



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS - FEA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS - DEA

**ESTUDO DA SECAGEM DO CAFÉ CEREJA DESCASCADO PELO
PROCESSO A AR QUENTE ASSISTIDO A MICROONDAS**

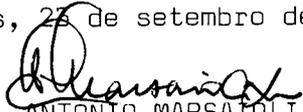
Aluno Pesquisador : Marta Lima da Cunha

Professor Orientador : Prof. Dr. Antonio Marsaioli Junior

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por MARTA LIMA DA CUNHA e aprovada pela Comissão Julgadora em 23.09.96.

Campinas, 25 de setembro de 1996


PROF.DR. ANTONIO MARSAIOLI JUNIOR

Presidente da Banca

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos

Campinas, setembro de 1996

CENTRAL

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA	T/UNICAMI
	C914e
V.º	E2
	20.02/29.008
PROC.	667/96
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	05/11/96
N.º CPD	

CM-00094471-6

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

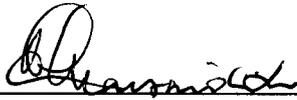
C914e	<p>Cunha, Marta Lima da</p> <p>Estudo da secagem do café cereja descascado pelo processo a ar quente assistido a microondas / Marta Lima da Cunha. -- Campinas, SP: [s.n.], 1996.</p> <p>Orientador: Antonio Marsaioli Junior Dissertação (mestrado)-Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.</p> <p>1.Secagem. 2.Café. 3.Microondas. I.Marsaioli Junior, Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III.Título.</p>
-------	--

ERRATA

Tese de Mestrado: Estudo da Secagem do Café Cereja Descascado Pelo Processo a Ar Quente Assistido a Microondas

- Na página 36 leia-se a equação 5.3 como $F = \frac{V_o}{\theta} * 60$ (1/h)
- Na página 38, onde está escrito: Os dados dos experimentos 4 e 8.1 foram sobrepostos... leia-se: experimentos **2** e 8.1.
- Na página 39, figura 12 leia-se: Sobreposição das curvas de secagem dos experimentos **2** e 8.1. Na figura leia-se: Convencional $T_{ar} = 43^{\circ}C$.
- Na página 47, onde tem-se $\frac{M}{M_{ad}} =$ teor fracionário de umidade base seca, leia-se $\frac{M_e}{M_{ad}}$.
- Na página 48, primeiro parágrafo, leia-se: Considerando que o acoplamento médio de energia de microondas absorvida foi de 90% (10% de reflexão), tem-se a potência teórica aplicada (P_a), **pela vazão mássica de café a 12% b.u.**
- Na página 55, parágrafo 4, leia-se: A medição do dielétrico do café nas **frequências** de 915 e 2450 MHz **poderia** dar uma idéia...

BANCA EXAMINADORA



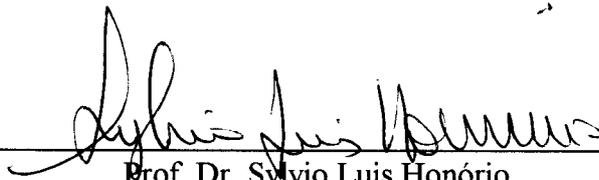
Prof. Dr. Antonio Marsaioli Jr.

(Orientador)



Prof. Dr. Evandro Conforti

(Membro)



Prof. Dr. Sylvio Luis Honório

(Membro)

Prof. Dr. Satoshi Tobinaga

(Membro)

Campinas, 23 de setembro de 1996

AGRADECIMENTOS

À Deus, sem o qual nada seria possível.

Ao Prof. Dr. Antônio Marsaioli Jr, pela orientação, dedicação e apoio dispensados durante todo o mestrado.

Aos Prof. Dr. Evandro Conforti, Prof. Dr. Sylvio Luis Honório e Prof. Dr. Satoshi Tobinaga, pelas sugestões dadas na fase de correção deste trabalho.

À FUNDAÇÃO BANCO DO BRASIL, pelo financiamento original do secador a microondas.

À FINEP, pelo financiamento de projeto de aplicações de microondas aos alimentos.

À FAPESP, pelo financiamento do projeto de infraestrutura do LMO/DEA/FEA/UNICAMP.

À FUNDAÇÃO TROPICAL DE PESQUISAS E TECNOLOGIA “ANDRÉ TOSELLO”, pela administração sem onus do projeto FINEP.

À Aruanda Agropecuária, nas pessoas do seus diretores Srs. Osmar Campos e Luiz Carlos Machado de Aguiar, pela cessão gratuita do café “in natura” para este estudo.

Ao Sr. T. Nishi, da FAZENDA MONTE D’ESTE, em Campinas, pela doação de algumas sacas de café que deram início a este trabalho.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado.

À Prof. Marta Weber Canto, pela colaboração, especialmente no preparo e análise das amostras por microscopia eletrônica de varredura.

Aos funcionários dos departamentos de Engenharia de Alimentos e Tecnologia de Alimentos, pelo apoio.

Aos meus pais, Acyr e Maria das Neves, e meus irmãos, André e Bel, pelo carinho e apoio por toda a vida.

Ao Sandro, por seu apoio, carinho, atenção, paciência, enfim, por ser tão especial para mim.

Aos mestres Hosiberto Batista de Sant'Ana e Sandro Campos Amico, pelas correções e sugestões dadas neste trabalho.

À galera do Rio, Marcello, Marcelo, Rogério, Carlos, Valéria, Sílvia, Fernanda, Mari e Valéria, pela amizade, alegrias, tristezas, festas, carinho e tantas coisas mais.

Aos amigos da FEA, em especial à Biló, Vanessa, Tânia, Du, Hosiberto, Mônica, Josivanda, Rossana, Alexandre, Suse, Tati, Jorge e Luiza, pela amizade nos bons e maus momentos.

À todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Marta Lima da Cunha

*À Colozinha,
um anjinho que
passou no meu
caminho.*

SUMÁRIO

Índice de Figuras	i
Índice de Tabelas	iii
Lista de Símbolos	iv
Resumo	vii
Abstract	viii
Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Objetivo	3
Capítulo 3 - Revisão Bibliográfica	4
3.1 - A tecnologia do processamento agro-industrial do café	4
3.1.1. - Etapas do processamento do café cereja descascado	5
3.1.2 - Vantagens do processo cereja descascado	8
3.1.3 - Utilização industrial dos subprodutos do café	9
3.2 - O aquecimento por microondas	10
3.2.1 - Ondas eletromagnéticas e espectro de radiação	10
3.2.2 - Propriedades dielétricas dos materiais e interação com as microondas	13
3.2.3 - Domínios e principais vantagens do processamento por microondas	16
3.3 - Aplicações industriais da energia de microondas	18
Capítulo 4 - Materiais e Métodos	24
4.1 - Matéria-prima	24
4.2 - Secagem no secador convencional	24
4.2.1 - Testes de secagem convencional	25
4.2.2 - Metodologia da secagem convencional	25
4.3 - Secagem no secador assistido a microondas com pré-secagem convencional	26
4.3.1 - Testes de secagem combinada	26
4.3.2 - Metodologia da secagem combinada	27
4.4 - Análises	28
4.4.1 - Análise sensorial	29
4.4.2 - Microscopia eletrônica de varredura	29

Capítulo 5 - Resultados e Discussão	31
5.1 - Secagem convencional	31
5.2 - Secagem assistida a microondas com pré-secagem convencional	35
5.3 - “Prova da xícara”	42
5.4 - Microscopia eletrônica de varredura	44
5.5 - Aspectos econômicos	47
Capítulo 6 - Conclusões	53
Capítulo 7 - Sugestões para Trabalhos Futuros	55
Capítulo 8 - Referências Bibliográficas	56
Apêndice A	62
Apêndice B	64
Apêndice C	65
Apêndice D	66
Apêndice E	72
Apêndice F	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Partes do fruto do café (MATIELLO, 1991)	4
Figura 2 - Lavador-separador	5
Figura 3 - Descascador de cerejas	6
Figura 4 - Espectro de frequências eletromagnéticas (MARSAIOLI, 1991)	11
Figura 5 - Rotação dipolar devida à variação do campo (DECAREAU & PETERSON, 1986)	12
Figura 6 - Significado físico dos parâmetros dielétricos (SENISE, 1985)	14
Figura 7a - Curva típica de um sistema misto de secagem: pré-aquecimento (SCHIFFMANN, 1987)	18
Figura 7b - Curva típica de um sistema misto de secagem: “booster drying” (SCHIFFMANN, 1987)	19
Figura 7c - Curva típica de um sistema misto de secagem: secagem final (SCHIFFMANN, 1987)	19
Figura 8 - Desenho esquemático do secador rotativo piloto a ar quente convencional	25
Figura 9 - Desenho esquemático do secador a microondas	27
Figura 10 - Curvas de secagem ($U \times t$) para diferentes temperaturas do ar de secagem	33
Figura 11 - Curvas de secagem ($U.R. \times t$) para diferentes temperaturas do ar de secagem	34
Figura 12 - Sobreposição das curvas de secagem dos experimentos 4 e 8.1	39
Figura 13 - Variação da temperatura e umidades finais com as densidades de potência aplicadas, para umidade inicial 30,7% b.u. e tempo de retenção de 2h (Experimentos 7.1 a 7.4)	40
Figura 14 - Distribuições do tempo de retenção no secador cilíndrico rotativo a ar quente assistido a microondas do café do experimento 8 a diferentes umidades	41
Figura 15 - Seção transversal do grão de café (DENTAN, 1985)	44
Figura 16 - Capacidade ampliada com energia de microondas (METAXAS & MEREDITH, 1988)	50
Figura 17 - Curva de calibração da balança de infravermelho pelo método da estufa	64
Figura 18 - Camada de mucilagem central - aumento :150x	66
Figura 19 - Embrião - aumento :35x	66

