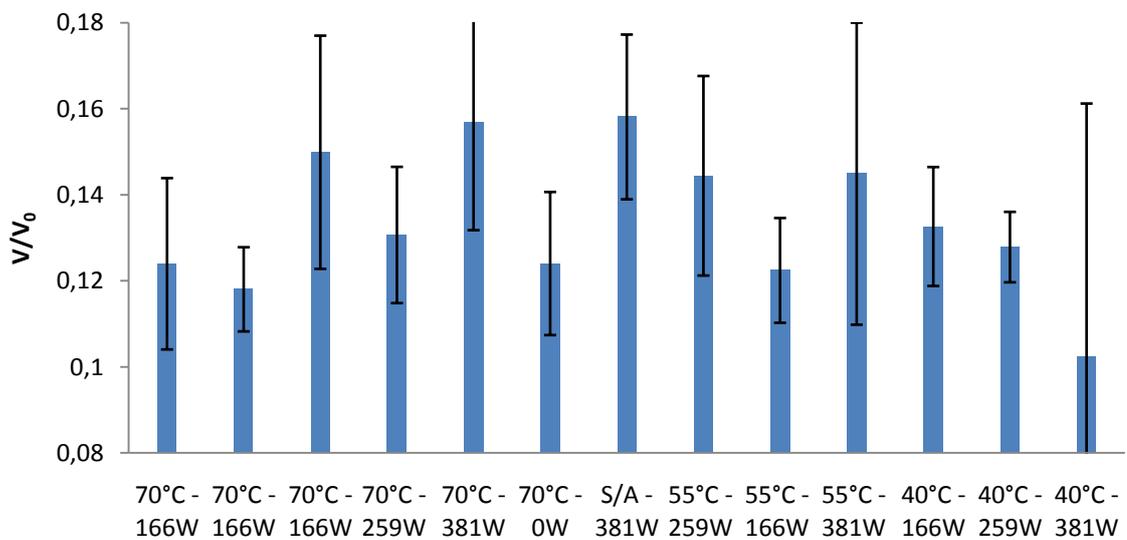


Figura 4.24 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratados em todas as condições de temperatura e potências de micro-ondas.

As Figuras 4.25 a 4.27 ilustram a variação no volume de água removida durante o processo de secagem como função da variação do volume das amostras devido ao processo de secagem para as amostras secas em diferentes temperaturas e potência de micro-ondas.

É possível observar a diminuição da mobilidade da matriz sólida. Percebe-se que, independente da condição utilizada, o encolhimento quase inteiramente compensa a perda de umidade, e o volume do material diminui linearmente com a redução do teor de umidade, como discutido anteriormente. No entanto, para baixos teores de umidade, o volume de água removido é maior do que a redução no volume da amostra. Kurozawa *et al.* (2011) observaram o mesmo comportamento na secagem convectiva de mamão a 40°C e 70°C e explicam que este fato ocorre porque a diferença da transição vítrea e temperatura do produto ( $T_p - T_g$ ), que regula a taxa de mobilidade de matriz, diminui durante o processo final. Além disso, tal fato dificulta o encolhimento, mas como ainda existe saída de água do material, em quantidade mínima, isto é um indício de que este esteja se tornando cada vez mais poroso ao final do processo, ou seja, a rigidez do material para o encolhimento e formação de poros pode ocorrer em paralelo (EL-AOUAR, 2005).

Mayor e Sereno (2004) explicam que a mobilidade da matriz sólida está intimamente relacionada com o seu estado físico; alta mobilidade corresponde a um comportamento visco elástico característico de um estado semelhante à borracha, enquanto a baixa mobilidade corresponde a um comportamento elástico característico de um estado vítreo. Em teores de umidade elevada, quando o material está no estado semelhante à borracha, o encolhimento quase inteiramente compensa a perda de umidade, e o volume do material diminui linearmente com a redução do teor de umidade. Em baixos conteúdos de umidade,  $T_g$  aumenta, permitindo que o material passe de borracha para estado vítreo, e a taxa de encolhimento diminua significativamente.

Diante dos resultados, parece não haver um comportamento definido com relação à temperatura de processo e às potências de micro-ondas. Isto sugere que o encolhimento das amostras seja apenas em função de seus conteúdos de umidade.

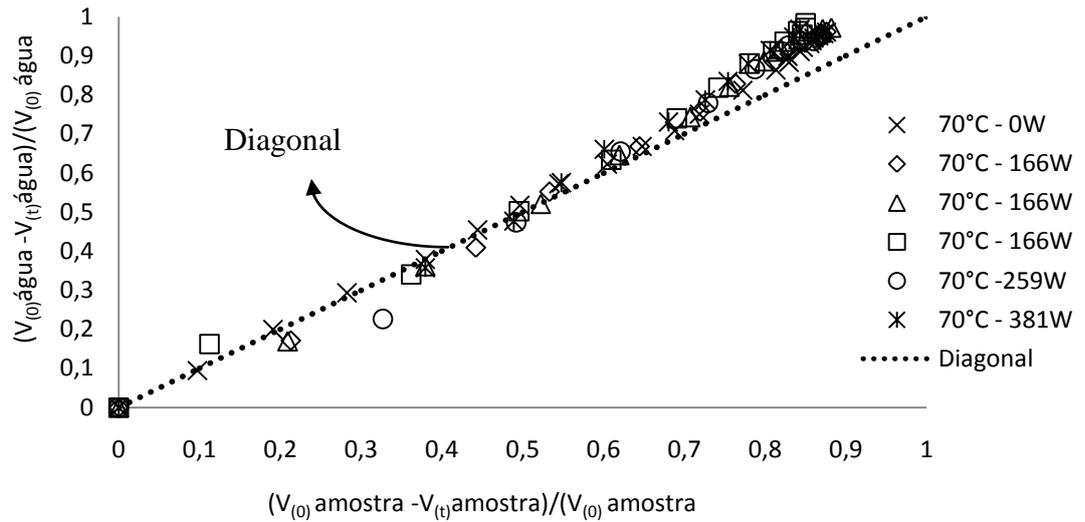


Figura 4.25 - Variação do volume de água removido das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de pedaços de abacaxi em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas de processo.

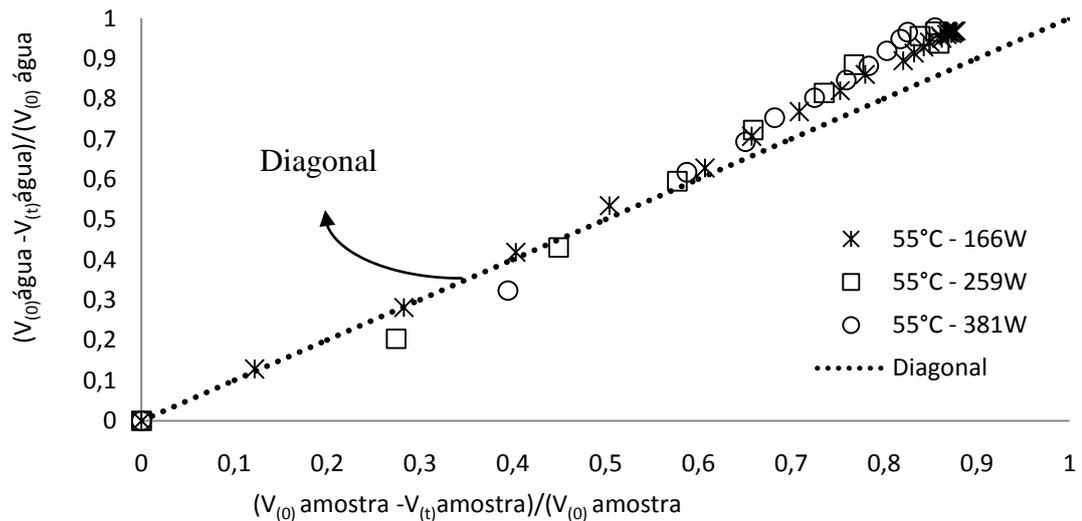


Figura 4.26 - Variação do volume de água removido das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de pedaços de abacaxi em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas de processo.

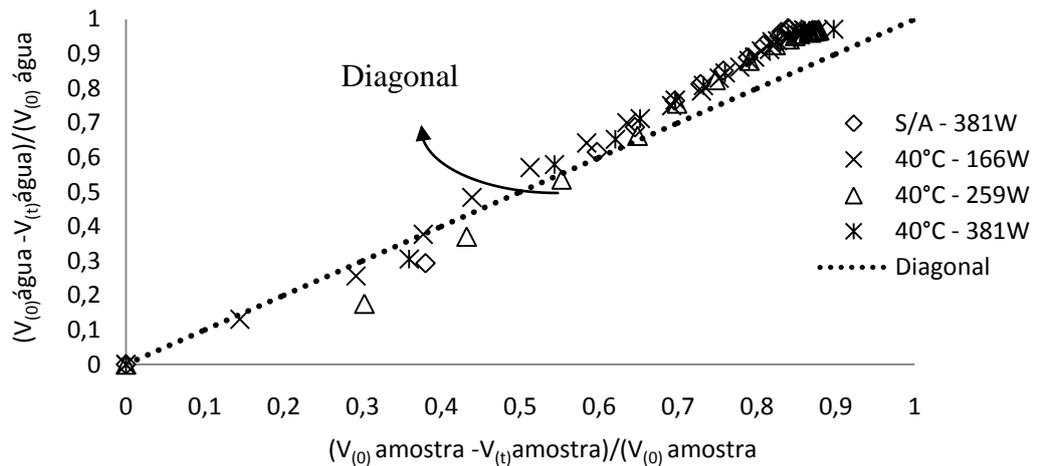


Figura 4.27 - Variação do volume de água removido das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de pedaços de abacaxi em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas de processo.

A fim de compreender melhor o fenômeno do encolhimento durante o processo de secagem convectiva assistida por micro-ondas, foi observado o efeito dos diferentes níveis de potências e temperaturas do ar de secagem na espessura (mm) e área superficial (cm<sup>2</sup>) dos pedaços de abacaxi. A Figura 4.28 mostra as variações da espessura e área superficial nas diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do processo de secagem em função do conteúdo de umidade das amostras. A dimensão que mais sofreu variação foi a espessura, chegando a, aproximadamente, 69% do seu valor inicial, considerando o mesmo conteúdo de umidade, na condição de 70°C/166W. No entanto, para a maioria dos experimentos, ao longo da secagem, considerando o mesmo conteúdo de umidade, não foi verificado diferenças no percentual de redução entre a espessura e área superficial, ou seja, apresentaram um encolhimento linear. Além disso, é possível observar uma estabilização das medidas no final do processo de secagem, provas do endurecimento superficial em baixas umidades causadas pelo superaquecimento e / ou de secagem prolongados, resultando em irreversíveis alterações físico-químicas.

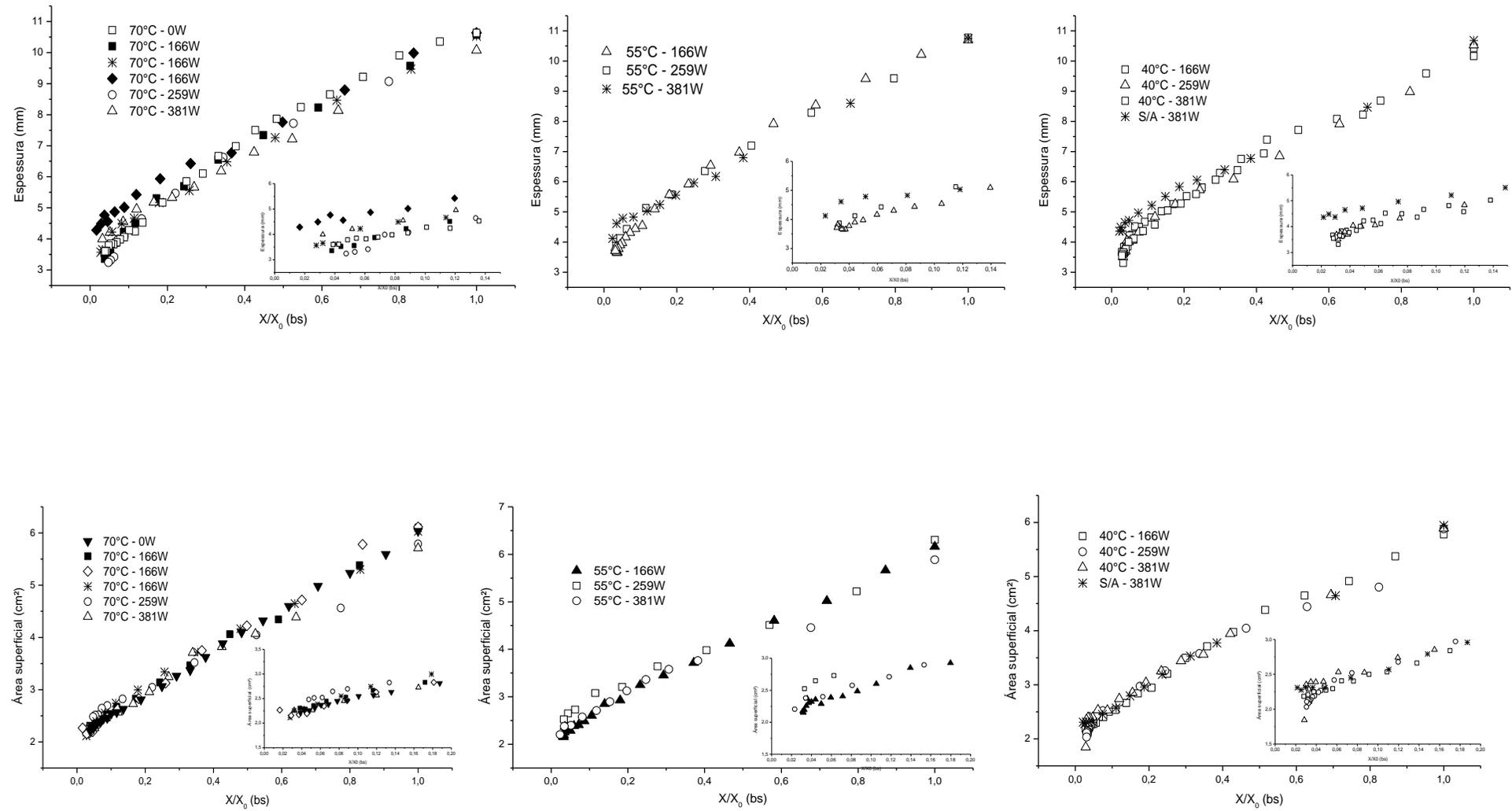


Figura 4.28 - Variação da espessura (mm) e área superficial ( $\text{cm}^2$ ) versus umidade adimensional ( $X/X_0$ ) dos pedaços de abacaxi Desidratados em todas as condições de temperatura e potências de micro-ondas. \*S/A = Sem ar quente

#### 4.2.5. Modelagem do encolhimento na secagem dos pedaços de abacaxi

A Tabela 4.5 ilustra os parâmetros de ajuste obtidos utilizando os modelos uniformes propostos por Suzuki e *et al.* (1976) para o processo de secagem dos pedaços de abacaxi.

Tabela 4.5 - Parâmetros de ajuste obtidos dos modelos uniformes propostos por Suzuki *et al.* (1976)

T°C	P (w)	n	Dp	R <sup>2</sup>
40°C	166W	0,88	0,01	0,986
	259W	0,93	0,02	0,980
	381W	0,94	0,02	0,978
55°C	166W	0,96	0,01	0,995
	259W	0,96	0,01	0,990
	381W	0,89	0,02	0,985
70°C	0W	0,92	0,004	0,998
	166W	1,05	0,01	0,997
	166W	0,92	0,01	0,993
	166W	0,95	0,02	0,991
	259W	0,84	0,02	0,977
	381W	0,85	0,01	0,989
S/A	381W	0,94	0,01	0,993

De acordo com os dados apresentados na tabela 4.5, nota-se que o modelo de Suzuki e *et al.* (1976) ajustou-se de maneira satisfatória aos dados experimentais, para as diferentes potências de micro-ondas e temperaturas utilizadas no processo de secagem. Verifica-se que os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) explicam no mínimo 97,72% das variações dos dados, com valores próximos de 1. Foram observadas, para o coeficiente de encolhimento (n), variações de 0,84 a 1,05. Verificou-se que as amostras secas a 70° C com potências maiores e 40°C na menor potência foram as que apresentaram um menor valor deste parâmetro, seguidas da seca com 55°C e 381W. El-Aouar (2005) explica que n representa um fator de proporcionalidade entre a variação na área superficial total da amostra e a variação em seu volume, ao longo do processo de secagem. Além disso, a variação adimensional do volume é sempre menor do que a variação adimensional da área. A variação adimensional do volume encontrado neste estudo também apresentou ser menor em comparação

à variação adimensional da área. Sendo assim, o parâmetro  $n$  funciona como um fator de correção, a fim de tornar a variação da área igual à variação correspondente no volume. Portanto, quanto maior for a variação entre a área e o volume, menor será o valor de  $n$  correspondente a esta variação. Desta forma, interagindo as informações obtidas na cinética de encolhimento com aquelas sobre o significado do parâmetro  $n$ , quanto menor o valor de  $n$ , maior o nível de encolhimento sofrido pelas amostras.

As Figuras 4.29 mostram a modelagem realizada com o modelo proposto por Suzuki *et al.* (1976) (Equação 2-11) para as amostras de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem.

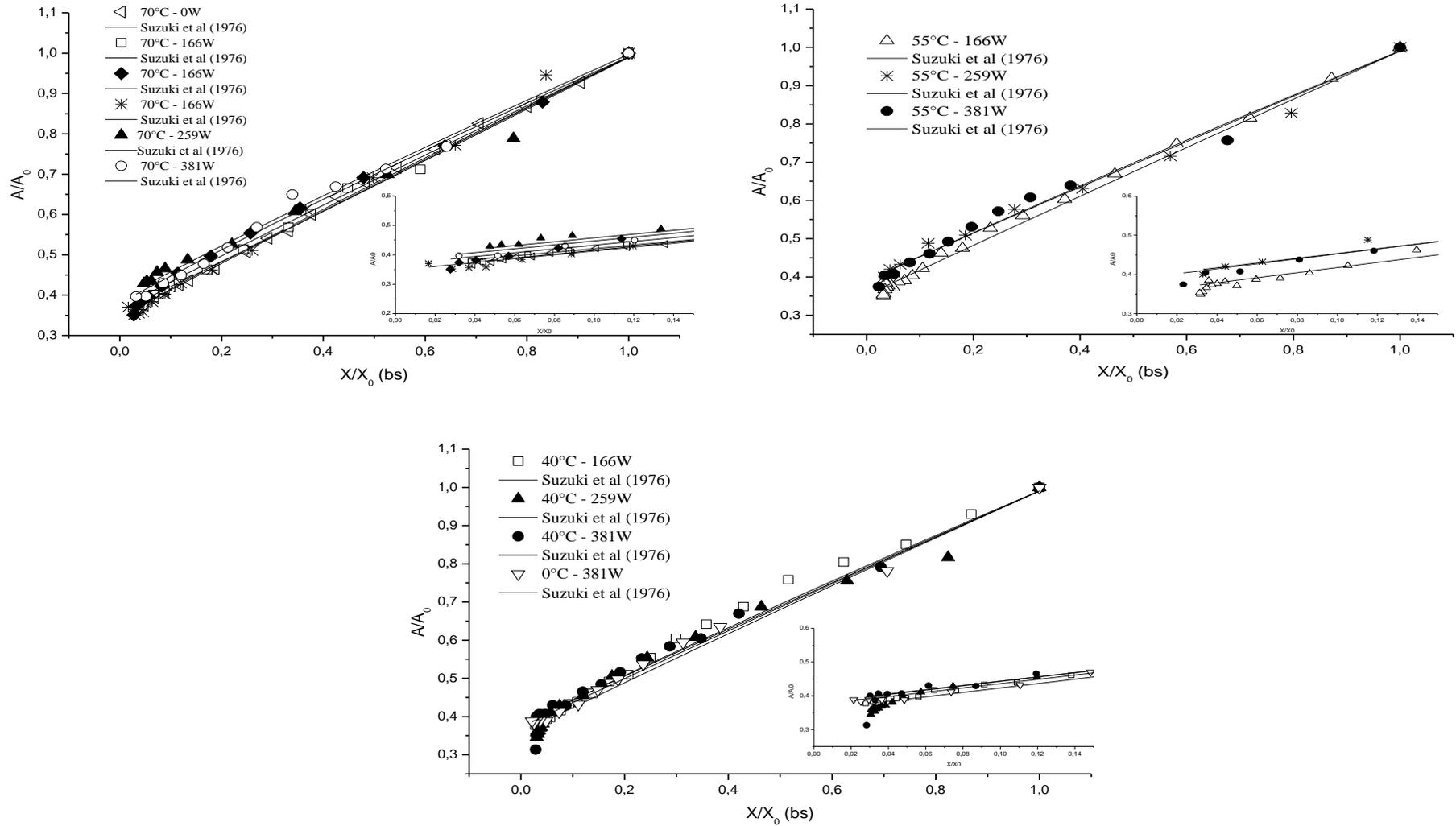


Figura 4.29 - Ajuste das curvas de encolhimento dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas (0W, 166W, 259W, 381W) e ar quente pelo modelo de Suzuki *et al.* para temperaturas de 40°C, 50°C, 70°C e sem o ar de secagem.

#### 4.2.6. Caracterização do produto seco

Na Tabela 4.6 estão apresentados os valores médios de umidade (bu) e atividade de água do produto seco em diferentes temperaturas e potências de micro-ondas.

Tabela 4.6 - Atividade de água e umidade final do abacaxi seco

	Umidade (g/100g)	Aw
40°C - 166W	17,40 ± 0,99	0,427 ± 0,051
40°C - 259W	20,11 ± 4,69	0,359 ± 0,014
40°C - 381W	15,38 ± 1,355	0,349 ± 0,013
55°C - 166W	14,18 ± 0,69	0,434 ± 0,098
55°C - 259W	18,90 ± 3,65	0,457 ± 0,089
55°C - 381W	23,75 ± 7,17	0,588 ± 0,102
70°C - 0W	22,29 ± 1,87	0,620 ± 0,186
70°C - 166W	19,90 ± 1,52	0,459 ± 0,006
70°C - 166W	15,20 ± 1,32	0,383 ± 0,027
70°C - 166W	17,44 ± 5,95	0,466 ± 0,022
70°C - 259W	23,43 ± 3,70	0,426 ± 0,084
70°C - 381W	20,27 ± 6,14	0,571 ± 0,077
S/A - 381W	13,85 ± 2,29	0,411 ± 0,044
Média	18	0,46
Desvio		
Padrão	3	0,09
CV %	18	19

De acordo com os resultados encontrados, observa-se que as amostras secas em todas as condições atingiram valores médios de atividade de água inferiores a 0,6, na maioria dos casos, inferiores a 0,46. Este limite é considerado aceitável em termos de preservação do produto em relação à deterioração e contaminação microbiológica. Botha *et al.* (2012, b) também encontraram valores de atividades de água de 0,6 na secagem com micro-ondas de abacaxi pré-desidratado osmoticamente.

Para maior potência 381W e temperaturas do ar mais altas aplicadas à secagem 55°C e 70°C, os valores de atividade de água foram maiores. Esse fato ocorreu possivelmente devido às amostras nestas condições terem apresentado teores maiores de umidade final. Por meio dessa observação, pode-se supor uma menor homogeneidade da secagem com a aplicação de micro-ondas a potências mais elevadas. Este fenômeno, com a falta de homogeneidade da distribuição de campo eletromagnético dentro da cavidade, foram responsáveis pelas maiores

diferenças entre as amostras secas em diferentes regiões do secador, conforme aumentava a potência aplicada.

Os teores de umidade final variaram de 14 a 24% (bu). Não foi possível obter teores de umidade de 15% (bu) em todos os experimentos, mas próximo a ele, devido a não uniformidade da distribuição do campo eletromagnético dentro da cavidade do micro-ondas, ou mesmo as influências dos níveis de potência de micro-ondas e temperaturas utilizadas. Botha *et al.* (2012, b) ao estudar a desidratação osmótica seguida de secagem de micro-ondas em abacaxis Smooth Cayenne durante 3 horas de processamento, observaram um conteúdo de umidade final de 11%, entretanto 6,5% das amostras apresentaram-se carbonizadas.

As capacidades de reidratação das amostras secas estão apresentadas na figura 4.30 e são referentes à quantidade de água absorvida pelos pedaços de abacaxi secos após permanecerem imersos em água a uma temperatura de aproximadamente 25°C por 15 horas, assim como o conteúdo de umidade do produto reidratado.

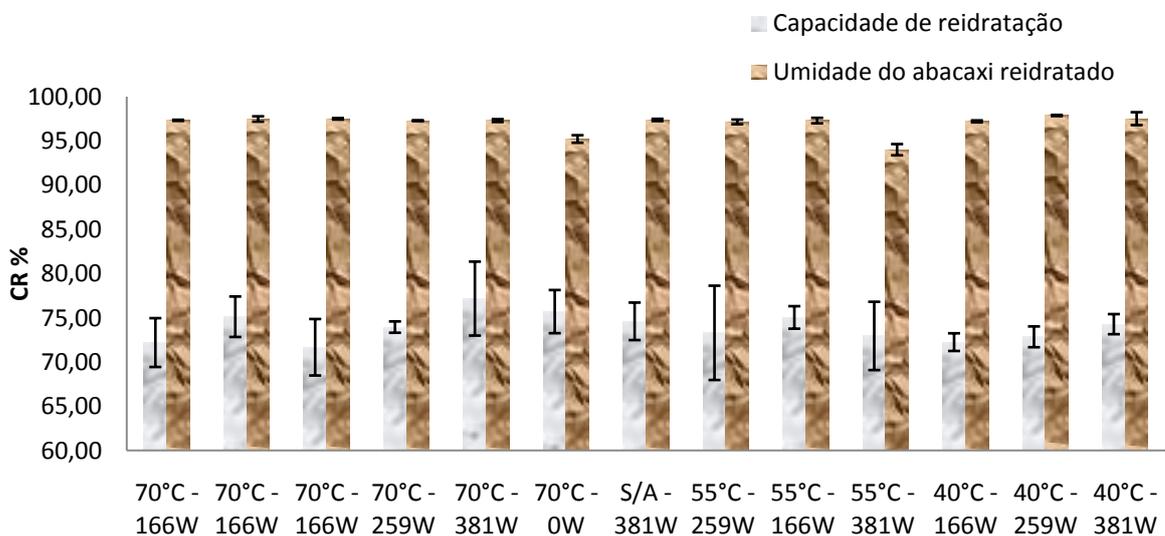


Figura 4.30 - Capacidade de reidratação e umidade do produto reidratado dos pedaços de abacaxi desidratados em todas condições de temperatura e potências de micro-ondas.

Observa-se que a capacidade de reidratação do material apresentou comportamento semelhante ao encolhimento com relação à potência de micro-ondas aplicada e temperaturas do ar de secagem, ou seja, não houve diferenças significativas em nível de  $P < 0,05$  pelo teste de F na capacidade de reidratação

das amostras secas nas condições do processo estudadas. Não foi observada influência da variação das variáveis de processo testadas. Entretanto, os níveis de potência e temperatura afetaram significativamente a umidade final do produto reidratado, 97% (bu), em relação ao produto *in natura*. Além disso, pode-se considerar que a combinação de micro-ondas e ar quente nestas condições resultou em boa absorção de água, em torno de 70%. Vale ressaltar que as características da capacidade de reidratação dependem das propriedades físicas do produto seco. Pereira (2007) observou que a banana *in natura* seca na fase inicial com aplicação de 95W de potência de micro-ondas apresentou maior capacidade de reidratação (60%) e que o aumento da potência de micro-ondas levou a menor capacidade de reidratação. Resultados semelhantes foram observados por Khraisheh *et al.* (2004) com amostras secas de batatas em potência de micro-ondas mais altas. Os autores observaram que altas potências de micro-ondas formam uma estrutura mais consolidada e rígida que conduz à ausência de vias de entrada de água, isto é, baixa capacidade de reidratar.

Askari *et al.* (2006) ao compararem diferentes métodos de secagem de pedaços de maçãs na capacidade de reidratação, observaram uma diferença significativa entre as amostras não tratadas e tratadas com micro-ondas, sendo que a última apresentou uma maior absorção de água. Explicou que este fenômeno ocorreu pelo fato de que as amostras secas somente com ar são menos porosas. Observou também que as amostras liofilizadas mostraram uma grande quantidade de poros, mas a sua capacidade de reidratação foi menor do que as amostras tratadas com micro-ondas.

Khraisheh *et al.* (2004) também afirmam que as propriedades de reidratação das amostras secas em micro-ondas foram melhores do que as de amostras secas somente por convecção. O grau de reidratação também aumentou com o nível de energia. No entanto, elevadas potências (38W) levaram a gelatinização em alimentos ricos em amido resultando na diminuição da capacidade de reidratação.

No que diz respeito ao encolhimento do produto, menor encolhimento proporciona uma maior capacidade de reidratação, como foi encontrado na secagem de kiwi por Maskan (2001). Resultados contrários foram encontrados por Changrue e Orsat (2009), de que o baixo encolhimento resultou em menor

capacidade de reidratação na secagem de cenouras desidratadas osmoticamente e secas em micro-ondas a vácuo.

Os resultados deste estudo foram diferentes. A presença de espaço vazio dos abacaxis secos, apresentados na tabela 4.31, não foi suficientes para causar diferenças na capacidade de reidratação, apesar de temperaturas de 40°C a 259W e 381W apresentarem maiores porosidades comparadas a temperaturas de 70°C a 259W e 55°C a 166W, 259W e 381W. No entanto, estes resultados mostraram que as aberturas intercelulares criadas por energia de micro-ondas podem absorver grandes quantidades de água durante a reidratação e levar a um aumento da capacidade de reidratação.

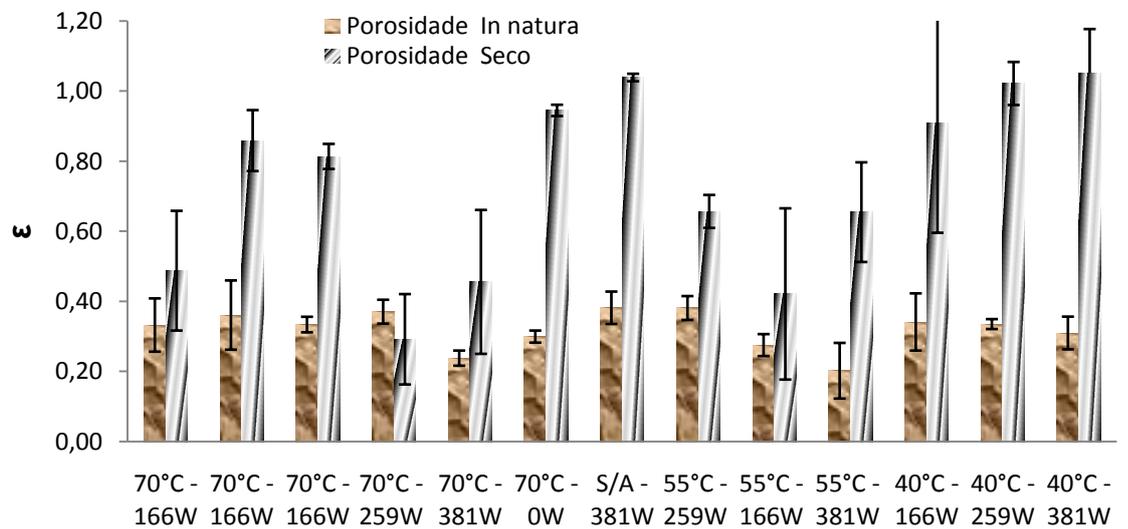


Figura 4.31 - Porosidade do abacaxi *in natura* e depois de seco

### 4.3. Efeito da temperatura do ar quente e potência de micro-ondas variável durante a secagem de pedaços de abacaxi.

#### 4.3.1. Caracterização da matéria-prima

A Tabela 4.7 abaixo apresenta os resultados obtidos da caracterização físico-químicas do abacaxi *in natura*.

Tabela 4.7 – Características físico-químicas do abacaxi *in natura*

Condição	pH	SST (°Brix)	Umidade (i) (g/100)	Aw	Umidade (UV)
70°C - 166W - 89W	3,77 ± 0,02	10,28 ± 0,26	89,93 ± 0,28	0,9947	89 ± 0,5
70°C - 166W - 259W	3,24 ± 0,05	10,2 ± 0,19	89,48 ± 0,41	0,9930	88,56 ± 0,35
70°C - 259W - 259W	3,82 ± 0,03	10,08 ± 0,08	89,09 ± 0,68	0,9888	88,89 ± 0,36
55°C - 166W - 89W	3,65 ± 0,01	10,0 ± 0	89,59 ± 1,58	0,9905	89,26 ± 0,97
55°C - 259W - 259W	3,83 ± 0,01	10,5 ± 0,43	89,72 ± 0,20	0,9921	89,56 ± 0,20
Média	3,66	10,21	89,56	0,992	89,05
Desvio padrão	0,25	0,19	0,31	0,002	0,38
CV%	6,73	1,89	0,35	0,23	0,42

A determinação de umidade é uma das medidas mais importantes na análise de alimentos, estando esse parâmetro relacionado com a estabilidade, qualidade e composição do alimento. No processo de secagem essa determinação é fundamental. Os teores de umidade encontrados neste trabalho estão de acordo com Taco (2011). O pH do abacaxi *in natura* apresentou média de 3,66 e sólidos solúveis totais de 10,21 °Brix, o que o caracteriza como um fruto ácido e pouco adocicado.

Bleinroth (1987) encontrou pH variando entre 3,6 a 4,15, teor de sólidos solúveis entre 11,6 °Brix e 16,2 °Brix para abacaxi pérola e Valente (2007) e Sarzi e Durigan (2002) encontraram no abacaxi *in natura* sólidos solúveis totais 13,43 °Brix e 13,7 °Brix, respectivamente. Sarzi e Durigan (2002) e Rodrigues (2006), encontraram pH entre 3,62 a 4,1. As diferenças apresentadas entre os dados obtidos neste trabalho e os da literatura são perfeitamente compreensíveis, pois

quando se trabalha com material biológico, a composição química é influenciada por diversos fatores, tais como: época de colheita, região da qual a matéria-prima é cultivada, dentre outros.

#### 4.3.2. Cinética de secagem

A aplicação de micro-ondas em maiores níveis de potência para uma mesma temperatura do ar resultou em aumento da cinética de secagem, promovendo uma redução no tempo (Figuras 4.32 a 4.34 e tabela 4.8). Ainda potência de micro-ondas de 259W e temperatura do ar de 70°C proporcionaram um menor tempo de secagem (80 minutos) para que os abacaxis atingissem 40% de umidade, Figuras 4.32 e 4.33, correspondentes ao período I da secagem. Menores potências aplicadas no período II da secagem levaram maior tempo de secagem (120 minutos) para que alcançassem o mesmo teor de umidade final, aproximadamente 15% (bu) (Figura 4.34). Entretanto, esta redução dos níveis de potência no período II, em relação às aplicadas no período I, diminuiu a temperatura do produto, evitando o superaquecimento e possível carbonização.

As vantagens na aceleração da cinética de secagem com utilização de micro-ondas também foram observadas por Karatas e Kamisli (2007), Silva e Marsaioli (2003), Botha *et al.* (2012, a) e Botha *et al.* (2012, b).