Figura 20 - Células do parênquima (região 1) - experimento 1 - aumento :500x	67
Figura 21 - Ampliação de célula da figura 20 - aumento :2000x	67
Figura 22 - Células do parênquima (região 1) - teste 5.3 - aumento :500x	68
Figura 23 - Ampliação de célula da figura 22 - aumento :2000x	68
Figura 24 - Células do parênquima (região 3) - teste 8.2 - aumento :500x	69
Figura 25 - Ampliação de célula da figura 24 - aumento :2000x	69
Figura 26 - Superfície externa - teste 6.1 - aumento :500x	70
Figura 27 - Ampliação de célula da figura 26 - aumento :7500x	70
Figura 28 - Superfície externa - teste 5.2 - aumento :500x	71
Figura 29 - Ampliação de célula da figura 28 - aumento :7500x	71
Figura 30 - Relações entre os teores de umidade: (a) antes da secagem; (b) após a secagem (HENDERSON & PERRY, 1955)	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do ciclo de secagem convencional	31
Tabela 2 - Resultados obtidos para os parâmetros do modelo (eq. 5.1)	35
Tabela 3 - Dados da pré-secagem convencional do 2º ciclo de secagem proposto	35
Tabela 4 - Dados da secagem final realizada no secador assistido a microondas	38
Tabela 5 - Parâmetros das curvas da figura 14	41
Tabela 6 - Resultados da “prova da xícara”	43
Tabela 7 - Resultados da análise por microscopia eletrônica de varredura	45
Tabela 8 - Desempenho de um secador Guardiola na pré-secagem e secagem convencional	49
Tabela 9 - Propriedades dielétricas de alguns sólidos e líquidos	62
Tabela 10 - Propriedades dielétricas de alguns alimentos	63
Tabela 11 - Classificação e características de resultados de degustação proposta por GARRUTI & CONAGIN (1961, citado por CHAGAS, 1994)	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

A	área das placas do capacitor (m^2)
A_1	parâmetro da equação 5.1
a	coeficiente linear da equação 5.5
b	coeficiente angular da equação 5.5
C	capacitância (F)
C_p	calor específico ($J/kg^\circ C$)
D_d	diâmetro interno do cilindro (m)
d	distância entre as placas do capacitor (m)
d_p	densidade de potência (Wh/kg)
E	escala do alimentador
E_m	intensidade de campo elétrico entre as placas do capacitor (V/m)
E_o	intensidade de campo elétrico no vácuo (V/m)
e	base do sistema neperiano de logaritmos
F	vazão volumétrica de alimentação (l/h)
G	condutância elétrica entre as placas (S)
I_m	corrente elétrica máxima (A)
$i(t)$	corrente elétrica alternada (A)
j	unidade imaginária
k	constante cinética de secagem
L_d	comprimento do cilindro (m)
L_h	calor latente de evaporação da água a $40^\circ C$ (J/kg)
M	umidade decimal base seca
M_{ad}	vazão mássica de massa seca (kg/h)
M_e	quantidade de umidade evaporada (kg/h)
m	umidade decimal base úmida
n	velocidade de rotação do cilindro (RPM)
P	peso inicial da amostra (g)

P_a	potência teórica aplicada (W)
P_d	peso da matéria seca (kg)
P_e	peso do material úmido (kg)
P_f	peso final da amostra (g)
P_s	peso do material após a secagem (kg)
P_{teor}	potência teórica necessária para secar o café (W)
P_v	potência dissipada por unidade de volume (W/m^3)
Q	vazão mássica de alimentação (kg/h)
T	temperatura ($^{\circ}C$)
t	tempo (s)
t_s	tempo de secagem (h)
U	umidade variável no tempo (% b.u.)
U_e	umidade de equilíbrio (% b.u.)
U_i	umidade inicial do produto (% b.u.)
U.R.	umidade reduzida
V_m	tensão elétrica máxima (V)
V_o	volume ótimo de ocupação do cilindro (l)
$v(t)$	tensão elétrica alternada (V)
W	peso da umidade evaporada (kg)
W_m	peso da umidade total (kg)
y	número de anos

Gregos

α	arctg (sen ν / sen λ)
Δ	variação (final-inicial)
δ	ângulo de fase (rad)
$\tan \delta$	fator de perda
ϵ'	constante (permissividade) dielétrica (F/m)
ϵ''	fator (constante) de perda elétrica (F/m)
ϵ_r'	constante (permissividade) dielétrica relativa (F/m)
ϵ_r''	fator (constante) de perda elétrica relativa (F/m)
ϵ_0	constante (permissividade) dielétrica do vácuo ($\cong 8,854 * 10^{-12}$ F/m)
ϵ^*	constante dielétrica complexa (F/m)
θ	tempo de retenção (min)
κ	coeficiente complexo da equação 5.2
λ	ângulo de talude (grau)
ν	ângulo de inclinação do cilindro (grau)
ρ	densidade aparente (kg/l)
σ	condutividade elétrica (S/m)
φ	ângulo de defasagem entre corrente e tensão elétrica (grau)
ω	velocidade angular (rad/s)

RESUMO

O processo de obtenção do café cereja descascado está se tornando cada vez mais utilizado no Brasil, especialmente entre pequenos fazendeiros. Este é um método intermediário entre dois dos processamentos conhecidos: natural (ou seco) e despulpado (ou úmido), em que o fruto maduro (café cereja) passa por um equipamento (descascador de cerejas) que remove a casca e parte da polpa. Neste processo não há uma posterior remoção da mucilagem que permanece envolvendo o grão durante a secagem. Uma das operações mais importantes para o preparo do café cereja descascado é a secagem do produto à uma faixa de 11 a 13 % (base úmida), com a vantagem que há menos umidade a ser removida, quando comparado ao processo natural. Apesar desta e de outras vantagens associadas ao processo cereja descascado proposto originalmente, ainda subsistem algumas dificuldades relacionadas ao aquecimento convencional do café despulpado. Dentre elas prevalece a necessidade de se limitar a temperatura do produto a um valor máximo de 40°C, de modo a se obter um produto de qualidade. Como consequência, o produto pode sofrer danos em longos períodos de secagem, que podem variar de 30 a 45 horas, dependendo do produto e das condições de operação.

O presente trabalho se refere ao projeto de desenvolvimento de um processo idealizado no Laboratório de Microondas do Departamento de Engenharia de Alimentos, FEA/UNICAMP, visando a introdução da energia de microondas na secagem convencional do café cereja descascado. O ciclo de secagem foi dividido em dois estágios, o primeiro correspondendo à evaporação da umidade inicial de um nível de aproximadamente 47% a um valor intermediário próximo a 30%, efetuado num secador rotativo intermitente convencional, seguido de um tratamento combinado de ar quente e microondas, desenvolvido em um novo tipo de secador cilíndrico rotativo contínuo, a uma faixa de umidade final de 11 a 13% b.u. Apesar dos resultados obtidos serem de caráter preliminar, pois trata-se de um trabalho pioneiro nesta área, eles foram considerados muito positivos, justificando deste modo o estabelecimento de uma nova série de experimentos planejados para a próxima safra, que propiciarão um estudo de otimização do processo a microondas.

ABSTRACT

The technique of processing pulped coffee cherry beans is becoming more popular in Brazil, specially among small farmers. This is an intermediate method between the two processes used to produce the “natural” and “washed coffee”, in which the ripe fruit passes through a pulping machine which removes most of the soft outer pulp or fibrous fruit flesh. There is no further removal of the mucilage, that remains coating the grain during the drying. One of the main operations for the preparation of such coffee is the drying of the product to the range from 11 to 13 % w.b., with the advantage that there is less moisture to be removed when compared to the drying of “natural coffee”. In spite of this and other known advantages, associated to the original proposed process, there still subsists a few technological difficulties, related to the conventional heated air drying of the pulped coffee. Among them prevails the need for keeping the product under a limited temperature level, thus requiring the drying air temperature to be controlled to the maximum 40°C, in order to maintain the best quality of the final coffee beverage. As a consequence, the product may be damaged by long periods of drying, which can last from 30 up to 45 hours, depending on the product and operational conditions.

This work concerns a process development project at the Microwave Laboratory of the Food Engineering Department, FEA/UNICAMP, aiming to the introduction of microwave energy into the conventional drying procedure of pulped coffee cherry beans. The drying cycle was subdivided into two stages, the first corresponding to an initial moisture evaporation from a content of about 47 % w.b. to an intermediate level averaging 30 % w.b., carried out in a conventional hot air batch rotary dryer, followed by a second combined treatment of heated air and microwave, developed in a novel type of a rotary cylindrical oven operating continuously, to the final 11 to 13 % w.b. moisture range. Although this is a pioneer study, the preliminary results were considered very positive, thereby justifying the establishment of a new series of experiments for the coming coffee harvesting season, in order to propitiate a microwave process optimization study.

1 - INTRODUÇÃO

Trazido da Guiana, o café foi introduzido no Brasil em 1727 por Francisco de Mello Palheta. As primeiras sementes foram cultivadas em Belém do Pará, depois Maranhão e Bahia até se expandir por todo território nacional. No princípio era uma curiosidade, quase uma planta ornamental. Hoje, é uma das maiores riquezas do País.

Segundo MATIELLO (1991), a produção de café no mundo encontra-se distribuída em 54 países, sendo mais expressivos o Brasil (maior produtor mundial) e a Colômbia que juntos representam 43% da produção mundial (média do período 84/89).

A posição privilegiada do Brasil de maior produtor mundial não tem favorecido a venda do produto brasileiro no mercado internacional. Ocorre que o café nacional perde muito em qualidade para os grãos produzidos em países como a Colômbia, Jamaica, Costa Rica, Etiópia e Quênia, todos eles preferidos pelos consumidores americanos e europeus. Embora o Brasil seja o terceiro maior mercado consumidor (depois dos Estados Unidos e da Alemanha unificada) o país é mal trabalhado pela indústria local e pelos produtores de cafés finos, e o efeito disso foi a queda de consumo *per capita*/ano.