Botha *et al.* (2012, a), observaram que a variação de energia de micro-ondas na secagem de abacaxi favoreceu inicialmente uma rápida redução do teor de umidade, no entanto esta redução ocorreu de forma lenta no final do processo. Isto provavelmente significa que as potências de micro-ondas utilizadas no final do processo de secagem não foram suficientes para causarem redução significativa na remoção de água da fruta. O uso de potências maiores acelerou significativamente o processo de secagem. Resultados semelhantes foram encontrados neste trabalho.

Pereira *et al.* (2007) estudaram a diferença de programas de micro-ondas e ar quente nas últimas fases de secagem de bananas osmoticamente desidratadas, e observaram que o aumento da energia de micro-ondas na fase final aumentou a taxa de secagem, tornando assim o tempo de secagem mais

curto. No entanto, a energia de micro-ondas também promoveu aumento da temperatura das amostras levando a carbonização parcial do produto seco.

As diferenças no tempo de secagem para uma mesma condição do processo de secagem, 70°C e 166W, Tabela 4.8, provavelmente ocorreram devido às sucessivas vezes que o secador teve que ser aberto para a retirada das amostras, para o estudo da cinética de secagem, influenciando assim o tempo do processo.

Os resultados deste estudo demonstraram que é viável a secagem convectiva combinada com energia de micro-ondas com o objetivo de reduzir o tempo de processo. A variação da potência de micro-ondas durante o processo demonstrou um comportamento definido na velocidade de secagem, e provavelmente, um menor consumo de energia em densidades de potência reduzidas no período final do processo.

Tabela 4.8 - Tempo final de secagem nos Períodos I e II das diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem.

condição	Tempo final (min) PI	Tempo final (min) PII	Tempo Total (min)
55°C - (PI)166W - (PII)89W	120	120	240
55°C - (PI)259W - (PII)259W	100	28	128
70°C - (PI)166W - (PII)89W	112	80	192
70°C - (PI)166W - (PII)259W	105	25	130
70°C - (PI)259W - (PII)259W	80	25	105

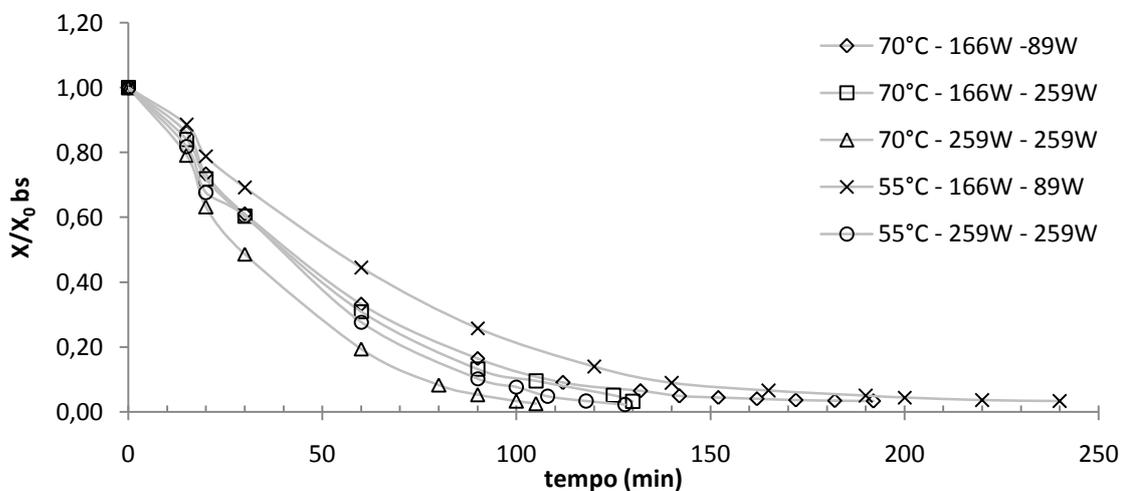


Figura 4.32 - Umidade adimensional em função do tempo de secagem dos pedaços de abacaxi nas diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar nos dois períodos da secagem.

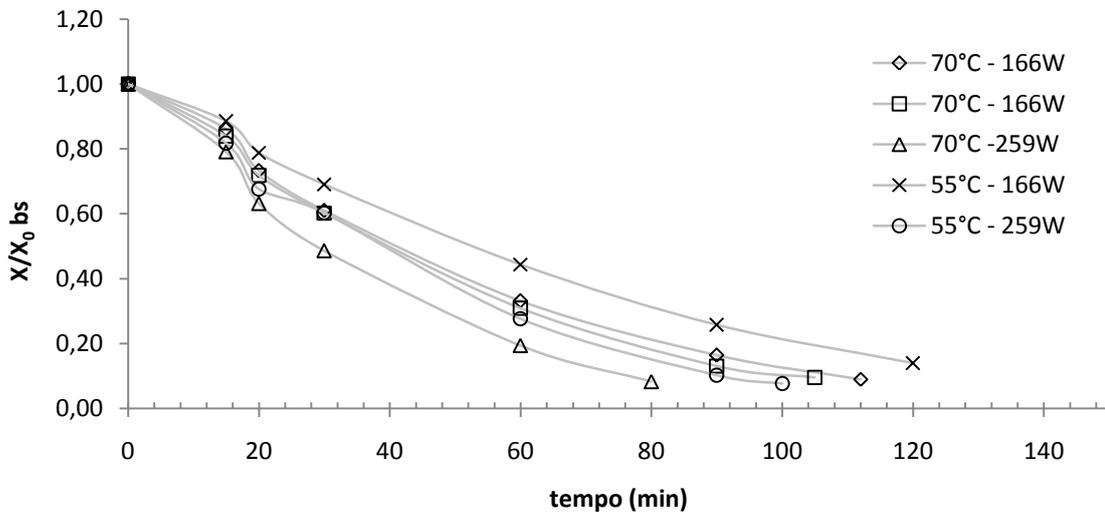


Figura 4.33 - Umidade adimensional em função do tempo de secagem dos pedaços de abacaxi nas diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar até 40% de umidade (bu).

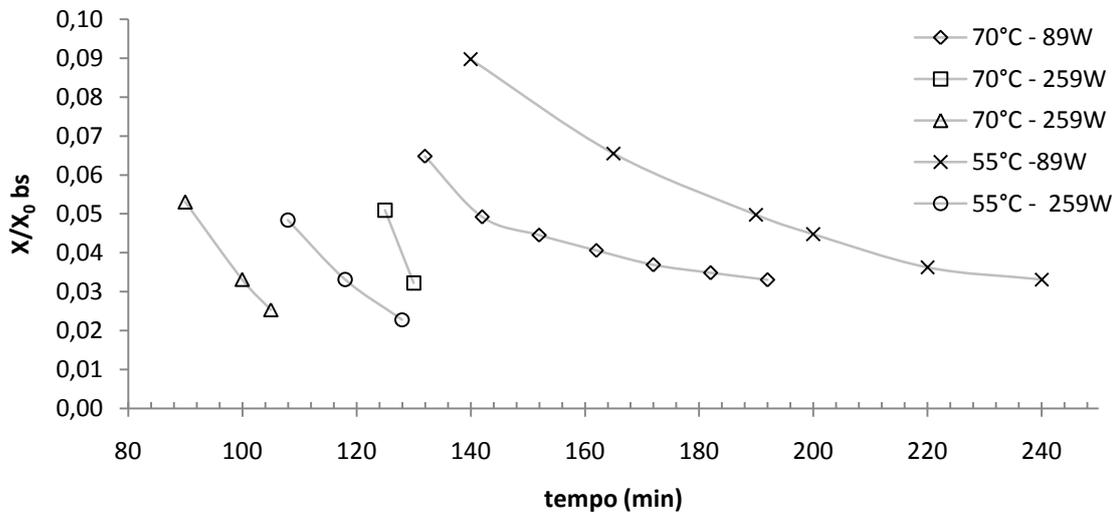


Figura 4.34 - Umidade adimensional em função do tempo de secagem dos pedaços de abacaxi nas diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de 40% até 15% de umidade (bu).

Para uma melhor visualização do comportamento da secagem, as taxas de secagem foram calculadas em função do conteúdo de umidade adimensional (Figura 4.35 e 4.36). A taxa de secagem refere-se à velocidade do processo de remoção de água do produto, sendo expressa como a variação da massa de água em relação à massa seca do produto por um período de tempo. A determinação

da taxa de secagem auxilia no estudo da cinética da mesma, permitindo a observação do período da secagem ao longo do processo.

Durante a secagem dos pedaços de abacaxi as taxas de secagem apresentaram-se crescente e decrescente para o período I e decrescente no período II da secagem. Rosa (2010) também relatou que, em todos os experimentos realizados, a cinética de secagem de cenouras utilizando energia de micro-ondas, apresentou, predominantemente, um período de taxa de secagem decrescente, com um pequeno período inicial de taxa de secagem crescente, o que é atribuído ao tempo para aquecimento do material.

Durante a taxa decrescente o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução da taxa de secagem é devido ao abaixamento da pressão parcial de vapor de água na superfície do sólido. Ao final deste período o produto estará em equilíbrio com o ar de secagem e a velocidade de secagem é praticamente nula. Além disso, observa-se que as taxas de secagem são maiores no período I da secagem quando o teor de umidade é maior, principalmente para potências fixadas em 259W. As maiores taxas de secagem foram observadas aplicando potência de micro-ondas de 259W e temperatura do ar de 70°C e 55°C, 0,26 (kgw/kgsc.min) e 0,24 (kgw/kgsc.min), respectivamente. Estas taxas de secagem foram superiores à taxa máxima alcançada quando se utilizou a potência de 166W. Não foi observada a taxa constante de secagem. Giri e Prasad (2007) explicam que, embora possa ser esperado taxa constante de secagem para alimentos de umidade elevada, quando este fenômeno não é observado, pode ser devido ao arranjo de camada fina e aquecimento por micro-ondas muito rápido.

A quantidade de energia de micro-ondas absorvida pelo material depende de suas propriedades dielétricas e da força do campo elétrico (MUDGETT, 1982). Segundo Sharma e Prasad, (2001), a constante dielétrica e fatores de perda são maiores quanto maior for o teor de umidade do material. Isto ocorre porque o material absorve mais energia de micro-ondas em maiores teores de umidade, o que torna seu aquecimento mais rápido. Com a perda de umidade do produto, a redução da absorção de energia de micro-ondas resultou em uma diminuição da taxa de secagem durante o período II da secagem.

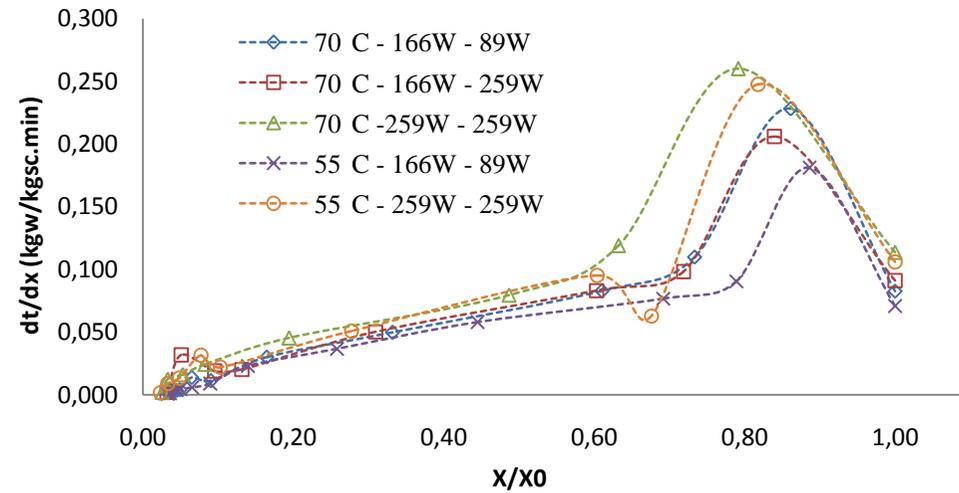


Figura 4.35 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem ao longo do tempo

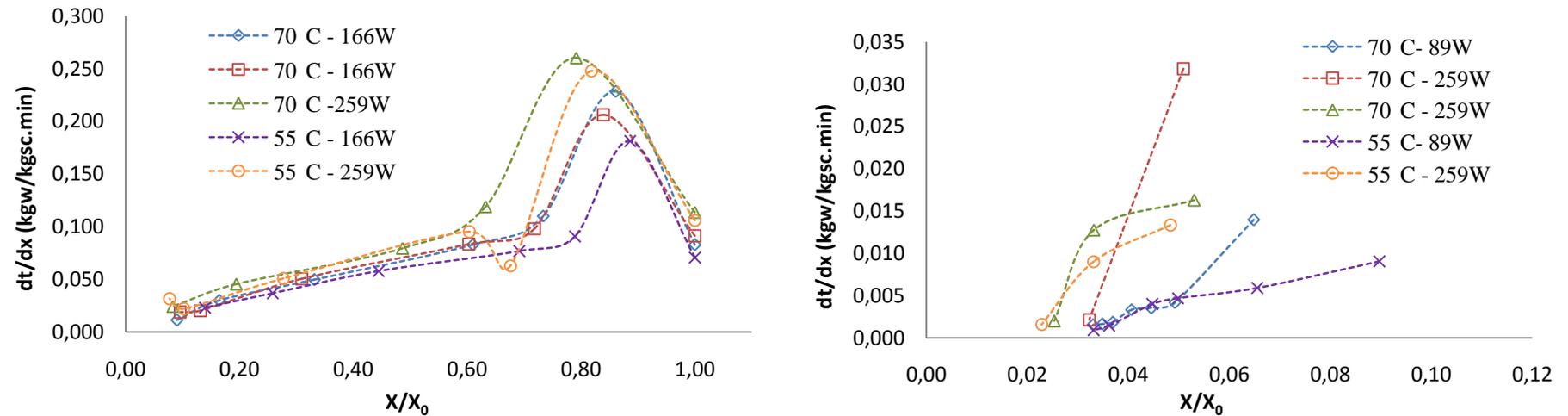


Figura 4.36 - Taxa de secagem em função da umidade adimensional dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem no período I (à esquerda) e período II (à direita).

Como era de se esperar, analisando-se as Figuras 4.37 e 4.38, observa-se que o aumento na potência de micro-ondas proporcionou um aumento na temperatura do produto para uma mesma condição de temperatura do ar. Portanto, quanto maior a potência de micro-ondas aplicada, maior é o aumento da temperatura do material ao longo do tempo. A taxa de aumento da temperatura é menor para potências de micro-ondas mais baixas. A taxa de secagem do abacaxi está diretamente relacionada com a temperatura do ar e potência de micro-ondas do processo, o aumento na temperatura do ar de secagem e a elevação dos níveis de energia resultaram em uma maior transferência de umidade.

Observa-se que durante o período I a temperatura do produto apresentou um rápido aumento, sendo maior na condição de temperatura do ar de 70°C em relação à de 55°C. Observa-se também que potência de micro-ondas de 166W a 55°C neste período causou uma menor taxa de aumento de temperatura. No período II, para temperatura de 55°C e potência de 89W a temperatura apresentou um rápido decréscimo, o contrário do que ocorreu para temperaturas de 70°C e potências de micro-ondas maiores.

Botha *et al.* (2012, a), ao estudarem a secagem de abacaxi desidratado osmoticamente com aplicação variável de micro-ondas e ar quente durante o processo, concluíram que a utilização de energia de micro-ondas variável combinada com baixas temperaturas do ar pode resultar em um processo de secagem rápida e sem carbonização significativa de pedaços de abacaxi. Estes resultados foram confirmados neste estudo.

Nota-se que em baixas temperaturas do ar com redução da potência de micro-ondas (89W) no período II da secagem resultaram em temperaturas mais baixas do produto. No entanto, acarretaram maior tempo de processo. Os mesmos autores afirmaram que temperatura do ar de entrada de 70°C foi excessiva, quando combinada com energia de micro-ondas (5W/g), resultado semelhante foi encontrado no presente estudo na mesma condição de temperatura do ar com densidade de potência de 6W/g. Ainda, relatam que energia de micro-ondas é mais eficaz nas primeiras horas da secagem, 1,5 h de processamento, podendo na sequência reduzir a potência, mas os resultados permitiram concluir que a carbonização poderia ser completamente reduzida ao

desligar a energia de micro-ondas e, em seguida, terminar a secagem com temperaturas mais altas do ar.

Apesar de o aumento da potência de micro-ondas responder positivamente ao aumento da taxa de secagem, a temperatura elevada do produto pode causar alterações na sua estrutura, perda de nutrientes voláteis, reações de escurecimento, mudanças sensoriais e levar ao aparecimento de pedaços de abacaxis carbonizados. Portanto, o uso de baixas temperaturas do ar (50°C ou menores) é vantajoso com aplicação de energia de micro-ondas nas primeiras fases de secagem, mas retarda a secagem no final, provavelmente devido ao baixo teor de umidade no final do processo de secagem.

As Figuras 4.37 e 4.38 ilustram as curvas da temperatura superficial média dos pedaços de abacaxi *in natura* ao longo do tempo de secagem em diferentes temperaturas do ar e potência de micro-ondas.

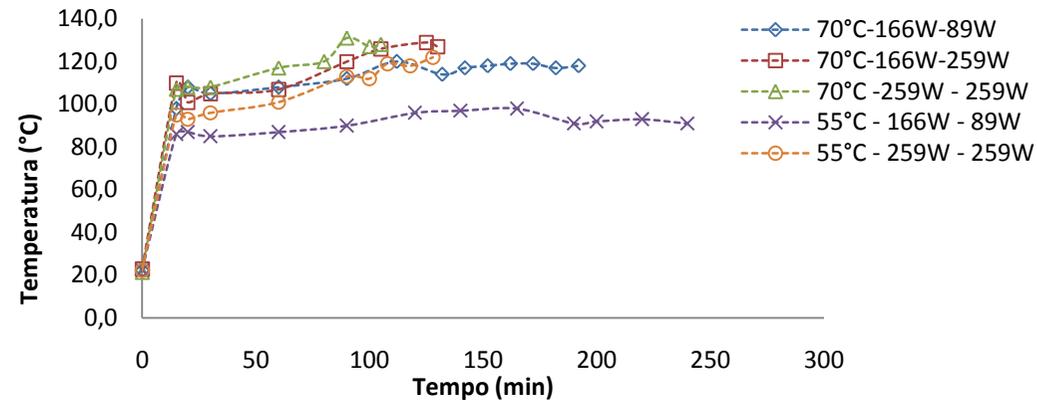


Figura 4.37 - Temperatura superficial média dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem ao longo do tempo de secagem.