O café comercial resulta de uma série de operações a que são submetidos os frutos recém colhidos. Dentre as operações que caracterizam o processamento do café, a secagem é de fundamental importância, pois visa preparar o produto para o beneficiamento e armazenagem. Uma secagem rápida e bem conduzida pode eliminar o problema da fermentação do produto e, se mal conduzida, poderá baixar o valor comercial do produto ou acelerar o processo de deterioração durante a estocagem.

Entre as diversas alternativas hoje praticadas para o preparo do café, um conjunto de máquinas e técnicas diferenciadas, onde desponta a tecnologia do cereja descascado, vêm sendo oferecidos, principalmente direcionados aos pequenos produtores, visando proporcionar-lhes “um sistema de preparo de café de qualidade”. Dentro deste novo sistema situa-se uma etapa de secagem que utiliza um secador rotativo a ar quente de ciclo intermitente. Não obstante já se proclame para o processo cereja descascado uma incontestável economia com base em uma substancial redução (cerca de 40 %) do volume a ser seco, em

relação ao café não separado, ainda subsistem algumas dificuldades com este tipo de secador, principalmente aquelas que são inerentes a um produto extremamente termo-sensível como o café. Devido à limitação da temperatura do ar de secagem, exigida para se assegurar um produto final de qualidade, o tempo decorrido para a obtenção de um café seco é superior, na maioria das vezes, a 35 horas, podendo alcançar até 45 horas, dependendo da combinação de valores dos parâmetros envolvidos.

Surge neste momento a oportunidade de testar uma tecnologia não-convencional que começa modernamente a tomar corpo nas indústrias de processamento, particularmente naquelas que lidam com alimentos termo-sensíveis : a da aplicação de microondas às etapas de aquecimento dos processos industriais, entre eles a secagem, visando uma eficiência de tratamento ampliada e um aumento significativo na qualidade do produto.

Tendo em conta as opções disponíveis em termos de tecnologias alternativas de secagem industrial por microondas, depara-se com um sistema inovador, que utiliza um aplicador cilíndrico-rotativo de eixo inclinado, por dentro do qual escoam o produto sólido granulado, de forma contínua e agitada, submetido à ação simultânea da energia de aquecimento das microondas e ao calor convectivo do ar quente, responsável pelo arraste do vapor de água desprendido do produto. Este sistema, de escala piloto e dimensões semi-industriais, encontra-se disponível no Laboratório de Microondas (LMO), do Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA), da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), em Campinas, São Paulo.

2 - OBJETIVO

O presente trabalho teve por objetivo melhorar a eficiência da secagem agro-industrial do café cereja descascado por meio da introdução da energia das microondas no estágio final do ciclo de secagem convencional por ar quente, que conduz à diminuição do tempo e maior uniformidade de secagem com perfis de temperaturas mais uniformes, possibilitando uma maior preservação do material e uma melhoria substancial na qualidade.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - A tecnologia do processamento agro-industrial do café

O processamento ou preparo dos frutos de café, após a colheita, pode ser feito por via seca, resultando no café natural ou “de terreiro”, ou por via úmida, obtendo-se o café despolpado. O café cereja descascado é obtido por um processo intermediário entre estes dois sistemas tradicionais.

Para se obter o café natural a polpa não é removida, sendo secada juntamente com o grão, enquanto que, para o café despolpado, remove-se a polpa e a mucilagem, procedendo-se a secagem do grão com o pergaminho lavado.

O processo intermediário de obtenção de café cereja descascado consiste na remoção da polpa sem a remoção da mucilagem, que permanece envolvendo o pergaminho durante e após a secagem (BRANDO, 1993). Neste processo só são processados os grãos maduros que recebem o nome de cereja pela coloração avermelhada que possuem.

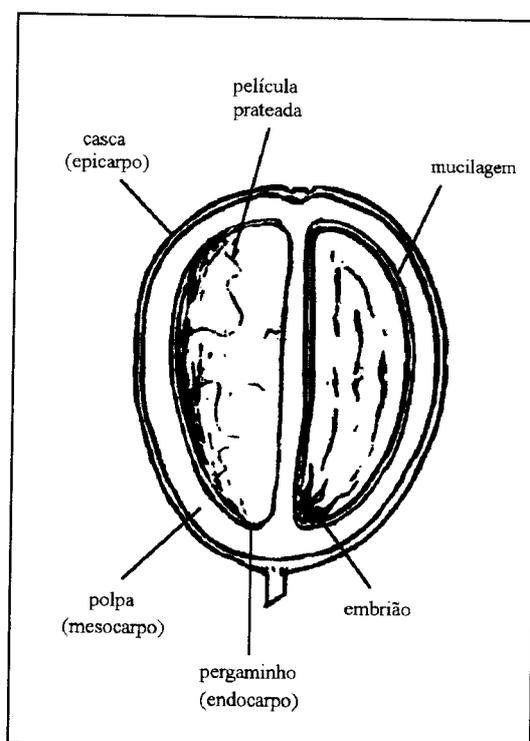


Figura 1 - Partes do fruto do café (MATIELLO, 1991)

3.1.1 - Etapas do processamento do café cereja descascado

O café colhido deve ser processado o quanto antes, dentro de no máximo 24 horas após a colheita, a fim de se evitar fermentações que possam prejudicar sua qualidade. As etapas para o preparo do café cereja descascado são:

- **Lavagem-separação**

É feita nos lavadores-separadores e visa a diminuição das impurezas que vêm da colheita junto com os frutos de café, tais como folhas, torrões, gravetos, terra e pedras, e a separação, por densidade, dos cafés mais leves (bóias ou secos) dos pesados (frutos cerejas ou maduros e verdes). Com esta operação pode ser obtido café de melhor qualidade, evitando-se o desgaste da maquinaria, e facilitando a secagem, devido aos lotes apresentarem umidade e tamanho de grão mais uniformes (MATIELLO, 1991).

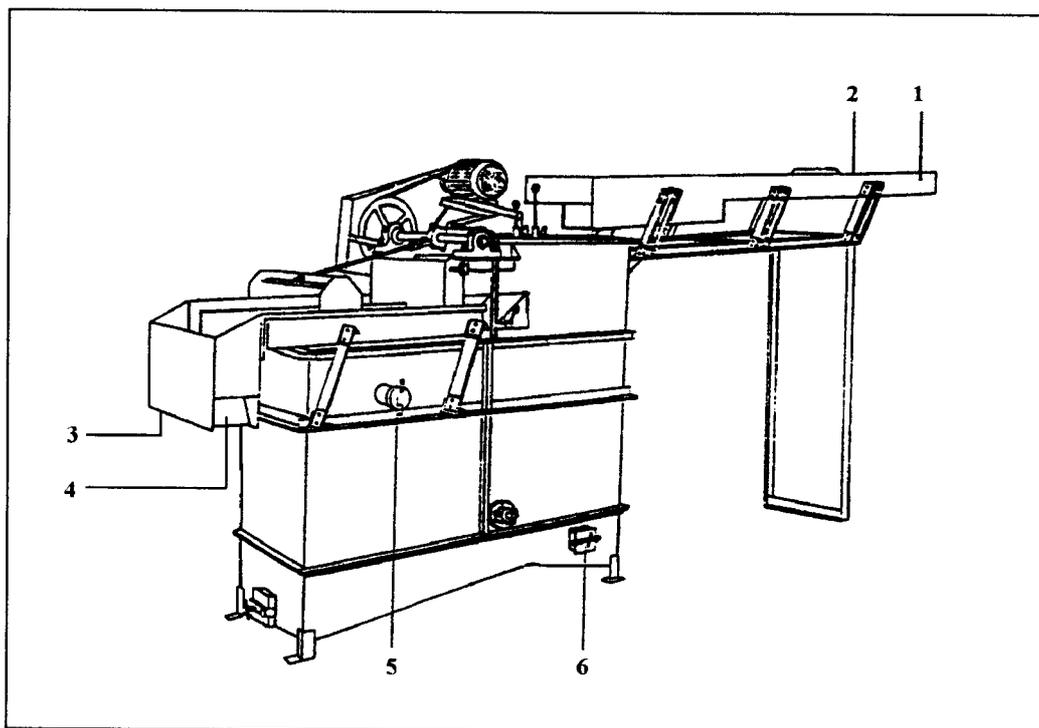


Figura 2 - Lavador-separador

(1) Alimentação; (2) Pré-limpeza; (3) Saída do bóia; (4) Saída do cereja e verde; (5) Registro do nível de água; (6) Separador de pedras.

- **Descasque**

Os frutos maduros e verdes obtidos por separação nos lavadores entram, juntamente com a água, pela moega do descascador. Nos descascadores que possuem separadores de verdes, os frutos passam da moega para um cilindro janelado tipo gaiola, no qual, por pressão, os verdes são separados e saem lateralmente. Os grãos maduros seguem para o elemento descascador, constituído de um cilindro coberto por uma lâmina (camisa) de cobre, provida de mamilos, que aprisionam e pressionam os grãos, em seu movimento rotatório, contra uma barra de borracha ajustável, separando a polpa (casca mais parte da mucilagem) dos grãos envolvidos pelo pergaminho. A característica gelatinosa da polpa facilita o desprendimento por pressão, e portanto a separação (MATIELLO, 1991).