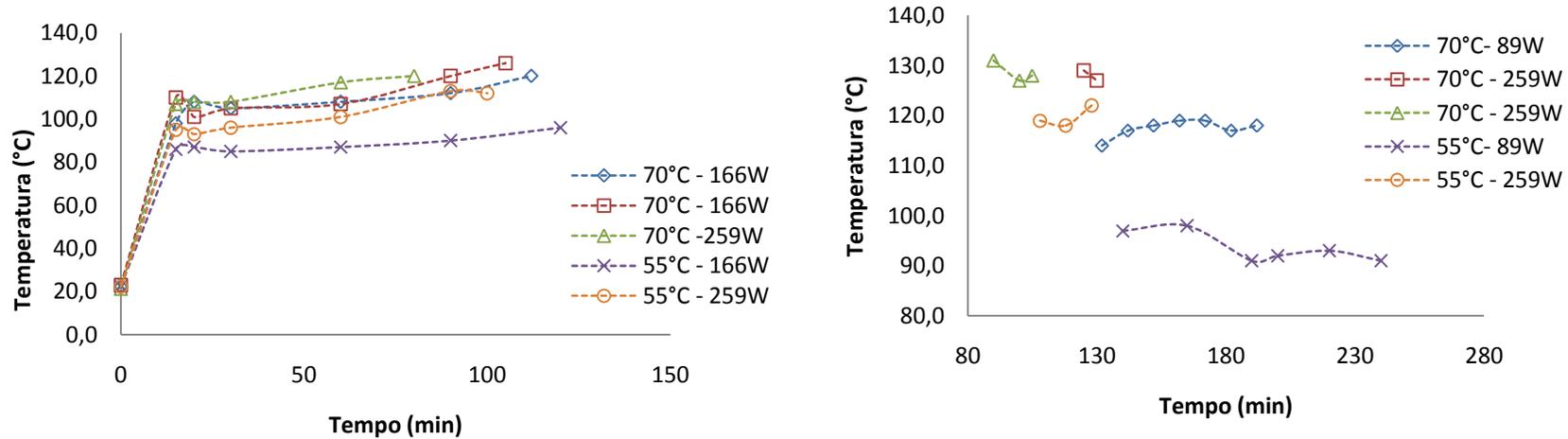


Figura 4.38 - Temperatura superficial dos pedaços de abacaxi secos em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem no período I (à esquerda) e período II (à direita) do processo de secagem.

### 4.3.3. Ajuste por modelos matemáticos

As Figuras 4.39 e 4.40 apresentam os ajustes dos dados das curvas de secagem dos pedaços de abacaxi ao modelo de Page (Equação 2.7).

Os dados experimentais foram descritos pelo modelo de Page, por meio de regressão não-linear, obtendo-se os parâmetros estimados ( $K$  e  $n$ ) e seus respectivos desvios, assim como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Tabela 4.9).

Tabela 4.9 - Parâmetros estimados pela equação de Page para os dados iniciais de secagem e coeficiente de determinação do modelo ajustado para todas as temperaturas e potência de micro-ondas.

		Modelo de Page				
T°C	Potência (w)	K (min <sup>-1</sup> )	Dp (min <sup>-1</sup> )	n	Dp	R <sup>2</sup>
55°C	55°C - 166W - 89W	0,0059	0,0008	1,2025	0,032	0,9983
	55°C - 259W - 259W	0,0068	0,0013	1,2876	0,0506	0,9968
70°C	70°C - 166W - 89W	0,0078	0,0012	1,2031	0,0384	0,9973
	70°C - 166W - 259W	0,0068	0,0009	1,2629	0,0352	0,9985
	70°C -259W - 259W	0,0084	0,0016	1,3003	0,0525	0,9972

De acordo com o coeficiente de determinação ( $R^2 > 0,9968$ ) pode-se afirmar que o modelo de Page se ajustou muito bem aos dados experimentais. VEGA *et al.* (2006), Pereira (2007), Hofsky *et al.* (2009) também notaram em suas pesquisas que o modelo de Page apresentou um bom ajuste para a cinética de secagem.

O aumento do parâmetro  $k$  foi observado em potência de micro-ondas e temperaturas do ar fixadas em 70°C e 259W durante os períodos I e II do processo de secagem. Este aumento ocorreu devido ao aumento das taxas de transferência de umidade do material e da temperatura das amostras nestas condições. O parâmetro  $K$  é um indicativo do comportamento da taxa de secagem relacionado com a transferência de umidade do material.

Já para a constante  $n$ , parece não haver um comportamento bem definido com relação à temperatura do ar de secagem e potência de micro-ondas, mas os valores de  $n$  aumentaram com níveis de energia e temperaturas maiores com a redução do tempo de secagem, ou seja, quando se aplicou 70°C a 279W nos dois períodos estudados.

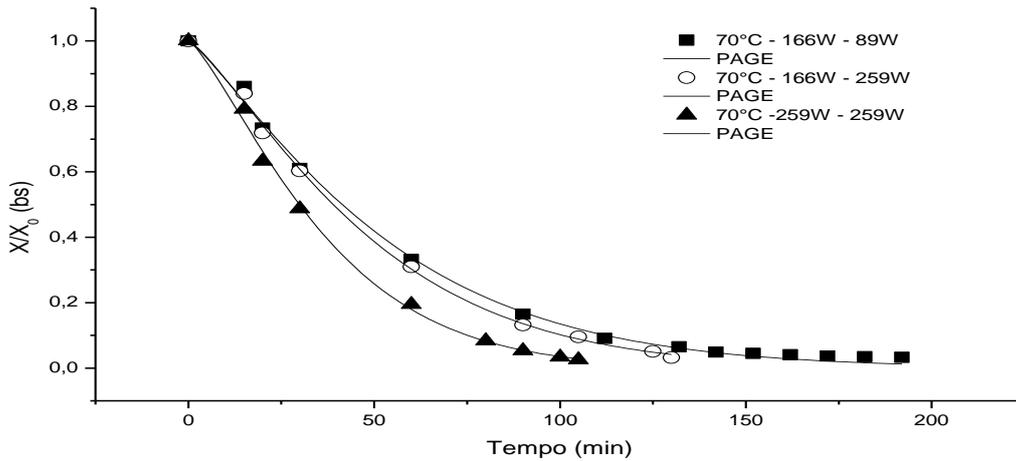


Figura 4.39 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page para temperaturas fixas em 70°C.

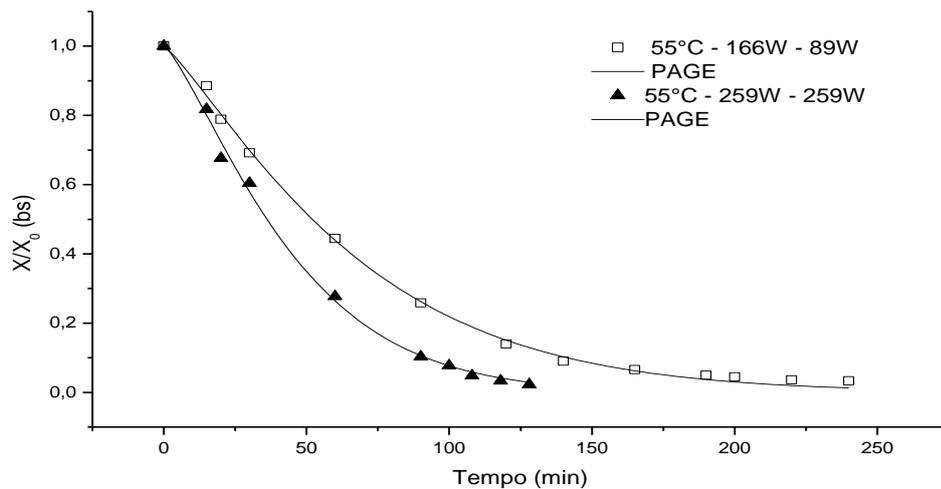


Figura 4.40 - Ajuste das curvas de secagem dos pedaços de abacaxis secos com aplicação de energia de micro-ondas e ar quente ao modelo de Page para temperaturas fixas em 55°C.

#### 4.3.4. Cinética de encolhimento

As Figuras 4.41 a 4.46 ilustram a cinética de encolhimento por meio da razão de volume ( $V/V_0$ ) das amostras de abacaxi em função da umidade adimensional em base seca nos dois períodos de secagem estudados.

O encolhimento ( $V/V_0$ ) das fatias de abacaxi apresentou aumento linear em relação ao teor de umidade. Resultados semelhantes foram encontrados por

Khraisheh *et al.* (2004) ao estudarem as mudanças estruturais em alimentos ricos em amido durante a secagem com micro-ondas. Uma excelente concordância foi encontrada entre os dados experimentais e os previstos por ajuste linear ( $R^2 \geq 0,9888$ ) para o período I e ( $R^2 = 1$ ) no período II (Apêndice 3). Esse encolhimento foi observado em todas as condições de processo conforme mostrado na Figura 4.47. Este efeito também foi observado por Maskan (2001), entretanto nestes experimentos houve uma tendência da elevação da potência proporcionar aumento de  $V/V_0$ .

De acordo com os resultados, referentes ao período I e II da secagem, observa-se que o encolhimento volumétrico foi praticamente linear em todas as condições de potência de micro-ondas e temperatura do ar aplicadas na secagem. Entretanto, o menor encolhimento foi observado em temperaturas do ar fixadas a 55°C e potência de micro-ondas de 259W aplicadas no período I e 259W no período II. Este resultado diferiu estatisticamente em nível de ( $p < 0,05$ ) pelo teste de tukey dos obtidos pelas outras condições, exceto para temperaturas do ar e potência de micro-ondas fixas em 70°C e 166W no período I e 259 e 89W no período II (Tabela 4.10). O encolhimento maior foi obtido quando diminui a potência de micro-ondas de 166W do período I para 89W no período II com temperaturas de 70°C. Em temperaturas do ar fixas em 55°C, as variações da potência de micro-ondas não diferiram significativamente na redução do volume entre si. Os mesmos efeitos foram observados para temperatura do ar de 70°C.

Em baixas umidades foi verificada a estabilização da redução do volume, correspondente ao enrijecimento da parede celular do produto. Esta diminuição da redução do volume no final do processo também foi observada por Yan *et al.* (2008) ao estudarem o encolhimento de banana, abacaxi e pedaços de manga durante a secagem com ar quente e pelo estudo de secagem com potência constante do trabalho (1) anterior.

Maskan (2001) estudando o encolhimento de kiwi durante a secagem com aplicação de micro-ondas e ar quente observou que o encolhimento foi menor com a combinação dos métodos. No entanto, verificou-se um encolhimento mais elevado e rápido de amostras secas apenas por micro-ondas. O autor argumenta que esta redução acentuada do volume é por causa da geração de calor por micro-ondas, acelerando a remoção de água dos tecidos da amostra. Além disso,

observou elevado encolhimento inicialmente e estabilização ao final da secagem, o que foi também observado no presente estudo.

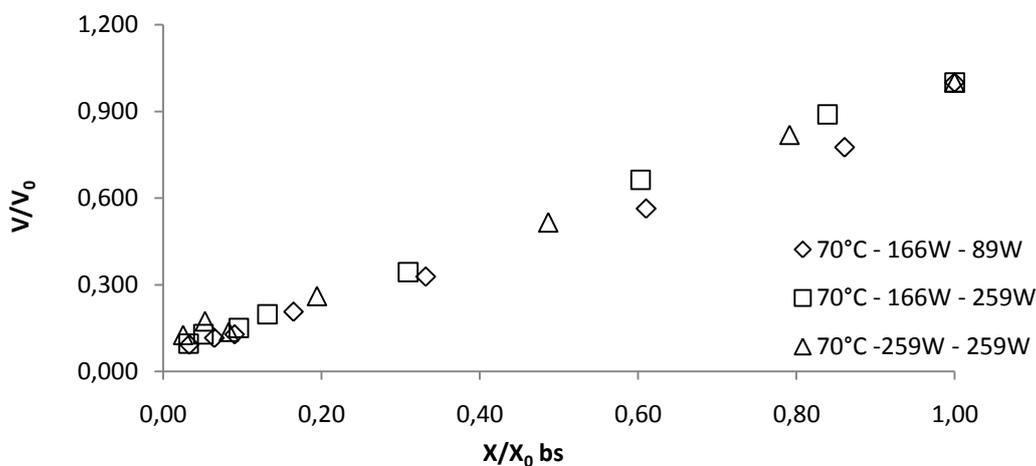
Segundo Mayor e Sereno (2004), em umidades elevadas, quando o material está em estado elástico (temperatura da amostra menor que a temperatura de transição vítrea), o volume diminui linearmente com a redução do teor de umidade. Por outro lado em baixos teores de umidade, no qual a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) aumenta permitindo que o material passe de um estado elástico para um estado vítreo, ocorre a redução da taxa de encolhimento. Esse comportamento pode ser observado nas Figuras 4.41 a 4.46 para as secagens nas temperaturas de 55 e 70°C e diferentes potências de micro-ondas.

A Tabela 4.10 apresenta os escores médios obtidos do encolhimento  $V/V_0$  dos pedaços de abacaxi seco.

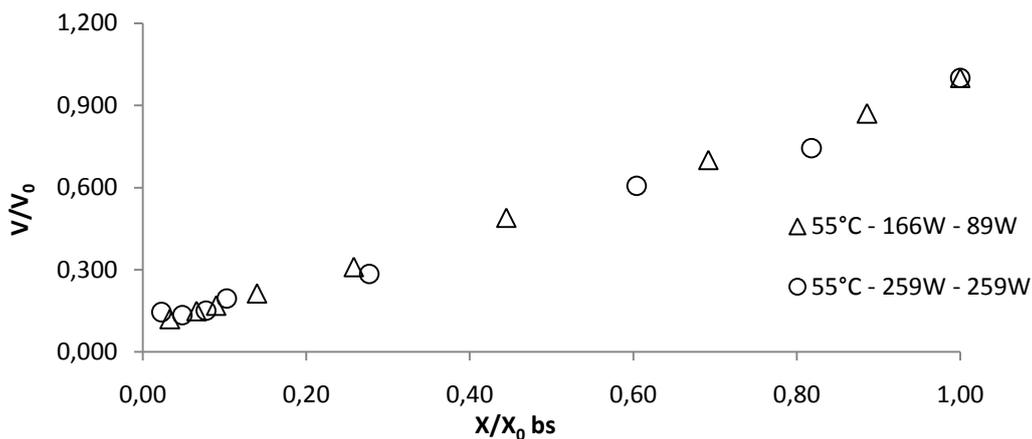
Tabela 4.10 - Médias do encolhimento ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi seco.

Experimento	$V/V_0$
70°C - 166W - 89W	$0,09^b \pm 0,01$
70°C - 166W - 259W	$0,11^b \pm 0,02$
70°C - 259W - 259W	$0,12^{ab} \pm 0,01$
55°C - 166W - 89W	$0,12^{ab} \pm 0,01$
55°C - 259W - 259W	$0,15^a \pm 0,02$

Médias na mesma coluna acompanhadas de mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).



4.41 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratados versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 70°C até 15% de umidade (bu).



4.42 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratados versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 55°C até 15% de umidade (bu).

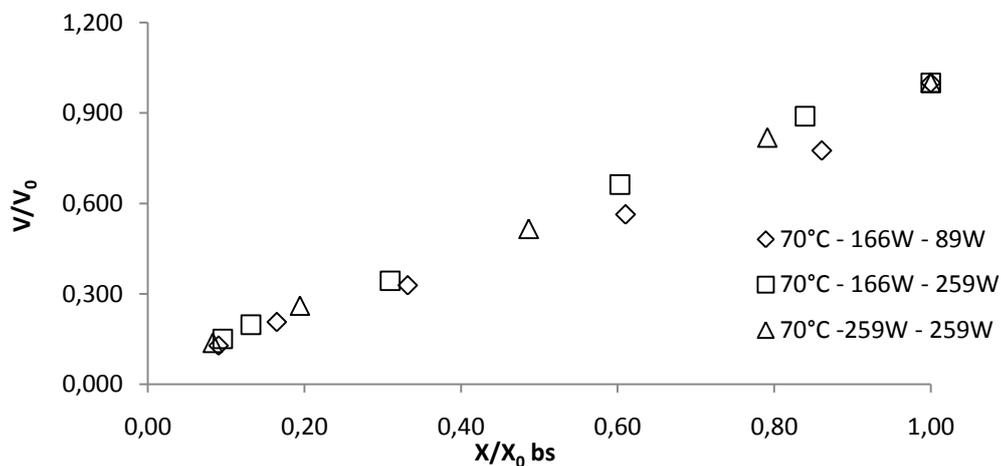


Figura 4.43 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratados versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 70°C até 40% de umidade (bu).