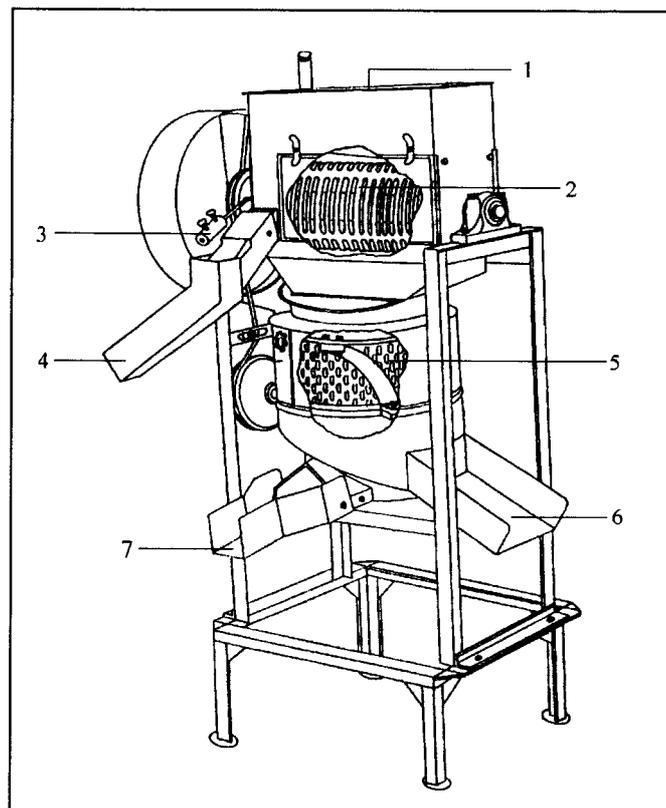


Figura 3 - Descascador de cerejas

(1) Alimentação; (2) Grade separadora de verdes; (3) Contrapeso (regulagem); (4) Saída de verdes; (5) Elemento descascador de grãos cerejas; (6) Saída das cascas; (7) Saída do cereja descascado.

- **Secagem**

Constitui a principal operação para se obter um produto de boas características e tem por finalidade reduzir o teor de umidade do produto a um nível adequado à sua estocagem (11% base úmida), por um período prolongado. Pode ser natural (ao sol) ou artificial (secadores mecânicos). A fim de se reduzir a umidade do café, sem visar baixá-la ao nível final necessário, pode-se fazer uma pré-secagem. Na secagem mecânica, uma pré-secagem natural do produto traz vantagens, pois além de reduzir o teor de umidade, os grãos apresentarão, para o mesmo volume, maior proporção de matéria seca, permitindo maior rendimento do secador (PUZZI, 1986).

A secagem natural pode ser feita espalhando-se o café em terreiros, em bandejas com fundo telado, barcaças com bandejas corrediças e em solários com cobertura de polietileno transparente (MATIELLO, 1991).

Apesar de grande parte do café ser secado ao sol, há uma tendência mundial cada vez maior de se utilizar secadores mecânicos (SIVETZ & DESROSIER, 1979). Isto se deve ao fato da secagem natural exigir grandes áreas, ser muito trabalhosa, lenta, exigir muita mão-de-obra e depender das condições climáticas da região, sendo problemática, ou praticamente impossível, em regiões de chuvas prolongadas coincidentes com a colheita (JORDÃO *et al.*, 1980).

A secagem artificial, apesar das desvantagens do custo adicional de energia elétrica e combustível para a fornalha e de exigir maiores investimentos em equipamentos, apresenta algumas vantagens, tais como: (1) o café permanece menos tempo úmido, diminuindo os riscos de deterioração, já que a secagem é mais rápida; (2) permite um planejamento melhor do escalonamento da colheita; (3) o espaço necessário para abrigar o secador é muito menor, comparado com as enormes áreas dispensadas aos terreiros de secagem; (4) requer menos mão-de-obra (SIVETZ & DESROSIER, 1979).

Os secadores apresentam uma fornalha, onde o combustível (palha, lenha, etc.) é queimado e uma câmara de secagem, onde o café é exposto ao ar quente. Alguns equipamentos possuem também uma câmara de repouso, onde o café permanece até que a umidade dos grãos se uniformize.

Os equipamentos disponíveis no mercado podem ser contínuos ou de carga (batelada), de fogo direto ou indireto. As fornalhas de fogo indireto com trocadores de calor evitam que os gases de combustão entrem em contato com os grãos. HUTT *et al.* (1978) estudaram os tipos de contaminação dos grãos em secadores com aquecimento direto, que aumentam a economia da secagem diminuindo o custo de investimento e aumentando a eficiência do secador, entretanto contaminam os grãos com substâncias indesejáveis e até carcinogênicas, dependendo do combustível utilizado.

A temperatura de secagem deve ser medida na massa do café. Segundo SIVETZ & DESROSIER (1979) o café tolera temperaturas de 40°C por 1 ou 2 dias, 50°C por algumas horas, e 60°C por menos de uma hora sem danos.

Segundo TOSELLO (1946), o café será tanto mais homogêneo quanto mais lenta for a secagem. Por isso é aconselhável, quando possível, efetuar a secagem de forma parcelada, intercalando-se os períodos de exposição ao ar quente com outros de descanso, quando a umidade do café é homogeneizada, tornando a secagem mais uniforme. O secador cilíndrico tubular rotatório é um tipo de secador utilizado para secagem sem paralisações por não apresentar câmara de descanso, sendo mais recomendável como pré-secador ou para café despulpado. O ciclo de secagem, no entanto, pode ser intercalado com paralisações e descanso no próprio secador, que é um dos secadores mais eficientes devido à movimentação do café e à distribuição mais uniforme do ar quente em contato com os frutos em todo secador (VIEIRA, 1994).

Segundo MATIELLO (1991), o tempo necessário à secagem em terreiro varia de 10 a 20 dias, dependendo da umidade do café, das condições climáticas do local e dos cuidados do terreiro. Já nos secadores mecânicos, o tempo varia de acordo com a umidade inicial do café e com o tipo de secador, sendo normalmente necessário de 35 a 45 horas.

3.1.2 - Vantagens do processo cereja descascado

No processo natural seca-se o grão, pergaminho, mucilagem e polpa. Gasta-se energia para remover a umidade da polpa que será depois descartada no benefício seco. Como o volume de grão com pergaminho e mucilagem representa em média cerca de 60% do volume

da cereja madura, o processo cereja descascado resulta em uma diminuição substancial do volume a ser secado (40%).

Comparado ao processamento por via úmida, o processo cereja descascado elimina uma etapa, pois a mucilagem restante não precisa ser removida na degomagem, feita por fermentação natural (bioquímica), por meios mecânicos (atrimento), por meios químicos (adição de álcalis ou ácidos) ou pela combinação destes. Assim, reduz-se tempo, custos e contamina-se menos o ambiente, pois o consumo de água é menor e menos matéria orgânica é adicionada à água de processo que é descartada (BRANDO, 1993).

3.1.3 - Utilização industrial dos subprodutos do café

O emprego do café de boa qualidade que não seja para a indústria da bebida é impraticável devido ao elevado valor do grão. TANGO (1971) estudou o aproveitamento de café-expurgo (de baixa qualidade, não indicado para o preparo da bebida), casca, pergaminho e borra da extração do café solúvel, concluindo que a industrialização destes produtos é inviável caso a indústria não esteja localizada próxima às máquinas de beneficiamento ou à indústria de café solúvel, por tratar-se de uma matéria-prima muito volumosa. O autor indica diversas aplicações dos subprodutos, dentre elas: combustível, fertilizante, produção de fibra sintética, material adesivo, forragem e material para curtimento de couro.

BRAHAM & BRESSANI (1979) estudaram as composições da polpa, mucilagem, pergaminho e água de processo e seus usos potenciais, dando ênfase à utilização como alimento para ruminantes, suínos e outras espécies, indicando que tratamentos (físicos e químicos) cada subproduto deve sofrer antes de sua utilização.

3.2 - O aquecimento por microondas

A energia de microondas é uma fonte ímpar de energia porque ela cria calor dentro dos materiais processados. Esta propriedade resulta em tempos de processamento mais curtos, maior rendimento do produto final e usualmente em uma qualidade superior que a encontrada com técnicas convencionais de processamento (DECAREAU & PETERSON, 1986).

Apesar do aquecimento por microondas ser visto como uma tecnologia nova suas aplicações práticas começaram durante a segunda guerra mundial, tendo sido o forno de microondas doméstico inventado logo após a guerra.

As principais razões para o seu pequeno uso em escala industrial são duas: a falta de familiaridade de grande parte dos engenheiros com os mecanismos de aquecimento e a tendência a se resistir à mudanças reais na maioria das indústrias, já que a utilização do aquecimento por microondas geralmente representa uma mudança radical nos sistemas convencionalmente utilizados.

SCHIFFMANN (1987) mostra que nos últimos anos, porém, esta situação tem mudado e o interesse nas aplicações industriais de microondas tem crescido. Isto se deve principalmente à crise energética mundial e ao aumento da familiaridade e aceitação dos fornos de microondas.

3.2.1 - Ondas eletromagnéticas e espectro de radiação

Todos os corpos no universo acima da temperatura do zero absoluto emitem ondas eletromagnéticas (SCHIFFMANN, 1987). Microonda ou energia de microondas é uma modalidade de radiação eletromagnética como a luz, ultravioleta, raio-x, ondas de TV, rádio AM e FM e infravermelho. Todas as ondas são caracterizadas pelo seu comprimento de onda e frequência, e a relação entre os tipos de ondas é mostrada no espectro eletromagnético (Figura 4).

A fim de se evitar interferência nas faixas de frequência utilizadas em telecomunicações, são reservadas para as aplicações em eletrotermia algumas faixas estreitas de frequência, entre

as quais as mais empregadas em microondas são 915 ± 25 MHz e 2450 ± 50 MHz (SENISE, 1985).