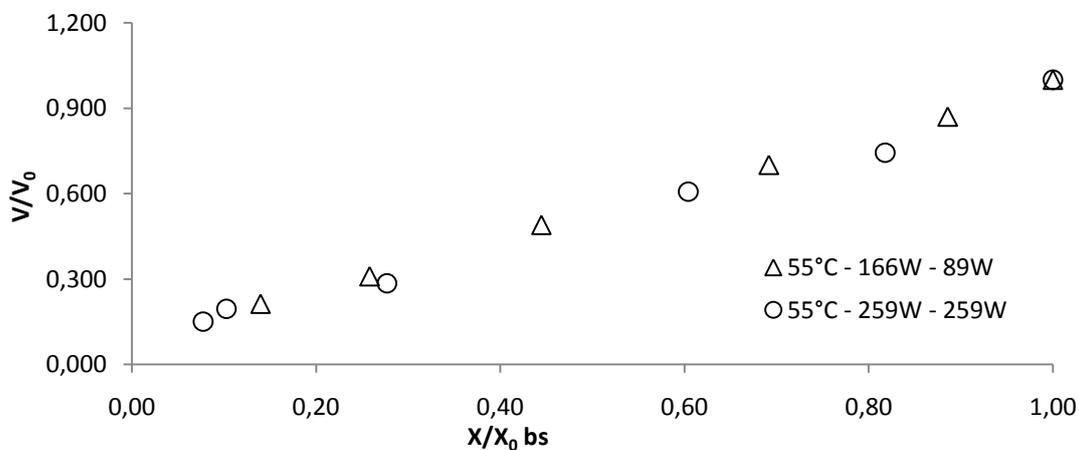


Figura 4.44 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratados versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 55°C até 40% de umidade (bu).

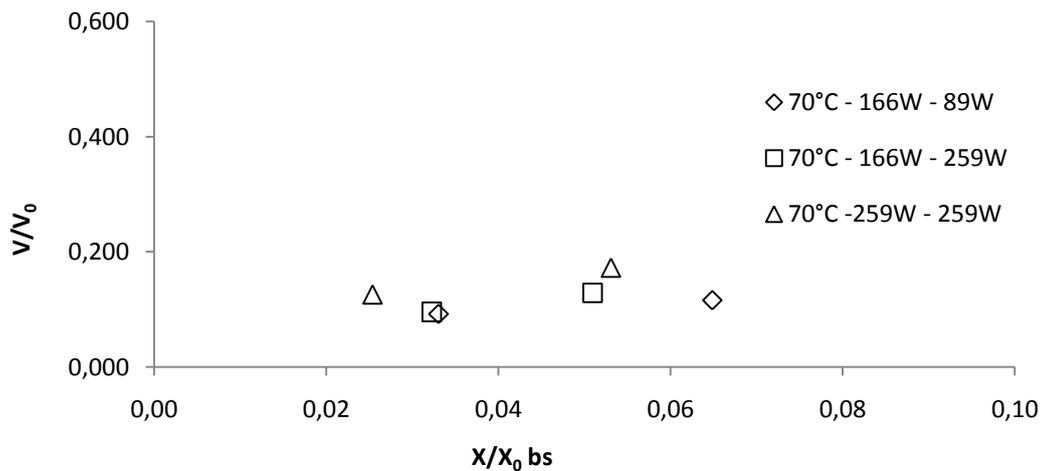


Figura 4.45 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratados versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 70°C entre 40% e 15% de umidade (bu).

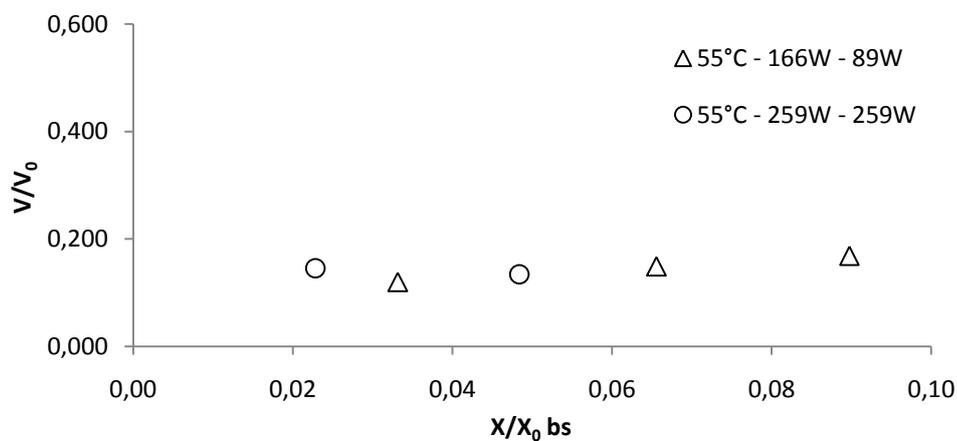


Figura 4.46 - Encolhimento volumétrico dos pedaços de abacaxi desidratados versus umidade adimensional (bs) para temperaturas fixas em 55°C entre 40% e 15% de umidade (bu).

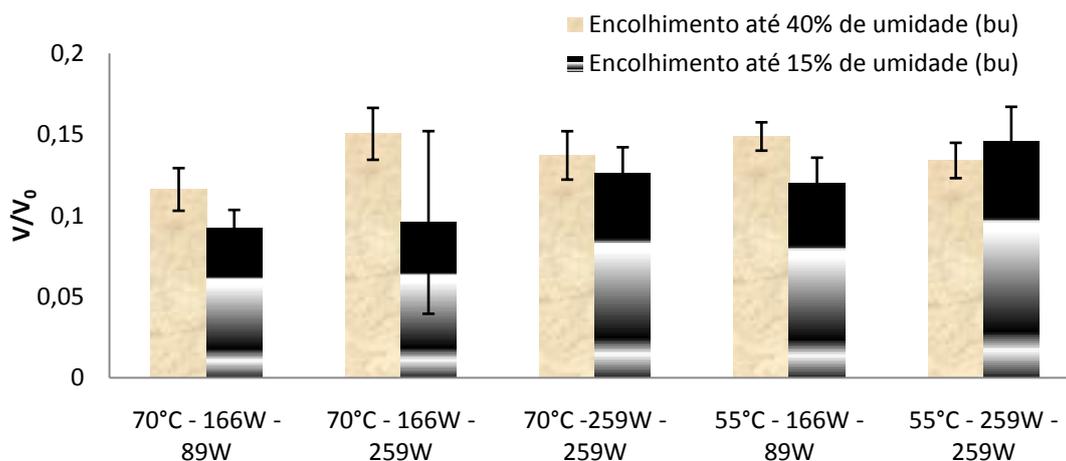


Figura 4.47 - Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) dos pedaços de abacaxi desidratados em todas as condições de temperatura e potência de micro-ondas.

As Figuras 4.48 e 4.49 mostram os gráficos de  $V/V_0$  em função do tempo de secagem. Os tempos de secagem foram menores quando utilizaram níveis de potência fixados em 259W nas temperaturas de 55°C e 70°C ao longo do processo. A temperatura de 70°C proporcionou menores tempos de secagem e a redução de potência no período II aumentou os tempos de secagem para atingir a umidade final estabelecida do produto, conforme discutido no item 4.3.2.

O encolhimento ( $V/V_0$ ) do produto é maior quando submetido a elevados níveis de potência para um mesmo intervalo de tempo no período I, independente da temperatura do ar de secagem. É válido ressaltar que a potência de micro-ondas de 89W no período II não favoreceu a obtenção de um produto crocante, mas com aspectos borrachudos, principalmente quando foram aplicadas baixas temperaturas do ar de secagem, além de acarretar maior tempo de processo. A aplicação de potência de micro-ondas de 89W resultou em menor transferência de calor e escoamento do líquido, o que levou uma demora na secagem dos pedaços de abacaxi.

Khraisheh *et al.* (2004) explicam que baixa potência de micro-ondas resulta na diminuição das taxas de secagem, conseqüentemente, as forças induzidas não são suficientemente fortes para quebrar a estrutura e, por conseguinte, o encolhimento é limitado. Além disso, observaram que o encolhimento é menor na secagem com micro-ondas em comparação à secagem convectiva.

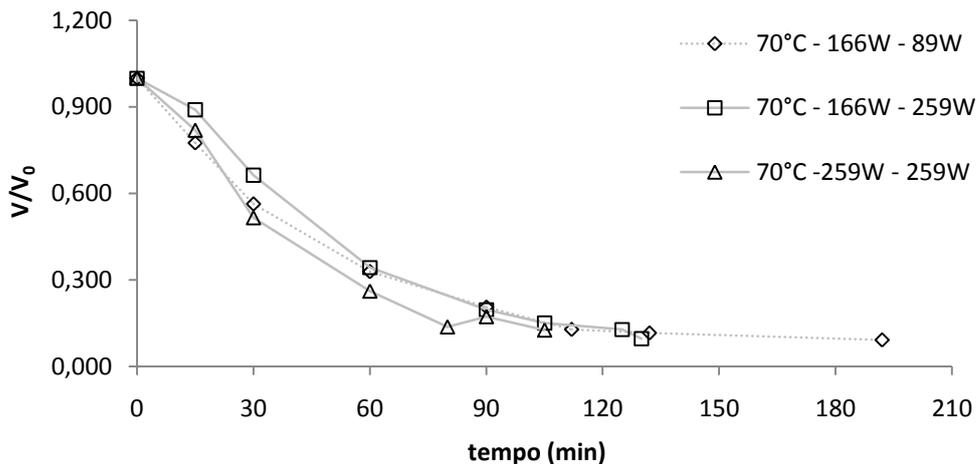


Figura 4.48 - Encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo para temperaturas fixas do ar em 70°C.

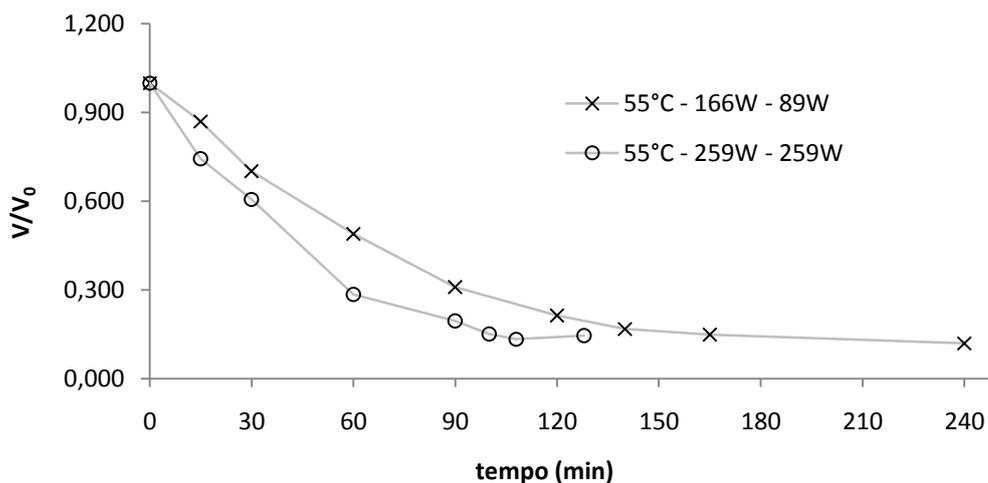


Figura 4.49 - Encolhimento dos pedaços de abacaxi desidratados em função do tempo para temperaturas fixas do ar em 55°C.

As Figuras 4.50 mostram as variações da espessura e área superficial em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar do processo de secagem em função do conteúdo de umidade adimensional das amostras.

Esta análise gráfica foi necessária para compreender ainda mais o encolhimento e suas alterações volumétricas. Os resultados mostram que ambas as dimensões diminuíram de forma linear em função do conteúdo de umidade (bs). Esta relação linear da área com o conteúdo de umidade também foi

observada por Yadollahinia e Jahangiri (2009) estudando o encolhimento de fatias de batata durante a secagem convectiva em temperaturas de 60, 70, 80°C.

Observou-se a estabilização da espessura e da área superficial no período II, a partir de  $X/X_0$  (bs) de aproximadamente 0,1, ou seja, no final do processo. Resultados provavelmente consequentes do endurecimento superficial em baixo conteúdo de umidade, o que diminuiu o nível de encolhimento no final do processo de secagem.

A dimensão do produto seco com aproximadamente 40% de umidade (bu) que mais sofreu variação foi a espessura, exceto para o experimento a 55°C e 259W. Nesta condição a área superficial e a espessura obtiveram variações de aproximadamente 60% do seu valor inicial. A condição que mais alterou a espessura foi a condição de temperatura do ar de secagem de 70°C e potência de micro-ondas de 166W no período I, 60%. Quando esta potência de micro-ondas foi reduzida para 89W no período II, houve uma redução da espessura em 76% do seu valor inicial. Este aumento da redução da espessura no período II da secagem com baixa potência de micro-ondas foi observado em temperaturas de 55°C e 166W no período I e 89W no período II, de 56% para 71%, respectivamente. Além disso, não foram observadas grandes diferenças na porcentagem de redução da área superficial com a mudança da potência de micro-ondas em todas as condições.

Raghavan e Silveira (2001) ao estudarem as características do encolhimento de morangos osmoticamente desidratados combinados com secagem utilizando micro-ondas entenderam que as amostras secas em nível 0,2 W/g resultaram em menor diâmetro do que as amostras secas em nível de potência de 0,1W/g. Concluíram então que, amostras secas em nível de energia mais alto apresentavam menor diâmetro. No presente estudo houve uma tendência do aumento da densidade de potência de 0,2W/g para 0,6W/g proporcionar menor encolhimento.

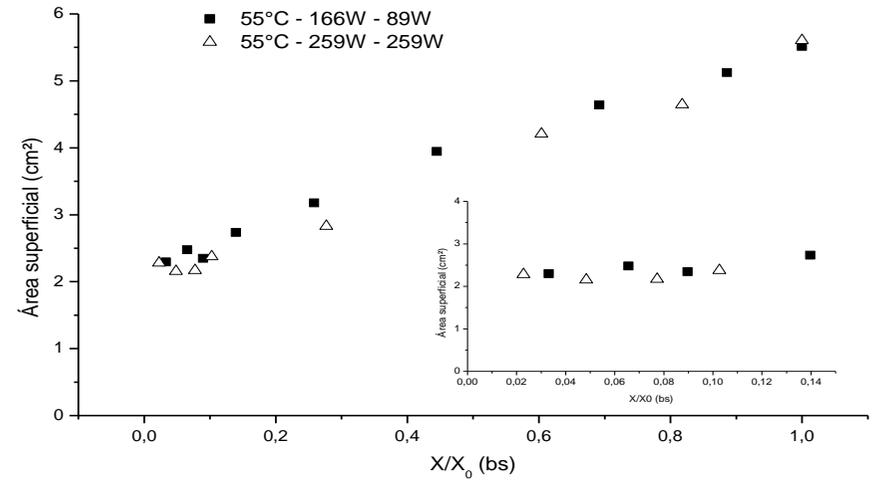
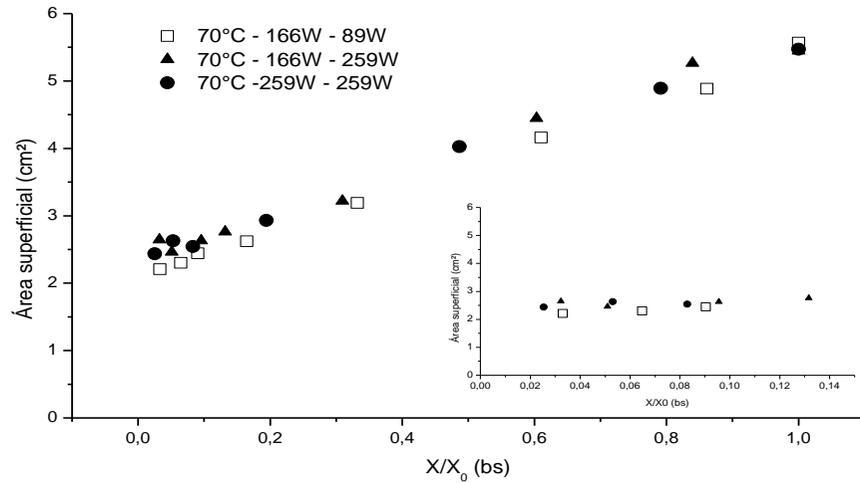
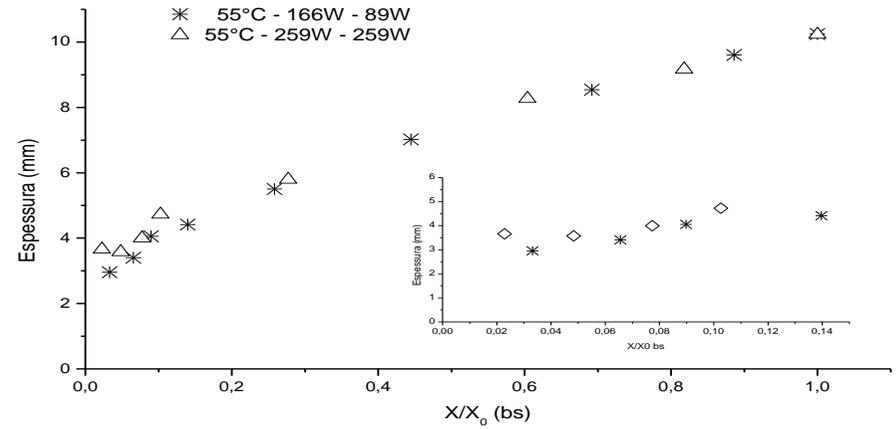
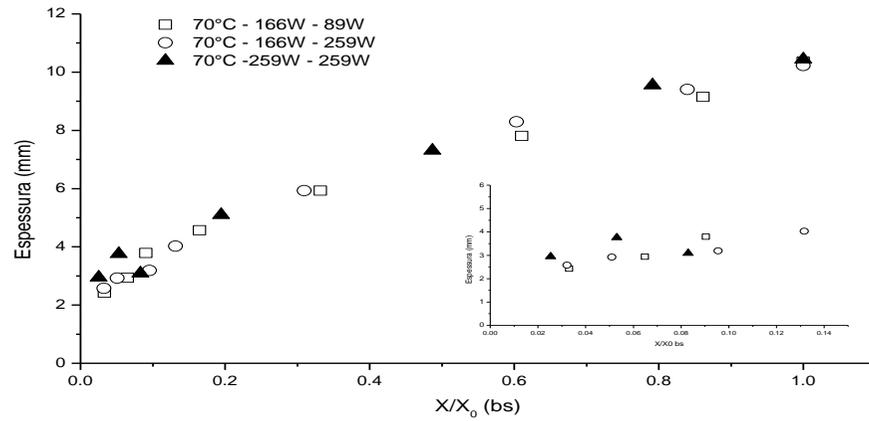


Figura 4.50 - Espessura (mm) e área superficial (cm<sup>2</sup>) versus umidade adimensional (X/X<sub>0</sub>) dos pedaços de abacaxi desidratados.

#### 4.3.5. Modelagem do encolhimento da secagem dos pedaços de abacaxi

As Figuras 4.51 e 4.52 mostram os gráficos de  $A/A_0$  em função de  $X/X_0$  com o ajuste realizado pelo modelo proposto por Suzuki *et al.* (1976), Equação (2.11), para as amostras de abacaxi secas em diferentes potências de micro-ondas e temperaturas do ar de secagem.

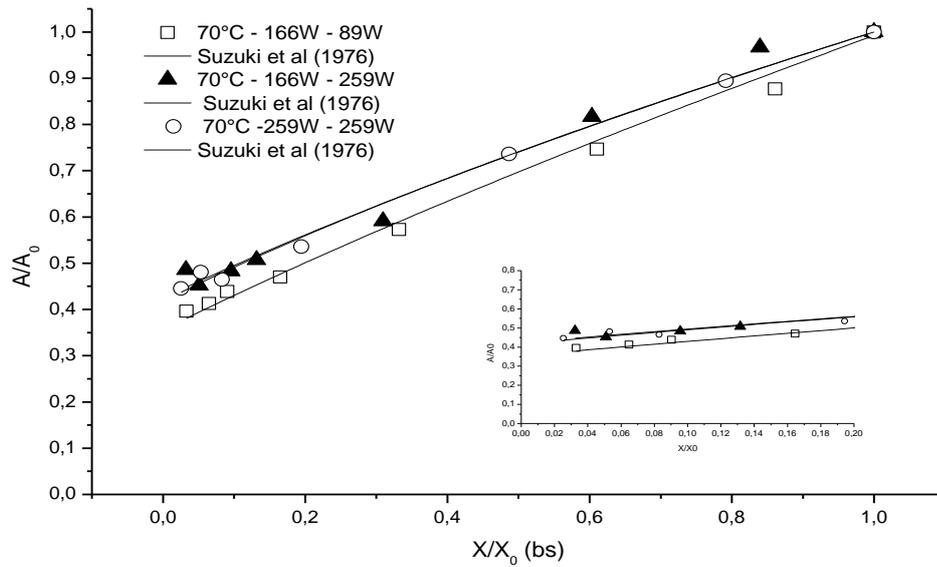


Figura 4.51 – Dados experimentais do encolhimento da área e preditos pelo modelo proposto por Suzuki *et al.* (1976) para abacaxi seco com ar a 70°C.

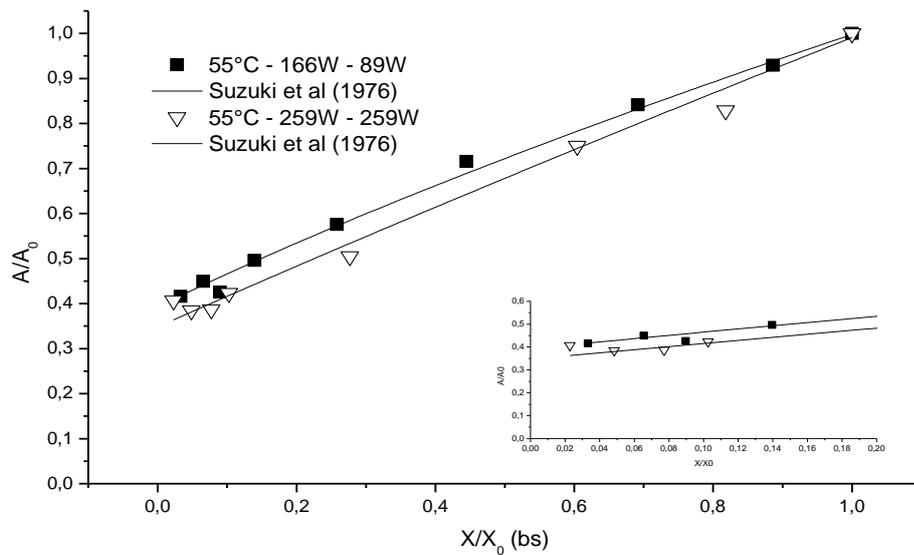


Figura 4.52 - Dados experimentais do encolhimento da área e preditos pelo modelo proposto por Suzuki *et al.* (1976) para abacaxi seco com ar a 55°C.

A Tabela 4.11 apresenta os parâmetros e os ajustes obtidos utilizando o modelo uniforme proposto por Suzuki e *et al.* (1976) para o processo de secagem dos pedaços de abacaxi.

Tabela 4.11- Parâmetros de ajuste obtidos do modelo uniforme proposto por Suzuki *et al.* (1976).

T°C	P(w)	n	Dp	R <sup>2</sup>
55°C	166W - 89W	0,71	0,01	0,9951
	259W - 259W	0,90	0,03	0,9862
70°C	166W - 89W	0,78	0,02	0,9931
	166W - 259W	0,67	0,02	0,9845
	259W - 259W	0,65	0,01	0,9960

Observando-se os coeficientes de correlação juntamente com os valores dos desvios padrão, verifica-se que o modelo utilizado se ajustou de maneira satisfatória aos dados experimentais. Com elevado coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>).

Com relação ao coeficiente n, verificou-se que as amostras secas a 70°C em potência de micro-ondas maiores, nos dois períodos, foram as que apresentaram um menor valor para este parâmetro. Segundo El-Aouar (2005), quanto menor o valor do parâmetro n, maior o nível de encolhimento sofrido pelas amostras. Na avaliação da variação do coeficiente de encolhimento em relação à temperatura do ar de secagem e potência de micro-ondas é notória uma tendência de temperaturas maiores combinadas com potências maiores provocarem um maior encolhimento. No entanto, este comportamento não está muito definido, visto que para  $X/X_0$  inferior a 0,1 as curvas fogem da linearidade.

#### 4.3.6. Caracterização do produto seco

Na Tabela 4.12 estão apresentadas as médias de atividade de água do produto *in natura* e desidratado em diferentes temperaturas e potência de micro-ondas.

Tabela 4.12 - Atividade de água e umidade final do abacaxi *in natura* e seco a aproximadamente 15% de umidade.

	Umidade (f) (g/100)	Aw
70°C - 166W - 89W	16,06 ± 1,71	0,392
70°C - 166W - 259W	26,84 ± 3,55	0,623
70°C - 259W - 259W	30,22± 2,01	0,526
55°C - 166W - 89W	23,87± 2,31	0,509
55°C - 259W - 259W	22,14± 4,16	0,512
Média	23,82	0,51
Desvio Padrão	5,32	0,08
CV%	22,34	15,94

Observa-se que para as diferentes temperaturas do ar de secagem (55 e 70°C) e potência de micro-ondas (89W, 166W e 259W), houve diferença no valor médio da atividade de água do produto *in natura* quando comparado ao produto após a secagem, ou seja, a temperatura do ar de secagem e potência de micro-ondas influenciou na atividade de água do produto. Resultados importantes já que a atividade de água é uma das propriedades mais relevantes para o processamento, conservação e armazenamento de alimentos.

Verificou-se também que as amostras secas em todas as condições testadas atingiram valores de atividade de água inferiores a 0,65 e na maioria dos casos, inferiores a 0,53, resultados semelhantes aos encontrados por Botha *et al.* (2012) e Changrue e Orsat (2009). Segundo Bobbio e Bobbio (1984), alimentos ricos em água ( $aw > 0,90$ ), podem formar soluções diluídas com componentes do alimento e promover o desenvolvimento dos microrganismos. Enquanto que para atividade de água menor que 0,60, tem-se um pequeno ou nenhum crescimento microbiano.

A Figura 4.53 apresenta a capacidade de reidratação das fatias de abacaxi secos em diferentes condições de secagem.

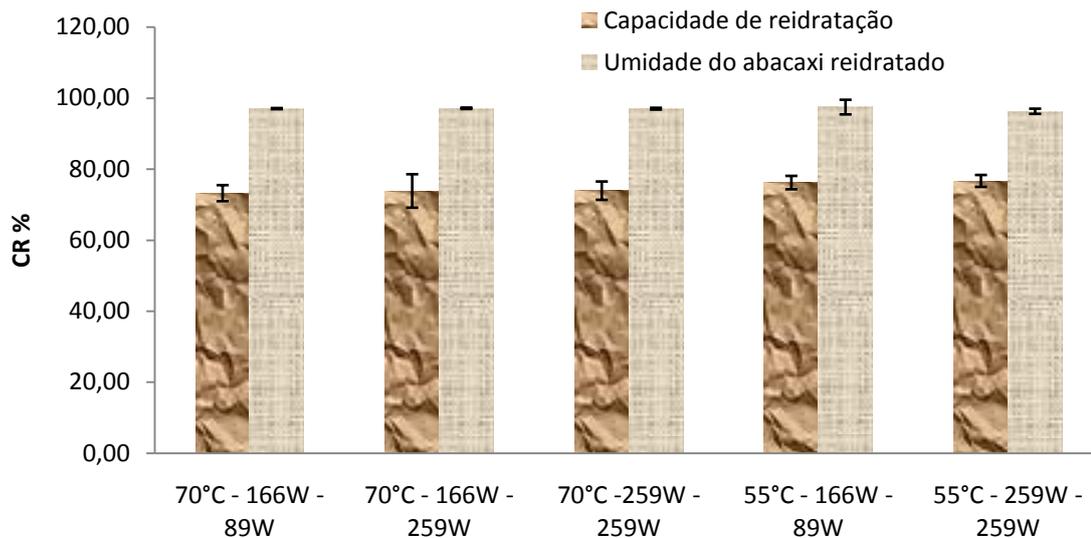


Figura 4.53 - Capacidade de reidratação e umidade do produto reidratado dos pedaços de abacaxi secos com ar e micro-ondas para todas as condições experimentais.

Não há diferenças significativas em nível de  $P < 0,05$  pelo teste F na capacidade de reidratação em relação às diferentes potências de micro-ondas e temperaturas aplicadas, ou seja, as mudanças de potência de micro-ondas nos períodos I e II não foram suficientes para alterar a estrutura física do produto, mas apresentaram uma boa capacidade de absorver água. Este fator é importante quando se deseja a utilização deste produto como ingredientes para formulação de outros produtos. No entanto, neste caso, a capacidade de reidratação dos pedaços de abacaxi secos não deve ser considerada como um indicativo seguro da qualidade do produto. Botha *et al.* (2012, a) também observaram que a capacidade de reidratação dos pedaços secos de abacaxi não é afetada pelas condições da programação de aplicação de potência na secagem, ou seja, independente do programa, do volume inicial ou do teor de água das amostras que tinham antes da reidratação.

A Figura 4.54 apresenta a porosidade do abacaxi seco em todas as condições experimentais. Os resultados mostram que em alguns casos a porosidade apresentou um leve aumento no produto seco comparado ao produto *in natura*, exceto quando o processo foi conduzido em maiores temperaturas. Pode-se também observar que as temperaturas menores resultaram em maiores porosidades, indicativo que estas amostras apresentaram mais espaços vazios. Giri e Prasad (2007) verificaram que a utilização de micro-ondas e vácuo na

secagem de cogumelos criou um produto mais poroso, o que resultou na reidratação mais rápida em relação ao produto seco por convecção com ar quente.

No presente trabalho os poros formados não foram suficientes para causarem diferenças no produto reidratado. Quando o processo de secagem encontra-se em baixo teor de umidade, a rigidez do material faz com que ocorra a estabilização do encolhimento, conforme apresentado nas Figuras 4.45 e 4.46. Entretanto, o que se esperava era o aumento na porosidade das amostras de acordo com o grau de danos causados aos tecidos celulares nestas condições, conseqüentemente no processo de reidratação distinto de acordo com as variações das potências de micro-ondas e temperaturas do ar.

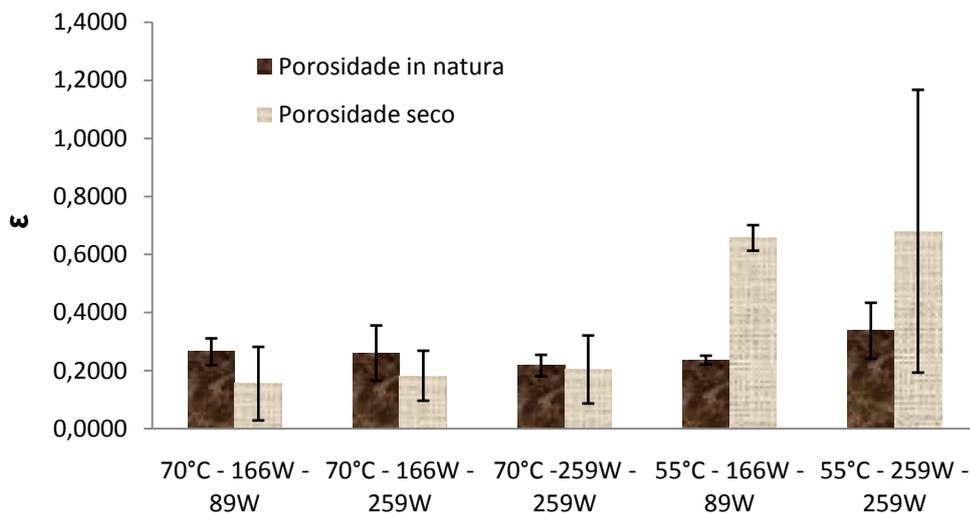


Figura 4.54 - Porosidade do abacaxi *in natura* e depois de seco

#### 4.3.7. Isoterma de sorção

A Figura 4.55 apresenta a isoterma de adsorção a 25°C pelo método gravimétrico estático, utilizando-se soluções salinas saturadas.

A Tabela 4.13 relaciona os teores de umidade de equilíbrio ( $X_{eq}$ ) com a atividade de água ( $a_w$ ) para a construção da curva da isoterma de sorção.

Tabela 4.13 - Teores de umidade de equilíbrio ( $X_e$ ) e atividade de água ( $a_w$ ) em diferentes soluções salinas saturadas

Sal			Desvio padrão ( $X_{eq}$ )
	$A_w$	$X_{eq}$ (g água/g massa seca)	
Acetato de potássio ( $KC_2H_3O_2$ )	0,225	0,215	0,056
Carbonato de potássio ( $K_2CO_3$ )	0,435	0,324	0,125
Nitrito de sódio ( $NaNO_2$ )	0,636	0,466	0,058
Cloreto de sódio ( $NaCl$ )	0,756	0,546	0,021
Cloreto de potássio ( $KCl$ )	0,846	0,584	0,407

Como esperado, observa-se que a umidade de equilíbrio dos pedaços de abacaxi secos foi crescente à medida que a atividade de água dos sais aumenta.

Inicialmente os pedaços de abacaxi secos à temperatura do ar de 70°C e potência de micro-ondas constante de 259W apresentaram, em média, 17,7% (bu) de umidade. Os resultados obtidos mostram que as amostras absorveram água (adsorção) em todas as soluções salinas relacionadas à tabela 4.13.

Observa-se também que de acordo com os valores de  $X_{eq}$  o abacaxi seco com micro-ondas apresenta boa absorção de água, ou seja, higroscópico, indicando cuidados na embalagem e durante seu armazenamento.

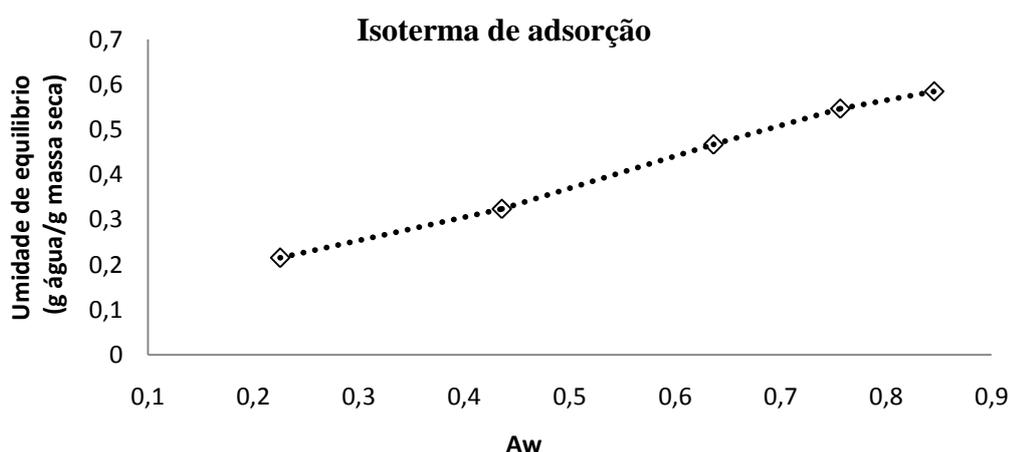


Figura 4.55 - Isoterma de sorção dos pedaços de abacaxi em função da atividade de aguados sais

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

As condições testadas atingiram valores médios de atividade de água inferiores a 0,6, aceitável em termos de preservação do produto em relação à deterioração e contaminação microbiológica.

O aumento da temperatura do ar de secagem e da potência de micro-ondas proporcionou uma taxa de secagem maior para atingir o mesmo conteúdo de umidade e o processo realizado com potência de micro-ondas maiores para uma mesma temperatura reduziu substancialmente os tempos de secagem.