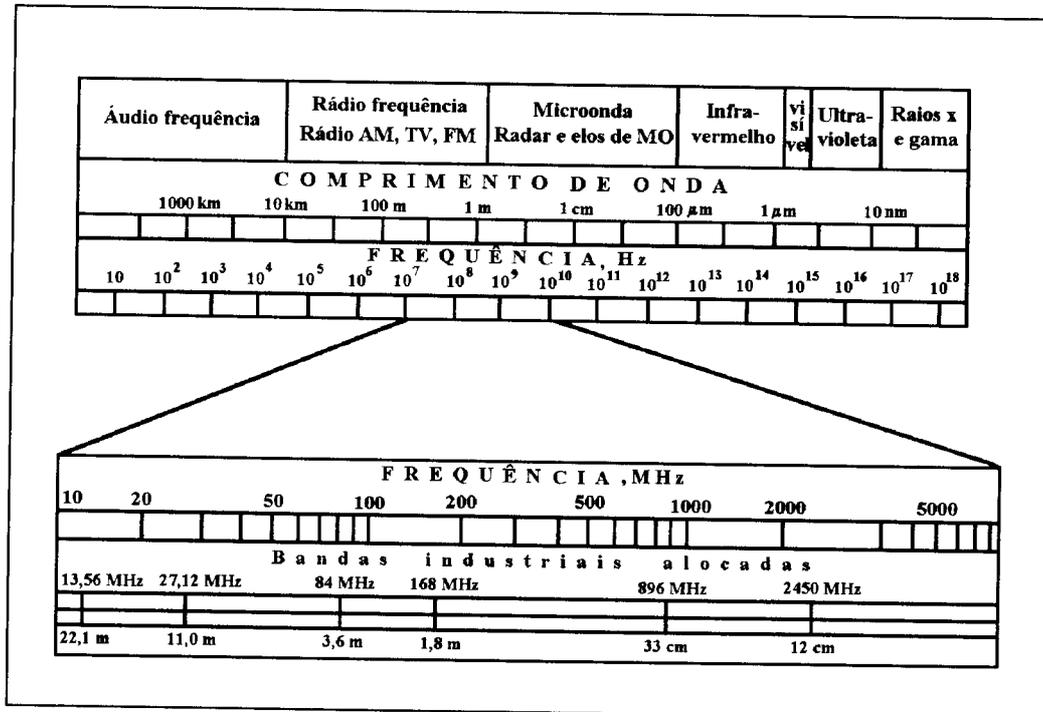


Figura 4 - Espectro de frequências eletromagnéticas (MARSAIOLI, 1991)

As microondas são geradas pelo “magnetron”, um tubo oscilador alimentado por um circuito eletrônico capaz de converter energia elétrica com frequência industrial (60 Hz) em energia eletromagnética de microondas (por exemplo, 2450 MHz). O campo eletromagnético se propaga na forma de onda eletromagnética (o meio de transporte da energia) no interior de um guia de onda metálico (linha de transmissão), até ser injetada no aplicador (uma cavidade com paredes metálicas onde está situado o produto a ser aquecido). A penetração e o aquecimento de alimentos em um campo de microondas é praticamente instantânea, em contraste com métodos convencionais de aquecimento, onde a transferência de calor da superfície para o centro se dá 10 a 20 vezes mais lentamente.

Existem vários mecanismos em escala molecular e atômica para a conversão de energia de microondas em energia térmica. SHIFFMANN (1987) cita 8 deles, entretanto, no aquecimento de alimentos por microondas, apenas a migração iônica e a rotação dipolar são de maior interesse.

No primeiro mecanismo, componentes ionizados colidem aleatoriamente com moléculas não ionizadas quando submetidos à um campo elétrico. A energia cinética destes íons é convertida em calor durante as colisões (OWUSU-ANSAH, 1991).

No mecanismo de rotação dipolar, moléculas dipolares como a água e outras moléculas (que podem se tornar “dipolos induzidos” devido às tensões causadas pelo campo elétrico) são influenciadas pela rápida mudança de polaridade deste campo. Os dipolos, normalmente aleatoriamente orientados, tendem a se orientar no campo elétrico. Entretanto, quando o campo se torna nulo (relaxa), as moléculas retornam à sua orientação aleatória e são novamente orientadas em um campo elétrico de polaridade inversa. Esta mudança de polaridade do campo, ocorrendo em uma frequência de bilhões de vezes por segundo, faz com que os dipolos se alinhem e relaxem numa frequência igualmente alta. Isto resulta na ruptura das pontes de hidrogênio das moléculas de água e na geração de calor por atrito molecular (MUDGETT, 1989).

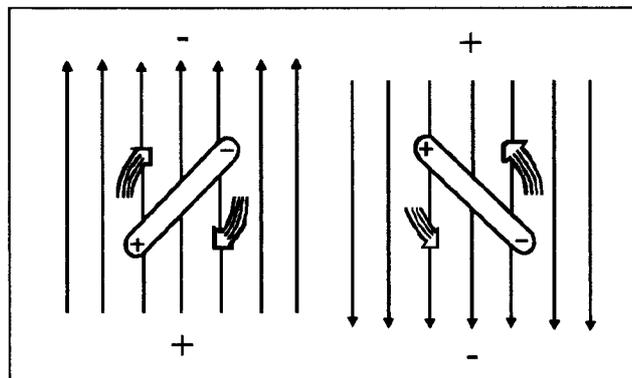


Figura 5 - Rotação dipolar devida à variação do campo (DECAREAU & PETERSON, 1986)

Este modelo permite entender porque dielétricos com moléculas polares, como água, etanol e PVC podem ser facilmente aquecidos por microondas, enquanto que tetracloreto de carbono, teflon e benzeno comportam-se como substâncias transparentes à microondas (SENISE, 1985).

3.2.2 - Propriedades dielétricas dos materiais e interação com as microondas

As propriedades elétricas de maior interesse no processamento dos materiais em geral, e dos alimentos em particular, são suas propriedades dielétricas, porque são elas que determinam algumas propriedades que afetam o acoplamento de energia do campo (ou seja, a eficiência da transferência de energia do equipamento para o produto) e sua distribuição dentro do produto (MUDGETT, 1986).

VON HIPPEL (1966, citado por JONES, 1986) define um material dielétrico como aquele que interage com um campo elétrico porque contem portadores de cargas que podem ser deslocadas, uma vez que, como todos os materiais, consistem de um núcleo atômico positivo envolto por uma nuvem eletrônica negativa. Assim, quando um campo elétrico externo é aplicado, os elétrons são levemente deslocados com respeito ao núcleo e então momentos dipolos são induzidos, causando o que é conhecido como polarização eletrônica dos materiais.

Na prática, não é preciso conhecer a fundo os detalhes da estrutura molecular para caracterizar os materiais, pois parâmetros macroscópicos, medidos em amostras de material, definem os efeitos combinados de todos os mecanismos de interação entre o campo eletromagnético e as moléculas do material.

Em geral, os materiais biológicos podem ser visualizados como dielétricos não ideais de um capacitor, que possuem a habilidade de armazenar e dissipar energia elétrica de um campo eletromagnético, através de um conjunto de propriedades elétricas expressas em notação complexa, e caracterizadas como permissividade dielétrica - uma propriedade elétrica com um componente real, a constante dielétrica, ϵ' , e um componente imaginário, fator ou constante de perdas, ϵ'' . Tais materiais não interagem com o componente magnético do campo, por causa da sua baixa permeabilidade magnética. Além do mais, são em geral maus isolantes, pois dissipam proporções consideráveis de energia elétrica acoplados com mecanismos de “histerese dielétrica” e condução, relacionados primariamente com a água livre e o conteúdo salino, como calor gerado internamente.

As propriedades dielétricas de um material são definidas através das equações (3.1) e (3.2) (VON HIPPEL, 1995):

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' = |\varepsilon^*| e^{-j\delta} \quad (3.1)$$

$$\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon' \quad (3.2)$$

Para se conhecer o significado físico destes parâmetros pode-se usar o exemplo citado por SENISE (1985). Considere um capacitor construído com duas placas paralelas de área A (m^2), separadas pela distância d (m). Se entre as placas há vácuo, a capacitância do capacitor é igual a:

$$C = \varepsilon_0 A/d \quad (F) \quad (3.3)$$

onde ε_0 é a permissividade do vácuo ($\cong 8,854 * 10^{-12}$ F/m).

Havendo um dielétrico entre as placas, a capacitância passa a ser :

$$C = \varepsilon' A/d = \varepsilon_r' \varepsilon_0 A/d \quad (F) \quad (3.4)$$

onde ε_r' é a permissividade relativa do dielétrico (>1).

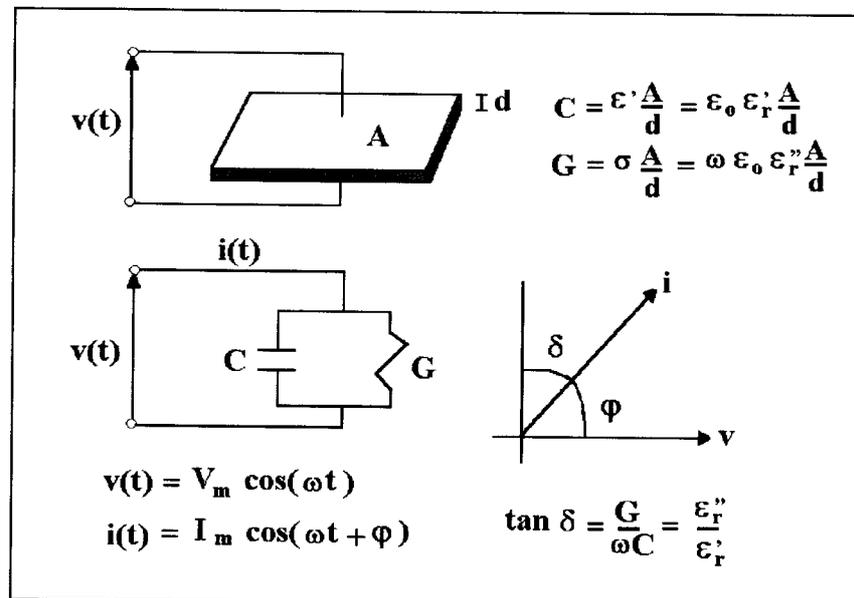


Figura 6 - Significado físico dos parâmetros dielétricos (SENISE, 1985)