As taxas de secagem da fruta *in natura* apresentaram valores crescentes e decrescentes para o período I e decrescente no período II da secagem para as potências de micro-ondas e temperatura aplicadas ao processo. As taxas de secagem são maiores no período I da secagem quando o conteúdo de umidade é maior, principalmente para potência a fixada em 259W.

Quanto maior a potência de micro-ondas aplicada, maior é o aumento de temperatura do material ao longo do tempo. A taxa de aumento da temperatura é menor para potência de micro-ondas mais baixas.

O encolhimento foi observado em todas as condições de processo experimentais adotadas e este fenômeno foi praticamente linear com a umidade. Entretanto, para uma mesma potência de micro-ondas o tempo gasto para atingir o mesmo nível de encolhimento foi menor em temperaturas mais elevadas. Além disso, há indício de que a elevação da potência proporciona aumento de  $V/V_0$ .

Foi também possível a modelagem das cinéticas de secagem e de encolhimento dos pedaços de abacaxi para todos os ensaios de secagem com micro-ondas e ar quente, de acordo com o modelo de Page e Suzuki *et al.* (1976), respectivamente.

A capacidade de reidratação não diferenciou estatisticamente em nível de  $P < 0,05$  de probabilidade pelo teste F com relação à aplicação de potência de micro-ondas constante ou variável e temperaturas do ar quente de secagem, mas as aberturas intercelulares (poros) criadas pela interação resultaram em uma boa absorção de água, aproximadamente de 70% em todas as condições de processo. Essa interação entre as potências e temperatura do ar pode ser explorada para o desenvolvimento de produtos tipo snack.

A isoterma de adsorção do abacaxi seco (70°C e 259W) mostra que o abacaxi seco é higroscópico, indicando cuidados na embalagem e durante seu armazenamento.

Estas informações poderão auxiliar no desenvolvimento de processos de secagem de material biológico buscando preservar suas características estruturais, inclusive na tomada de decisões referentes à quantidade de energia necessária para acelerar o processo de secagem.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, C. O. de., Vilar, L. da C., Sousa, L. F. da S., Reinhardt, D. H., Macedo, C. M. (2004) Peso médio do abacaxi no Brasil: um tema em discussão. *Bahia Agrícola*, 6 (3):41-46.
- AOAC (1997) *Official Methods of Analysis*, Association of Official Analytical Chemists, Washington.
- Argandoña, E. J. S. (2005) *Goiabas desidratadas osmoticamente e secas: Avaliação de um sistema osmótico semicontínuo, da secagem e da qualidade*. Tese (Mestrado em Engenharia Alimentos) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 172p.
- Askari G.R., Emam-Djomeh, Z., Mousavi, S.M.. (2006) Effects of Combined Coating and Microwave Assisted Hot-air Drying on the Texture, Microstructure and Rehydration Characteristics of Apple Slices. *Food Science and Technology International*.
- Barbanti, D., Mastrocola, D., Pizzarani, S. (1995) Air drying of plums influence of some process parameters on the specific drying kinetics. *Sciences Des Aliments*, 15:19-29.
- Barboza A. C. R. N, Cruz , C. V. M. S., Graziani, M. B., Lorenzetti, M. C. F., Sabadini, E. (2001) Aquecimento em forno de micro-ondas / desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais. *Química Nova*, 24 (6): 901-904.
- Bleinroth, E. W. (1987) Capítulo II: matéria-prima. Série frutas tropicais: abacaxi. 2ed. ITAL – Campinas, p. 133-164. In: Valente
- Bobbio, P.A, Bobbio, F.O. (1984) *Química do processamento de alimentos*. Campinas: Fundação Cargill, 232p.

- Botha G.E., Oliveira, J.C., Ahrné, L. (2012,a) Microwave assisted air drying of osmotically treated pineapple with variable power programmes. *Journal of Food Engineering*, 108:304-31.
- Botha, G.E., Oliveira J.C., Ahrné, L. (2012,b) Quality optimisation of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission. *Food and bioproducts processing*. 90:171–179.
- Brod, F.P.R. (2003) Avaliação de um secador vibro-fluidizado. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 361p.
- Buffler, C. (1991). A guideline for power output measurement of consumer microwave ovens. In: Marsaioli JR. A. (2001) Tecnologia das micro-ondas no processamento de alimentos. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, p. 249.
- Buffler, C. R. (1992) Introduction to microwaves Microwave cooking and processing: Engineering fundamentals for the food scientist. New York Van Nostrand Reinhold, 1-13.
- Buffler, C.R. (1992) Microwave cooking and processing: engineering fundamentals for the food scientist. New York, V.N. Reinhold Avi, p 169.
- Campos, M.S., (1986) Influencia da energia de micro-ondas na qualidade tecnológica do trigo. Tese (Mestrado Engenharia de Alimentos e Agrícola) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 120p.
- Changrue, V., Orsat, V. (2009) Osmotically dehydrated microwave vacuum drying of carrots, *Canadian Biosystems Engineering*, 51:311-319.
- Companhia De Desenvolvimento Dos Vales Do São Francisco E Do Parnaíba (CODEVASF). (2008) Cadeia produtiva de frutas secas/desidratadas: oportunidade de Investimento em frutas Desidratadas e uva passa nos Vales do são francisco e do Parnaíba. Disponível em: <<http://www.codevasf.gov.br>>. Acesso em: 17 Abril. 2011.
- Copson, D. A. (1975) Microwave Heating. The AVI Publishing Company, 2<sup>o</sup> Edition.
- Ditchfield, C. (2000) Estudo dos métodos para a medida da atividade de água. Tese (Mestrado em Engenharia) – São Paulo – SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 195p.
- EL-Aouar, Â. A. (2005) Estudo do processo de secagem de mamão formosa (Carica papaya L.) fresco e pré-tratado osmoticamente. Tese (Doutorado em Engenharia Alimentos) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 241p.
- Fellows, P. J. (2006) Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e práticas. 2. Ed. Porto Alegre: Artmed, p. 602.

- Fernandes, F.A.N., Linhares, F.E. Jr., Rodrigues, S. (2008) Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15:1049 – 1054.
- Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO). Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Acesso em: 27 de dezembro de 2012.
- Fortes, M., Okos, M. R. (1980) Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. *Advances in Drying*, 1:119-153.
- Gabas, A.L. (2002) Influência das condições de secagem de ameixa (*Prunus domestica*) na qualidade do produto final. Tese (Doutorado em Engenharia Alimentos) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 168p.
- Ghanem N., Mihoubib, D., Kechaoua, N., Mihoubic N. B. (2012) Microwave dehydration of three citrus peel cultivars: Effect on water and oil retention capacities, color, shrinkage and total phenols content. *Industrial Crops and Products* – 40:167– 177
- Giri, S. K., Prasad S. (2007) Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78 (2):512–521.
- Gonçalves, N.B., Carvalho, V.D. de. Abacaxi pós-colheita. 2: característica da fruta. Frutas do Brasil, Brasília, v.5, p.13-27, (2000) In: RAMOS, M.J.M. (2006). Caracterização de Sintomas de Deficiência de Macronutrientes e de Boro em Abacaxizeiro Cultivar Imperial. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 109p.
- Hatamipour, M.S., Mowla D. (2002) Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, 55: 247–252.
- Heredia, A., Barrera C., and Andrés A. (2007) Drying of Cherry Tomato by a Combination of Different Dehydration Techniques. Comparison of Kinetics and Other Related Properties *Journal of Food Engineering*, 80:111-118.
- Hochheim, M. R. , Silva, M. A., Braga, A. M. P. (2010) Estudo do encolhimento de abacaxi submetido à secagem em atmosfera modificada pela adição de etanol–parte 2. Anais do XVIII Congresso Interno de Iniciação Científica da UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas. V.18, 541p.
- Hofsetz, K. (2007) Propriedades físicas e transições de fase da banana nanica submetida à secagem com pulso HTST (inicial). Tese (Doutorado em Engenharia Alimentos) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 237p.

- Hofsky, V. A., Gomes, J. P., Neto, A. L. B., Silva, F. L. H. DA., Almeida, F. DE A. C. (2009) Cinética de secagem de abacaxi cv pérola em fatias. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, 11 (2):123-128.
- Hossain, M. D. Bala, B.K., Hossain. M. A., Mondol, M.R.A (2001) Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. *Journal of Food Engineering*, 48:103-107.
- IBGE. (2012) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&o=11&i=P&c=1612>. Acesso em: 27 de dezembro de 2012.
- Iguedjatal, T., Louka, N., Allaf, K. (2008) Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden decompression. *Journal of Food Engeneering*, 85:180-190,
- Instituto Adolfo Lutz. (1985) Métodos químicos e físicos para análise de alimentos, 3.ed. São Paulo: Inst. Adolfo Lutz, 1:533.
- Jones, P.L., (1986) High frequency dielectric heating in paper making. *Drying Technology*, 4 (2):103-107.
- Karatas, F., Kamisli F. (2007). "Variations of Vitamins (A, C and E) and MDA in Apricots Dried in IR and Microwave." *Journal of Food Engineering*, 78:662-668.
- Keey, R.B. (1978). Introduction to industrial drying operations. Oxford: Pergamon Press, 376p.
- 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*, 37:497-503.
- Kurozawa, L. E, Hubinger, M. D, Park, K. J, (2011). Encolhimento do mamão (Carica papaya L.) durante a secagem convectiva: Influência do fenômeno de transição vítrea, 05/2011, 11 Congresso Internacional De Engenharia E Alimentos / ICEF 2011 (XXMES), 1:1-6, Atenas, Grécia.
- Lescano C., César, L., Tonin, L., Pereira, N., Marsaioli, A. (2008). Kinetics Evaluation Of The Microwave Drying Of Okara. In: 16th International Drying Symposium.
- Lewis, W.K. (1921). The rate of drying of solid materials. *J. Ind. Eng. Chem.* 13 (5):427-432.
- Liu, L. (2003). Entry into supermarket of agricultural products after entering WTO. *Agricultural Products Processing*, 6 (3):4-5.
- Lombraña, J.I., Rodríguez, R., Ruiz, U. (2010). Microwave-drying of sliced mushroom. Analysis of temperature control and pressure. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11 (4):652-660

- López, I.I. R., Espinosa H. R., Lozada P. A., Pozos, M.E. B., Alvarado M.A. G. (2012). Analytical model for variable moisture diffusivity estimation and drying simulation of shrinkable food products. *Journal of Food Engineering*, 108 (3): 427–435.
- Marsaioli JR. A. (1991). Desenvolvimento da tecnologia de aplicação de microonda sem secador cilíndrico-rotativo combinado com ar quente para produtos granulados. Tese (Doutorado em Engenharia Alimentos) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 218p.
- Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48 (2): 177–182.
- Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44 (2): 71-78.
- MAYOR, L., SERENO, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 6:373–386.
- Michelis, A. de., Pirone, B. N., Vullioud, M. B., Ochoa, M. R., Kessler, A. G., Márquez, C. A. (2008). Cambios de volumen, área superficial y factor de forma de Heywood durante la deshidratación de cerezas (*Prunus avium*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 28 (2):317-321.
- Mudgett, R. E. (1982). Electrical properties of foods in microwave processing. *Food technology*. 36 (2):109-115.
- Mujumdar, A. S., & Devahastin, S. (2000). Fundamental principles of drying. In S. Devahastin (Ed.), *Mujumdar's practical guide to industrial drying*, p. 1–22.
- Nicoleti, J. F. (2001). Cinética de secagem e encolhimento de fatias de abacaxi. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - São José do Rio Preto – SP, Universidade Estadual Paulista –UNESP, 85p.
- Ordóñez, J. A. *et al.* (2005). *Tecnologia de Alimentos*. Tradução: Fátima Murad. Porto Alegre: Artmed, 1:294.
- Ozkan, A., Akbudak B., Akbudak, N. (2007). Microwave Drying Characteristics of Spinach." *Journal of Food Engineering*, 78:577-583.
- Park, K. J. B. *et al.* (2008). Considerações termodinâmicas das isotermas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, 10 (1):83-94.
- Park, K. J., Antonio, G. C., Oliveira, R. A. de., Park, K. J. B. (2007). Conceitos de processo e equipamentos de secagem. Campinas. 47p. .
- Park, K. J., Nogueira, R. I. (1992). Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. *Engenharia Rural*, Piracicaba, 3 (1):81-86.

- Pereira, N. R. (2007). Estudo da aplicação de micro-ondas na secagem de bananas tratadas osmoticamente. Tese (Doutorado em Engenharia Alimentos) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 188p.
- Pereira, N. R., Marsaioli JR. A., Ahrne´L M. (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering*, 81 (1):79–87.
- Pimentel-Gomes, F. (2009) Curso de estatística experimental. 15ª Ed. Piracicaba: FEALQ, p 451.
- Prabhanjan, D. G., Ramaswamyb, H. S., Raghavan, G. S. V. (1995). Microwave-assisted Convective Air Drying of Thin Layer Carrots. *Journal of Food Engineering*. 25 (2):283–293.
- Raghavan, G. S. V. & Silveira A. M. (2001). Shrinkage characteristics of strawberries osmotically dehydrated in combination with microwave drying. *Drying Technology*, 19 (2):405-414.
- Ramallo, L. A., Mascheroni, R. H. (2012). Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. *Food and bioproducts processing*. 90:275–283.
- RAMOS, M.J.M. (2006). Caracterização de Sintomas de Deficiência de Macronutrientes e de Boro em Abacaxizeiro Cultivar Imperial. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 109p.
- Regie, M. e Schubert, H. (2005). Introducing microwave processing of food: principles and technologies University of Karlsruhe, Germany, p.3-21.
- Reinhardt, D.H. (2000) A planta e o seu ciclo. In: Reinhardt, D.H., Souza, L.F. da S., Cabral, J.R.S. (eds.). Abacaxi-produção-aspectos Técnicos. Frutas do Brasil, 7, Brasília, p.13-14.
- Reinhardt, D.H., Souza, L.F.da S., Cunha, G.A.P da (2000) Exigências edafoclimáticas Abacaxi-produção-aspectos técnicos: Frutas do Brasil, 7, Brasília, p.11-12.
- Rodrigues, E. (2006). Secagem de abacaxi em secador de leito fixo. Tese (doutorado) - Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa.
- Rosa, J. G. (2010). Secagem de cenoura (*Daucus carota* L.) em micro-ondas. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – São Carlos – SP, Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR, 96p.
- Santos, I. P. dos (2011). Parâmetros de qualidade na produção de abacaxi desidratado. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Montes Claros – Janaúba – MG, Universidade Estadual de Montes Claros – UNIMONTES, 152p.

- Sarzi, B., Durigan, J.F. (2002). Avaliação física e química de produtos minimamente processados de abacaxi-‘pérola’. Jaboticabal. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 24 (2):333-337.
- SAS® Statistical Analysis System. (2003) SAS Institute Inc.. SAS User’s Guide. Cary. USA: SAS Inst.
- Schiffmann, R. F. (1987). Microwave and dielectric drying. In: Mujundar, A. S. Handbook of industrial drying. New York: Marcel Dekker, p 327-356.
- Sharma, G. P., Prasad, S. (2001). Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 50:99–105.
- Silva, F. A. (2005). Estudo da Aplicação de Energia de Micro-ondas na Secagem da Noz Macadâmia (*Macadamia integrifolia* Maiden & Betche) Tese (Doutorado em Engenharia Alimentos) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 165p.
- Silva, F. A., Marsaioli JR, (2003). Aspecto econômico de um processo de secagem de amêndoas de castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) assistida a micro-ondas. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, 5 (2):157-167.
- Silva, F. A., Marsaioli JR, Maximo, G.J., Silva, M.A.A.P., Gonçalves, L.A.G. (2006). Microwave assisted drying of macadamia nuts. *Journal of Food Engineering*, 77:550–558.
- Silva, G.C., Maia, G.A., Souza Filho, M.S.M., Figueiredo, R.W., Filgueiras, H.A.L.C., Souza, A.C.R. (2003). Efeito de diferentes concentrações de cloreto de cálcio na qualidade do abacaxi “pérola” minimamente processado. Jaboticabal. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25 (2):216-219.
- Smit. J Micro-ondas. Ed. Érica Ltda, 1988. 135p.
- Suzuki, K., Kiyoshi, K., Hasegawa, T., Hosaka, H. (1976). Shrinkage in dehydration of root vegetables. *Journal Food Science*. 41:1189–1193.
- Taco - Tabela Brasileira de Composição de Alimentos. Campinas: NEPA/UNICAMP, 2011. 164p. Disponível em <<http://www.unicamp.br/nepa/taco/>>. Acesso em 22 de agosto de 2012.
- THÉ, P. M. P.; NUNES, R. de P.; MOREIRA DA SILVA, L. I. M.; ARAÚJO, B. M.de. (2010). Características físicas, físico-químicas, químicas e atividade enzimática de abacaxi cv. *smooth cayenne* recém colhido. *Alimentos e Nutrição*. 21 (2):273-281.
- Tuley, L. (1996). Swell time for dehydrated vegetables. *International Food Ingredients*, p. 23 e 27.
- Valente, P. P. S. da S. (2007). Desidratação osmótica e secagem de abacaxi (ananás comosus (L.) Merrill), variedade pérola. Tese (Mestrado em Engenharia Alimentos) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 165p.

- Van Arsdel, W.B. (1973). Drying phenomena. In: Van Arsdel, W.B., Copley, M.J.Morgan Jr., A.I. Food dehydration, 2 ed., Westorp., AVI publishing Co., 1(3):22-57.
- Vega, A., Fito, P., Andrés, A., Lemus, R. (2007). Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo). *Journal of Food Engineering*, 79 (4):1460-1466.
- Von Hippel, A.R. (1995). Dielectric and waves. 2. Ed. Massachusetts: MIT Press. 284p.
- Wang, N., Brennan, J. G. (1995). A mathematical model of simultaneous heat and mass transfer during drying of potato. *Journal of Food Engineering*, 24:47–60.
- Yadollahinia, A., Jahangiri. M. (2009). Shrinkage of potato slices during drying. *Journal of Food Engineering*, 94:52-58.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J., Oliveira, F.A.R. (2008). Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering*, 84:430-440.
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S., Wang,S. (2006). Trends in microwave related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 17:524-534.

## Apêndice 1 - Método de teste de medida de potência em forno de micro-ondas

**TESTEIMPI 2–Litros**”(Adaptado de “Buffler, C.1991. A guideline for power output measurement of consumer microwave ovens. *Microwave World* **10** (5):15.”)

IMPI=INTERNATIONAL MICROWAVE POWER INSTITUTE

O forno foi ligado sob voltagem nominal de rede, ajustado na posição alta ou máxima, com uma carga de água de  $2000 \pm 5$  g, colocada em dois béqueres de 1L. Inicialmente, os béqueres estavam à temperatura ambiente. A temperatura inicial da água estava a  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , medida após a água ter sido colocada nos béqueres e antes da colocação destes no forno de micro-ondas. Os béqueres foram colocados no centro do forno, lado a lado, na dimensão da largura da cavidade, e tocando-se mutuamente. O forno foi ligado por 2 minutos e 2 segundos. Os béqueres foram removidos do forno, e as temperaturas finais foram medidas e registradas.

A potência foi calculada a partir da seguinte fórmula:

$$P(W) = \frac{70 \times \Delta T_1 (^{\circ}\text{C}) + \Delta T_2 (^{\circ}\text{C})}{2}$$

onde  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  são as elevações da temperatura da água nos dois béqueres, calculadas subtraindo as temperaturas iniciais das temperaturas finais respectivas. O forno foi pré-aquecido através do aquecimento dos 2L de água por 5 minutos, enxugando as paredes com um trapo úmido e frio. A água em cada béquer foi agitada antes de se medir as temperaturas iniciais e finais.

1° repetição									
Níveis de potência	Massa de água (g)					Massa de água (g)			
	Béquer 1	$T_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_f$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta T_1$	Béquer 2	$T_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_f$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta T_2$	P(W)
1	1000,45	20,6	18,9	1,7	1000,01	21,3	19,7	1,6	115,5
2	1001,58	19,1	21,4	2,3	1000,47	19,2	22	2,8	178,5
3	1002	19	23	4	1001,41	19,7	23,6	3,9	276,5
4	1001,39	20,2	24,3	4,1	1002	21	25,9	4,9	315
5	1000,17	19,4	25,4	6	1002	21	26,6	5,6	406

2° repetição									
	Massa de água (g)				Massa de água (g)				
Níveis de potência	Béquer 1	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	ΔT1	Béquer 2	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	ΔT2	P(W)
1	1000,5	19,2	20,3	1,1	1001,1	21,3	22	0,7	63
2	1001,51	20,5	22,5	2	1000,29	20,1	22,5	2,4	154
3	1000,97	20,8	24,2	3,4	1000,33	21,5	25	3,5	241,5
4	1000,38	18,2	22,4	4,2	1000,38	21,5	26,2	4,7	311,5
5	1000,57	18,9	23,6	4,7	1000,4	18,2	23,7	5,5	357

### Apêndice 2 - Potência real do forno de micro-ondas

Níveis de potência	Média P(W)
1	89
2	166
3	259
4	313
5	381

### Apêndice 3 - Dados do ajuste linear para potência de micro-ondas constante.

	a	b	R <sup>2</sup>
70°C - 0W	0,903	0,0073	0,997
70°C - 166W	0,87	0,082	0,994
70°C - 166W	0,859	0,092	0,994
70°C - 166W	0,866	0,11	0,99
70°C - 259W	0,843	0,09	0,986
70°C - 381W	0,845	0,107	0,99
55°C - 166W	0,887	0,091	0,998
55°C - 259W	0,833	0,107	0,988
55°C - 381W	0,819	0,119	0,983
40°C - 166W	0,859	0,107	0,996
40°C - 259W	0,804	0,101	0,984
40°C - 381W	0,842	0,109	0,992
0°C - 381W	0,804	0,124	0,982

### Apêndice 4 - Dados do ajuste linear para potência de micro-ondas Variáveis

	Período I			Período II		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
70°C - 166W - 89W	0,907	0,037	0,989	0,757	0,067	1
70°C - 166W - 259W	0,938	0,067	0,999	1,688	0,0083	1
70°C - 259W - 259W	0,92	0,072	0,999	0,65	0,193	1
70°C - 166W - 259W	0,959	0,064	0,997	1,761	0,039	1
55°C - 166W - 89W	0,904	0,082	0,999	0,449	0,155	1
55°C - 259W - 259W	0,878	0,075	0,988	0,864	0,091	1

Apêndice 5 - Dados experimentais da cinética de secagem com aplicação de potências de micro-ondas constante

1- 70°C - 166W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	22,6	25,8	65	80	0
15	102,0	26,2	60,4	68,7	3,7
20	103,0	26	60,1	67,2	2,1
30	105,0	26,2	57,6	66,5	2,1
45	102,0	26,2	59	66,7	1,8
60	106,0	26	62	68,4	2,5
75	110,0	25,9	62,9	68,8	2,3
90	117,0	26,2	65	68,5	2
105	120,0	26	60,3	68,9	0,6
115	123,0	26,4	57,2	68,9	0,7
125	127,0	26,3	56	70,7	0,3
135	127,0	24,6	55,6	70,2	0,3
145	125,0	26,3	56,3	71,1	0,2
155	126,0	26,5	56,1	70	0,3

2- 55°C - 259W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	22,1	24,5	57,7	66,3	0,8
15	80	24,7	55,4	53,9	12,6
30	87	24,9	54	53,5	11,8
45	89	25,1	53,8	54,6	9,6
60	96	25,3	53,7	56	8
75	100	25,5	52,2	57	6,1
90	110	25,5	52,3	57,5	5,7
105	117	25,8	51,5	57,7	5,1
115	114	25,8	51	58,4	4
125	110	26,1	50	58,6	3,7

3- 70°C -259W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	20,5	25,2	50,4	74,4	0,1
15	112	24,7	52,2	65,4	2,6
30	112	24,6	51,2	66,4	2
45	117	24,5	49,5	67,4	0,7
60	120	24,5	47,1	68,2	1
75	123	24,8	48	69,1	0,5
85	132	25,9	46,1	72,1	0,3
90	133	25,2	44,9	68,9	0,3
95	134	24,4	50,9	71,8	0,2
100	129	24,4	49,8	72,8	0,2
105	136	24,6	48,4	71,8	0,2

4- 40°C - 166W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	23,2	25,8	62,2	41,5	28,8
15	60	25,7	62	40,4	28,8
30	58	26,1	59,3	41,2	29,1
45	60	26,1	59,2	40	27,9
60	63	25,4	58,8	40,7	25,7
75	64	25,5	60,2	40,9	25,1
90	65	25,5	60,3	42,1	24,1
105	68	25,6	60,5	41,5	24,2
120	67	25,2	60,9	41,9	23,2
135	77	25	68	41,9	22,4
150	70	25,1	60,9	43,1	21,6
165	80	25	61,3	43	20,8
180	71	25,3	61,1	42,9	20,8
190	76	25,4	60,1	43,3	20,14
200	80	25,3	61,6	43,7	20
210	76	25,3	62	43,9	20,2
220	78	25	62,1	43,8	20,1
230	75	25,4	62	43,7	20,1
240	75	25,2	62,5	43,2	19,9
250	76	25,4	61,8	43,4	20,2
260	77	25,1	61,4	43,1	20
270	76	25	61,3	43	20,1
280	78	25,4	60,9	44	19,9
290	78	25,3	60,8	44,1	19,3
300	78	25,4	60,9	44,3	18,8
310	77	25,4	60,7	44	18,9
320	78	25,3	61,2	43,6	18,8

5- 55°C - 166W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	21,2	24,6	55,5	57,7	3,1
15	85	24,7	54,6	53,7	10
30	77	25,2	51,1	54	9,1
45	83	25	50,3	54,4	8,3
60	88	24,5	50,8	54,6	7,3
75	90	24,5	50,6	5,5	6,2
90	93	24,2	51,1	55,7	5,6
105	96	24,6	49,3	56,2	4,8
120	96	24,7	48,5	56,3	4,4
135	99	25	48,1	56,8	4
145	102	24,9	47,7	56,5	3,7
155	102	25	47,5	57	3,5
165	103	25,2	46,1	56,7	3,1
175	101	25	56,6	46,6	3,4
185	108	25	46,4	57,2	3,1
195	107	24,9	46,8	57,2	3
205	111	24,8	46,4	58,2	2,3
215	109	24,8	45,7	58	2,2
225	103	24,5	45,9	57,2	2,2
235	103	24,8	45,3	57,4	2,2
255	109	24,8	45	57,6	2,1
275	102	24,9	45,7	57	2,2
295	103	25,2	45	57,2	2,2

6- 55°C - 381W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	23,1	24,8	48,8	63,4	8,3
15	96	24,6	46,3	58,3	10,9
30	97	24,8	45,5	59,2	7,5
35	100	24,7	45,3	59	7,6
40	108	24,7	45	58,7	5,5
45	117	24,4	45,8	59,7	4,9
50	118	24,1	48,3	63,5	2,5
55	120	24,4	48,7	63,4	3,7
60	122	24,6	49,1	59,8	4,9
65	127	24,5	50,5	62,7	3,8
70	129	24,4	50,4	64,6	2,6
75	128	24,3	51,1	64,3	2

7- 70°C - 381W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	23,1	23,8	59,2	79,9	0,3
15	119	22,8	61,1	71,5	5,1
20	124	22,8	60,5	69,6	3,8
25	125	23	59,7	71,4	3,2
30	131	23,1	59,9	72,8	2,6
35	130	23,3	59,1	73,5	1,8
40	140	23,4	57,4	74,3	1,3
45	138	23,5	57,5	74,9	1
50	139	23,5	57,4	77,5	0,9
55	151	23,6	57,4	73,4	0,9
60	159	24,3	55	75,9	0,6
65	155	24,5	53,8	76,9	0,2

8- 40°C - 259W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	23,5	26,2	61,6	42	28,7
15	63	26,4	60	45,8	20,6
30	66	26,9	57,2	41,9	29,9
45	67	26,6	58,3	42,8	26,9
60	73	27,1	62,5	42,7	28,4
75	78	26,9	64,9	44,7	25,3
90	83	26,6	64,6	44,6	23,2
105	87	26,9	64,2	45,4	22
120	90	27	60,8	46,4	19,7
130	93	27,1	60,1	46,6	18,8
140	96	27,1	59,7	46,2	18,4
150	94	27,2	59,3	46,7	18
160	95	27,3	59,3	46,4	18,1
170	98	27,1	59,7	46,8	17,8
180	96	27,3	60,3	46,7	17,7
190	96	27,4	60,2	46,8	17,7
200	94	27,2	61,1	47,4	17,4
210	96	27,3	59,4	46,5	17,7
220	97	27,2	58	45,6	17,6
230	92	27,1	57,7	46,6	17,1

9- 40°C - 381W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	24,6	26,6	62,8	42	28,7
15	75	26,7	62,6	44,5	32,2
30	76	27,3	60,4	44,5	29
35	87	26,9	61,5	45,8	26,4
40	85	27,2	60,3	44,6	26,4
45	86	27,3	60,1	46,2	23,2
50	86	27,4	59,3	45,6	21,5
55	95	27,6	59,1	46,7	22,2
60	101	27,4	59,4	48,6	19,6
65	102	27,1	60,8	49,1	19,9
70	104	27,5	59,4	48,5	18,7
75	100	27,5	59,2	49,5	17,4
80	106	27,6	58,5	48,5	17
85	108	27,6	56,7	47,9	16,7
90	107	27,2	57,9	48,1	16,1
95	106	27,2	58	48,1	15,9
100	108	27,2	58,3	50,1	14,9

10- 70°C - 166W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	21,8	25,7	62	80	0,4
15	109	25,8	65,9	66,7	3,7
30	107	26	67,4	67,7	3,5
45	100	26,1	59,4	67,8	2,8
60	108	26,4	57,2	68,6	3,4
75	112	26,4	56,7	69,6	2,9
90	110	26,5	57	70,2	2,5
105	120	26,5	56	69,8	1,9
115	125	25,5	55,1	71,8	1,3
125	126	26,5	54	71,7	1,1
135	127	26,6	51,8	70,6	0,9
145	126	26,6	51,2	72,5	0,6
155	128	26,8	51,3	72	0,7

11- 70°C - 166W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	23,1	27	60,4	80	0,4
15	106	26,6	59,8	68,1	3,8
30	109	26,7	62,1	68	4,2
45	101	27	58,1	68,6	3,1
60	115	26,8	59,4	69,7	2,5
75	117	26,7	58,3	69,3	2,1
90	117	26,5	56,3	71,3	1,1
105	121	26,6	55,2	70,5	0,8
115	124	26,7	55,8	69,7	0,7
125	128	26,8	57,1	70,4	0,5
135	128	26,7	58,9	71,1	0,5
145	130	26,6	58,9	70,3	0,5
155	130	26,7	61,8	70,4	0,3
165	127	26,6	63,1	72,6	0,3

12- 70°C - 0W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	23,1	25,8	59,8	77	0,1
15	106	25,3	62,1	66,8	1,6
30	90	25,5	61,7	65,6	0,8
45	92	25	60,5	65,2	1,6
60	108	25,6	61	66,6	1,1
75	100	25,6	62,7	6,64	0,6
90	108	25,9	62,3	66,1	1
105	105	26,1	60,8	66,7	0,8
120	102	26	6	68	1,3
135	102	26,1	58	66,9	0,4
150	100	25,9	58,5	67,5	0
165	110	26	59	66,4	0
195	110	26,1	59,1	66,3	0,2
225	111	26,4	61,5	66,8	0,2
240	109	26,5	61,4	67	0,2
250	114	26,5	60,5	67,8	0,1
260	112	26,1	60	67,9	0,1
270	111	26	58,6	68	0,2
280	118	26,3	58,7	68,3	0,4
290	112	26,1	58,3	68,7	0,3
300	111	26,1	59,7	68	0,1
310	115	26,1	61,6	68,1	0,4
320	118	26	64	68,8	0,2
330	119	26,9	64,1	68,8	0,1

13- 0°C - 381W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	22,5	25,4	53,7	26,4	52,6
15	58	25,6	52,5	37,6	52,8
30	74	25,9	54,7	40	39,4
35	73	25,9	55,3	40,3	35,6
40	96	26	55,2	44,1	32,3
45	94	26,1	54,7	41,5	27,2
50	98	26,2	54,6	43,8	25,7
55	100	26,2	53,6	44,1	24,8
60	110	26,1	53,4	45	23,2
65	113	26,3	53,9	45,9	19,3
70	110	26,5	52,7	45,7	18,1
75	118	26,6	53,2	46,4	16,4
80	121	26,7	52,4	46,9	15,7
85	124	26,7	52,6	47,1	15,2

Apêndice 6 - Dados experimentais da cinética de secagem com aplicação de potências de micro-ondas variável

70°C - 166W - 89W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	22,3	24,1	62,8	76	0,1
15	98,0	24,2	61,8	70	4,7
20	108,0	24,1	64,4	67,6	4,5
30	105,0	23,3	73,9	67,6	4,6
60	108,0	23,8	67,4	67,8	2,4
90	112,0	24,2	64,4	69,9	2,4
112	120,0	24	62,3	69,8	1,7
132	114,0	24,1	61,6	67	0,4
142	117,0	24,1	60,8	69,4	0,9
152	118,0	24,1	59,7	69,6	0,5
162	119,0	24,2	57,9	69	0,4
172	119,0	24,1	56,3	68,7	0,2
182	117,0	24,2	57	70	0,3
192	118,0	24,1	58	69,9	0,2

70°C - 166W - 259W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	22,9	24,8	60,4	80	0,1
15	110	24,2	61,9	67,8	2,8
20	101	23,9	64,7	67,6	2,2
30	105	24	65,9	68,1	3
60	107	24	68,1	70,4	2,5
90	120	23,6	70	70	0,6
105	126	23	73,1	70,3	0,7
125	129	23,4	70,4	71	1,2
130	127	23,5	69,7	74	1,2

70°C -259W - 259W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	21,3	24,8	69,4	69,4	0,1
15	107	21,4	67,7	68,8	5
20	108	24,3	67,1	68,8	4,4
30	108	24,2	65,7	68,7	4,3
60	117	24,2	65	71,5	2,5
80	120	24,1	63,2	70,1	1,2
90	131	24,3	64,3	77,8	0,6
100	127	24,1	64,3	77,4	0,4
105	128	24,2	64,1	77,2	0,3

55°C - 166W - 89W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	22,4	24	64	56	1,9
15	86	24,4	62,8	54,8	11,1
20	87	23,7	65,7	55,4	10,3
30	85	23,6	65,1	54,6	11,3
60	87	23,6	66,1	56	9,6
90	90	23,7	65,7	56,7	8,2
120	96	23,6	66,3	56,5	7,7
140	97	23,3	66,1	56,3	7,2
165	98	23,2	66	56,4	7,1
190	91	23,4	66,8	55,3	6,9
200	92	23,2	66,7	56,1	5,5
220	93	23,2	67,4	55,6	6,6
240	91	23,3	67,3	55	6,1

55°C - 259W - 259W					
Tempo (min)	Temperatura (SA)	T°C Amb	UR amb	T°CsaidaM	URsaida M
0	22,3	24,5	55,4	68,3	0,5
15	95	24,5	56,2	54,9	11,9
20	93	24,2	57,1	54,2	11
30	96	24,2	55,4	55,4	10,3
60	101	24,6	56,7	56,7	7,5
90	113	24,6	56,5	56,5	5,8
100	112	24,4	56,1	56,1	5,3
108	119	24,6	65,2	65,2	2,4
118	118	24,7	60,4	60,4	2,2
128	122	24,6	61,1	61,1	1,4