Se o dielétrico não for um isolante perfeito (como o vácuo), apresentando uma condutividade σ (S/m), a condutância entre as placas vale:

$$G = \sigma A/d \quad (\text{S}) \quad (3.5)$$

Aplicando-se ao capacitor uma tensão alternada:

$$v(t) = V_m \cos \omega t \quad (\text{V}) \quad (3.6)$$

tem-se uma corrente:

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{A}) \quad (3.7)$$

No caso de um dielétrico perfeito ($\sigma = 0$), a corrente está defasada de 90° com relação à tensão: não há componente de corrente em fase com a tensão e por isso não pode haver dissipação de energia ($\varphi = 90^\circ$). Por outro lado, se o dielétrico tem condutividade não nula, a defasagem da corrente é inferior a 90° , diferindo desse valor pelo ângulo δ , tal que:

$$\tan \delta = G / \omega C = \sigma / \omega \varepsilon' = \varepsilon'' / \varepsilon' = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r' \quad (3.8)$$

Observa-se que a energia armazenada por ciclo no capacitor é dada por:

$$CV_m^2/2 \quad (\text{J}) \quad (3.9)$$

ou, por unidade de volume:

$$\varepsilon' E_m^2/2 \quad (\text{J/m}^3) \quad (3.10)$$

onde $E_m = V_m/d$ é a intensidade do campo elétrico entre as placas, enquanto que a potência dissipada por unidade de volume (transformada em calor) é dada por:

$$P_v = \sigma E_m^2/2 = \omega \varepsilon'' E_m^2/2 \quad (\text{W/m}^3) \quad (3.11)$$

Em outras palavras, ε' reflete a habilidade do material para armazenar energia elétrica e mede a energia armazenada pelo dielétrico, por unidade de volume, quando sujeito à ação de um campo elétrico alternado de $\sqrt{2}$ V/m (1V/m é o valor eficaz), ao passo que ε'' reflete a habilidade do material para dissipar energia elétrica como calor e mede a energia dissipada por segundo nas mesmas condições. Então $\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$ relaciona energia dissipada com energia armazenada pelo dielétrico, daí a designação “fator de perda” para $\tan \delta$.

Processos como a secagem de diversos materiais, cozimento, descongelamento de alimentos e outros, são exemplos de operações que dependem, fundamentalmente, das propriedades dielétricas da água, que possui um dipolo permanente. Esta, no estado líquido, inclui-se entre os dielétricos com valores mais elevados de ϵ_r' e $\tan \delta$, justificando a maior facilidade com que materiais que contém água são aquecidos por microondas. Por outro lado, estes parâmetros sofrem grande aumento na passagem do estado sólido (gelo) para líquido. Além disso, mesmo no estado líquido, as propriedades dielétricas da água sofrem variação sensível com a temperatura. Foi observado que a 3000 MHz, ϵ_r'' cai de 12 para 3,5 quando a temperatura é elevada de 25 para 85 °C, o que equivale a uma redução para 30% da potência dissipada por unidade de volume, suposta mantida constante a intensidade do campo elétrico (SENISE, 1985). Os valores da constante dielétrica relativa, ϵ_r' , e do fator de perda, $\tan \delta$, para alguns produtos, estão listados nas tabelas 9 e 10, no Apêndice A.

3.2.3 - Domínios e principais vantagens do processamento por microondas

As principais aplicações industriais da tecnologia de microondas abrangem as seguintes áreas (MICROONDE ÉNERGIE SYSTÈMES, 1992):

- Indústria agro-alimentar: secagem, desidratação, pasteurização, esterilização, desinsetização e descongelamento.
- Polímeros e compósitos: secagem, pré-aquecimento e reticulação.
- Indústria farmacêutica e química: secagem dos pós farmacêuticos e produtos biológicos, esterilização e reações químicas.
- Cerâmica: cozimento, fusão, solda e secagem.
- Eletrônica: reticulação de colas e resinas.
- Tratamento de superfícies: secagem e reticulação de tintas e cola.
- Proteção ambiental: tratamento dos dejetos hospitalares.

SCHIFFMANN (1987) resume as principais vantagens da secagem por microondas como sendo:

- Eficiência: na maioria dos casos, a energia interage com o solvente, não com o substrato.

- **Preservação do material:** a secagem pode ser feita em baixa temperatura, não havendo necessidade de se manter a temperatura da superfície alta, resultando em menores gradientes de temperatura.
- **Redução da migração:** o solvente é geralmente mobilizado na forma de vapor, por esta razão não transfere outros materiais para a superfície.
- **Efeito nivelador:** há maior acoplamento de energia (eficiência da transferência de energia do equipamento para o produto) nas áreas mais úmidas.
- **Velocidade:** o tempo de secagem pode ser reduzido em 50% ou mais.
- **Uniformidade de secagem:** acontece por uma combinação de perfis de temperatura mais uniformes e nivelamento da secagem.
- **Sistema com transporte contínuo:** menor espaço requerido, manuseio reduzido.
- **Melhoria do produto em alguns casos:** elimina o endurecimento da superfície, tensões internas e outros problemas.

3.3 - Aplicações industriais da energia de microondas

Segundo NELSON (1987), para ser viável, a aplicação de microondas deve resultar em economia de tempo e em melhoria do produto, além de permitir um trabalho que não pode ser feito de outra maneira com custos inferiores ou permitir economia suficiente que justifique seu alto custo.

SCHIFFMANN (1987) cita uma melhora da eficiência e uma diminuição dos custos de secagem, com a combinação de ar quente e microondas. O ar quente é relativamente eficiente na remoção de água livre (ou de capilaridade) próxima à superfície, enquanto que a energia de microondas fornece um meio eficiente de remoção da água livre situada no interior do alimento e da água de constituição (ou água ligada). O autor descreve três formas de combinação de microondas e métodos convencionais de secagem:

- Pré-aquecimento: a energia de microondas (m.o.) é aplicada na entrada do secador convencional, forçando a migração da umidade para a superfície, permitindo então a operação do secador convencional na sua condição mais eficiente (Figura 7a).

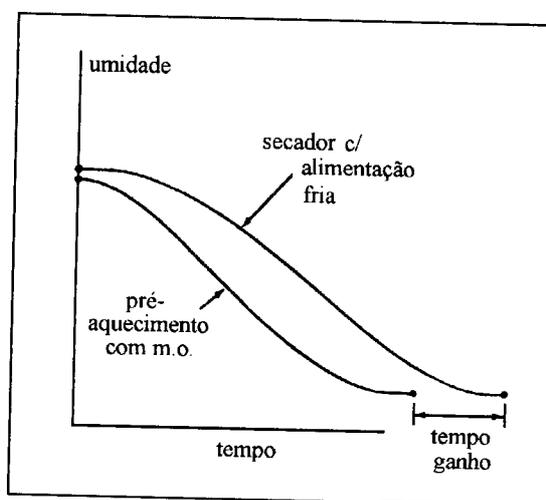


Figura 7a - Curva típica de sistema misto de secagem: pré-aquecimento (SCHIFFMANN, 1987)

- “Booster drying”: a energia de microondas é aplicada no secador convencional quando a superfície do material está seca, a umidade está concentrada no centro e a taxa de secagem começa a cair (Figura 7b).

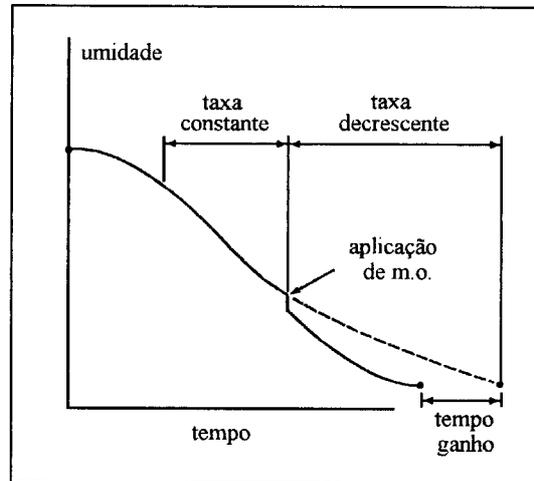


Figura 7b - Curva típica de sistema misto de secagem: “booster drying” (SCHIFFMANN, 1987).

- Secagem final: É a fase menos eficiente da secagem convencional, quando se gasta 2/3 do tempo total para se remover 1/3 da água. O uso da energia de microondas na saída do secador convencional substitui a ineficiência do ar quente pela geração interna de calor (Figura 7c).

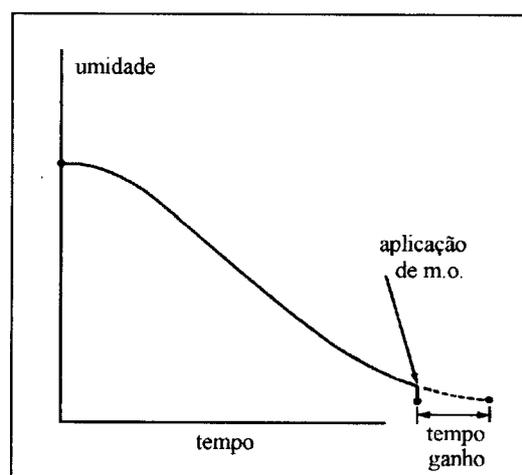


Figura 7c - Curva típica de sistema misto de secagem: secagem final (SCHIFFMANN, 1987)

Apesar da lenta aceitação das microondas no processamento de alimentos, STEELE (1987) previu maior utilização neste campo. A utilização de energia na indústria de alimentos tem crescido e a maior parte dos sistemas de controle atualmente são eletrônicos. Isto significa que uma mudança para o processamento por microondas não é mais tão complicada como era no passado. Outro fator que contribui para o crescimento da utilização da energia de microondas é a filosofia de administração “just-in-time” que requer a manutenção de estoques mínimos, para uso apenas imediato. Este é um fator relevante para a indústria de alimentos porque seus produtos não são estáveis mesmo quando estocados congelados e a estocagem geralmente apresenta um custo elevado. A rapidez do processamento por microondas, quando comparado à métodos convencionais, tem então grande importância dentro desta realidade. Por último, o autor ainda cita a queda dos preços dos geradores de microondas (“magnetrons”) e uma melhora na sua qualidade, com modelos mais eficientes e confiáveis.

Existem diversos trabalhos desenvolvidos sobre a aplicação da energia de microondas na secagem de produtos. MAURER *et al.* (1971) trabalharam na mudança de um sistema convencional de secagem de macarrão para um secador de microondas. Após conhecerem as vantagens de outras aplicações industriais das microondas, como cozimento de aves e bacon e a secagem final de batatas fritas, os autores partiram para a implantação de um sistema de secagem em pastifícios por microondas. Como resultado obteve-se uma melhoria do produto, redução do custo e do tempo de produção.

SMITH (1979) estudou comparativamente curvas de secagem de secadores a ar quente, microondas e ar quente assistido a microondas, de produtos não alimentícios e observou que o sistema microondas e ar quente alcançou as mais altas taxas de secagem em todos os níveis de umidade, sendo bastante alta a taxa de secagem relativa em baixos níveis de umidade. A questão de quando aplicar a energia de microondas depende das propriedades do material e dos fatores econômicos. A maioria dos trabalhos desenvolvidos pelo autor indica pouca vantagem em se usar a energia de microondas nos primeiros estágios de secagem, sendo mais eficiente quando aplicada em níveis de umidade abaixo de 20%. As considerações que o levaram a esta conclusão foram:

1. Durante o estado inicial, quando a água está evaporando sob condições de taxa constante, o ar quente é bastante eficiente e o custo da energia de microondas é relativamente alto.

2. Altos teores de umidade podem elevar a temperatura interna a níveis onde a tendência é cozinhar e não secar.
3. Altos teores de umidade podem produzir gradientes de pressão no interior do material podendo exceder a transferência de massa, provocando rachaduras ou empolamento.

O autor termina por listar as vantagens alcançadas com a introdução das microondas em uma unidade de secagem de macarrão:

1. Utilização do espaço: O secador a microondas e ar quente ocupa menos de $\frac{1}{4}$ do espaço ocupado pelo secador convencional.
2. Utilização de tempo: O tempo de secagem caiu de 8 horas para 1 $\frac{1}{2}$ hora.
3. Qualidade do produto: A cor e a textura melhoraram, o macarrão passou a produzir menos goma ao cozinhar e as contaminações de todos os tipos diminuíram.
4. Sanificação: O secador a microondas e ar quente é mais fácil de limpar que o convencional.
5. Custos de operação: O novo sistema gerou uma economia de aproximadamente 20 a 25%.

Na secagem de cebola, o mesmo autor cita como vantagens:

1. Uniformidade na umidade do produto final.
2. Redução do custo energético.
3. Redução na contagem de bactérias.

OWUSU- ANSAH (1991) cita a necessidade de se renovar os velhos processos usados na indústria de alimentos, e dá como exemplo o preparo de gelatina que no processamento convencional passa por nove etapas, requerendo equipamentos caros, necessitando ainda altos custos de infra estrutura. Usando um secador contínuo a microondas o processo é reduzido a 4 etapas e o produto obtido apresenta características melhoradas em relação ao método convencional. O autor indica também como aplicação potencial a secagem de flavorizantes encapsulados.

NELSON (1987), após estudar várias aplicações de microondas em produtos agrícolas, como secagem, tratamento de sementes, controle de insetos, inativação de enzimas e medição

de umidade, concluiu que, economicamente, a utilização de microondas no tratamento de sementes se mostra mais plausível que as outras aplicações para produtos agrícolas, por serem as sementes artigos de alto valor e se apresentarem em pequenas quantidades a serem processadas. O autor cita exemplos de secagem de grãos (soja e arroz) onde indicações de produtos de melhor qualidade foram obtidas, mas aponta que os altos custos podem impedir aplicações práticas, e termina por dizer que os custos de produção podem ser recuperados nas vendas de produtos de qualidade superior, mas cada aplicação particular deve ser avaliada do ponto de vista de mercado.

DECAREAU (1985) estudou um secador a microondas a vácuo para a secagem de milho. Segundo o autor, o incentivo ao desenvolvimento deste processo veio do reconhecimento que, em lavouras modernas, a colheita das safras é feita rapidamente, estando os grãos após a colheita com alto teor de umidade. Como o tempo para a deterioração dos grãos úmidos é relativamente curto, se torna imperativo secar a safra em poucos dias. Apesar do alto custo da energia elétrica, o autor prevê para o futuro uma maior competitividade da eletricidade com os combustíveis fósseis, especialmente em países que disponham de energia hidroelétrica, e indica aplicações imediatas para a secagem com microondas e vácuo para sementes de alto valor e sensíveis ao calor, alimentos industriais, plásticos, fibras, algodão, fármacos e outros produtos de difícil secagem.

Ainda na secagem de milho, GUNASEKARAN (1990) estudou os efeitos da aplicação da energia de microondas no modo contínuo e em pulsos, e SHIVARE *et al.* (1992a, 1992b) a influência do nível de potência das microondas e da temperatura de entrada do ar na operação intermitente e contínua, na secagem por ar quente assistido à microondas.

SIVETZ & DESROSIER (1979) citam relatos do uso de aquecimento por microondas na torração de café, desenvolvido pelas firmas Raytheon e Girdler. Os autores descrevem uma metodologia experimental bastante simples, onde é necessário apenas assegurar a movimentação dos grãos para uma completa homogeneização. O aquecimento pode ser feito satisfatoriamente em presença de ar ou sob vácuo, devendo-se neste último caso tomar cuidado para que não sejam usadas pressões demasiadamente baixas, que possam resultar em descargas elétricas.

Após uma breve explicação dos princípios básicos da torração dielétrica, GONDÁR (1964) cita os efeitos do gradiente de potencial ótimo, a sensibilidade de diferentes matérias-primas sob este tratamento e a influência do nível de umidade na torração de café e cacau. O autor termina por comparar a torração dielétrica com o processo convencional listando as melhorias na qualidade encontradas e as mudanças nas substâncias secas, nos componentes do sabor e do aroma.

Características, vantagens e desvantagens da secagem por microondas podem ser encontradas na literatura para outros produtos agrícolas como soja (FREGNI & LEONHARDT, 1982), arroz parboilizado (VELUPILLAI *et al.*, 1989; WADSWORTH *et al.*, 1990), amendoim (ST. JOHN & OTTEN, 1989), trigo (CAMPAÑA *et al.*, 1993) e uvas (TULASIDAS *et al.*, 1993).

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados dois ciclos distintos de secagem. No primeiro, o café cereja descascado sofreu uma secagem completa no secador rotativo a ar quente convencional até a umidade final desejada (aproximadamente 11% b.u.). No segundo ciclo, o cereja descascado foi pré-seco no secador convencional até um teor de umidade aproximado de 30% procedendo-se a secagem final no secador rotativo assistido a microondas.

4.1 - Matéria-prima

A matéria-prima utilizada foi o café (*Coffea arabica* L.) variedades *Mundo Novo*, *Catuai Amarelo* e *Catuai Vermelho*, procedente da Fazenda Fazendinha, Luminárias-MG. As amostras foram obtidas por derriça no pano, constituindo cada uma de 300 kg de café em coco.

Após a colheita, o café foi trazido para o Departamento de Tecnologia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP, e foi em seguida processado segundo o método de obtenção do café cereja descascado, descartando-se as frações verde, bóia, casca e impurezas. Antes de passar para o secador, o café cereja descascado foi submetido à uma pré-secagem em terreiro, em bandejas teladas de aço inox (89x71x3 cm³) por 24 horas, sendo revolvido várias vezes neste período. Esta etapa preparatória visou alcançar uma secagem superficial natural para evitar que os grãos cobertos com restos de mucilagem colassem nas paredes do secador.

4.2 - Secagem no secador convencional

Foi utilizado um secador rotativo descontínuo piloto a ar quente, com capacidade para 200 litros, com aquecimento elétrico de 15 kW de potência, velocidade de rotação de 4,15 RPM, de fabricação Pinhalense tipo SRE - 002 n°3622, ilustrado na Figura 8.

4.2.1 - Testes de secagem convencional

Foram realizados experimentos de secagem com umidade inicial do material variando de 44,9 % b.u. a 56,6 % b.u. e temperaturas médias do ar de secagem de 33 a 60°C Os dados de secagem foram coletados tomando-se amostras de aproximadamente 50g no início da operação e a intervalos de 1 hora para determinação da umidade dos grãos. No decorrer da secagem foram feitas leituras das temperaturas do ar de secagem na entrada e saída do secador e da massa do café, bem como das condições psicrométricas do ar ambiente.

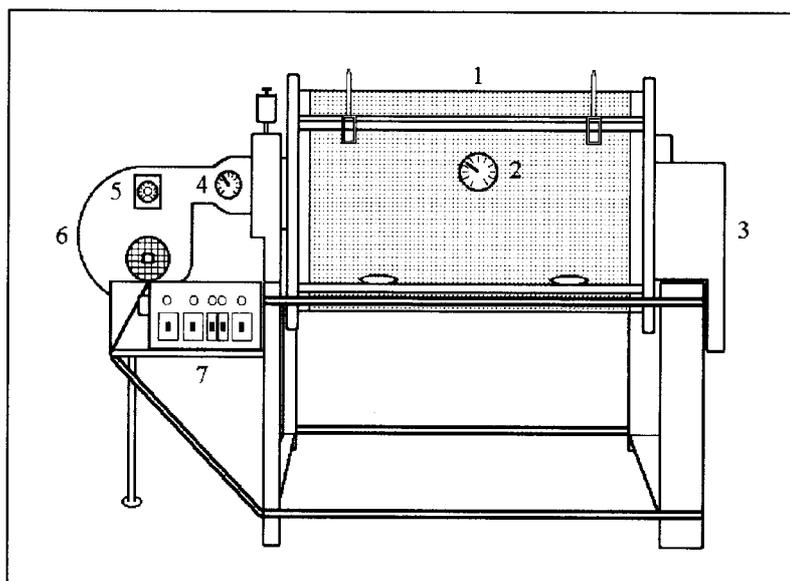


Figura 8 - Desenho esquemático do secador rotativo piloto a ar quente convencional

(1) Tambor rotatório; (2) Termômetro da massa de café; (3) Acionamento do tambor; (4) Termômetro do ar de entrada; (5) Termostato; (6) Ventilador; (7) Painel de controle

4.2.2 - Metodologia da secagem convencional

O teor de umidade dos grãos foi determinado pela perda de peso em estufa regulada a 105°C até peso constante, sendo calculado de acordo com a seguinte equação:

$$U = \frac{(P - P_f)}{P} * 100 \quad (\%) \quad (4.1)$$

onde P é o peso inicial da amostra, P_f é o peso final e U é a umidade em % base úmida. Para um controle mais ágil do processo, foram feitas determinações com uma balança semi-analítica com infravermelho (marca OHAUS modelo MB200) por uma hora a 150°C . A curva de calibração da balança infravermelho pelo método da estufa (figura 17) pode ser vista no Apêndice B.

As temperaturas de bulbo seco e úmido do ar de secagem na entrada e na saída do secador foram tomadas em termômetros fixados à frente do coletor de ar do secador e na parte externa do cilindro rotatório. A temperatura na massa do café foi tomada por meio de um termômetro instalado na carcaça do secador, e a temperatura do ar de secagem foi controlada por um termostato ligado ao banco de resistências e à um termômetro na entrada do cilindro rotatório.

A pressão atmosférica foi determinada por meio de um barômetro de mercúrio, instalado próximo ao local do secador.

4.3 - Secagem no secador assistido a microondas com pré-secagem convencional

Os equipamentos utilizados no 2º ciclo de secagem foram o secador descrito no item 4.2 para a pré-secagem convencional, e um protótipo de secador a ar quente assistido a microondas contínuo (Figura 9), desenvolvido no laboratório de microondas do DEA/FEA/UNICAMP (MARSALOLI, 1991), para a etapa final da secagem do café.

4.3.1 - Testes de secagem combinada

Neste ciclo alternativo de secagem, o café foi submetido à uma pré-secagem parcial no secador rotativo a ar quente convencional, até um teor de umidade de aproximadamente 30 % b.u., quando a secagem foi interrompida e o produto foi alimentado no secador rotativo a ar quente assistido a microondas com fluxo co-corrente de ar quente, para a secagem final do café, segundo o sistema misto de secagem descrito no item 3.3 (secagem final). Esta etapa foi repetida variando-se a umidade de entrada do produto no secador a microondas, o nível de potência de aplicação de microondas e o tempo de residência, avaliando-se a temperatura e a

umidade final alcançadas pelo grão. A alimentação dos grãos e a velocidade de rotação do secador a microondas foi fixada, em função de uma ocupação ótima do volume do secador, de acordo com o tempo de residência (MISKELL & MARSHALL, 1956).

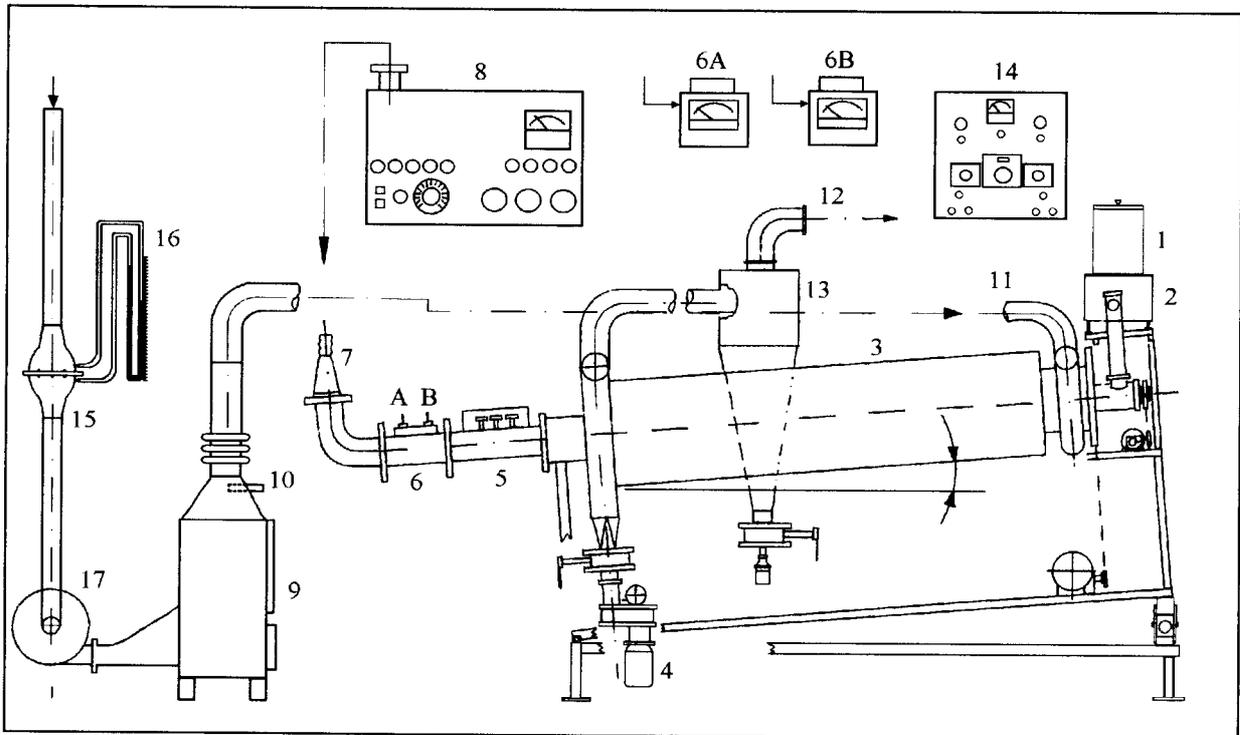


Figura 9 - Desenho esquemático do secador a microondas

(1) Depósito de café; (2) Alimentador; (3) Cavidade de microondas (M.O.); (4) Café seco; (5) Toco triplo; (6) A/B Sistema medidor de M.O.; (7) Guia de onda flexível; (8) Gerador de M.O.; (9) Aquecedor de ar; (10) Sensor de temperatura; (11)/(12) Entrada de ar/exaustão; (13) Ciclone; (14) Painel de controle; (15)/(16) Medidor de fluxo; (17) Ventilador

4.3.2 - Metodologia da secagem combinada

O teor de umidade dos grãos, a pressão atmosférica e as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar de secagem na entrada e na saída do secador foram medidos segundo a metodologia descrita anteriormente (4.2.2).

A densidade aparente do café foi tomada medindo-se a massa de café em uma proveta de 4 litros para os vários lotes.

A temperatura da massa de café foi tomada antes da exposição às microondas no depósito de café na entrada do secador, e na saída, onde as amostras foram coletadas em garrafa térmica.

O ajuste da temperatura do ar foi feito através do painel de controle do secador que comanda três bancos de resistência mediante um sistema termostatizado automático com bulbo sensor aplicado a um dos bancos. O controle da vazão foi feito através de uma válvula borboleta, sendo medida por uma célula de fluxo laminar (Meriam mod. 50MC2-2) interligada por mangueiras flexíveis à um manômetro de coluna “U” de vidro para funcionamento com água.

A potência de microondas foi ajustada no gerador (Cober modelo S6F), com potência de saída variável de 0,5 à 6 kW e frequência de 2450 MHz. Dois medidores portáteis de potência refletida e transmitida, (Cober modelo PM-IR), ligados a um acoplador duplo no guia de onda, foram usados para controlar a eficiência de transferência da potência para a carga, que é máxima quando a impedância do gerador e da carga estão casadas com a impedância característica da linha. Se o medidor de potência refletida indicasse um baixo acoplamento de energia no produto, seria feito um ajuste no “toco triplo”, um dispositivo para o casamento das impedâncias, mas isto não se mostrou necessário, pois a potência média transmitida (absorvida) manteve-se dentro de um padrão de 90% ou mais que a potência total (soma da transmitida e refletida).

4.4 - Análises

Ao fim do processo, as diferentes amostras secas convencionalmente e aquelas secas no sistema combinado (convencional + microondas) foram encaminhadas para degustação realizada por profissionais da Bolsa de Cereais de São Paulo (BCSP). Além da análise sensorial foi feita a microscopia eletrônica de varredura para posterior observação de modificações na microestrutura interna e externa do grão.

4.4.1 - Análise sensorial

A classificação sensorial usada na “prova da xícara” da BCSP segue a escala, da melhor para a pior bebida, em: Estritamente Mole, Mole, Apenas Mole, Dura, Riada, Rio e Rio Zona. As características organolépticas referentes à esta classificação se encontram na tabela 11 no Apêndice C.

CALLE (1956, citado por CHAGAS, 1994) discute a subjetividade da “prova da xícara” e afirma ser ela limitada pela aptidão do provador, podendo ser deformada, não podendo ser medida.

O sabor característico do café é devido à presença e aos teores de vários constituintes químicos, voláteis e não voláteis, entre eles ácidos, aldeídos, cetonas, açúcares, proteínas, aminoácidos, ácidos graxos, composto fenólicos, etc., e também à ação de enzimas em alguns destes constituintes, produzindo compostos que interferirão no sabor da “prova de xícara” (CHAGAS, 1994). Trabalhos exaustivos têm sido realizados no intuito de correlacionar a composição química com a qualidade da bebida, para que se tenham ferramentas analíticas para um controle de qualidade mais objetivo.

4.4.2 - Microscopia eletrônica de varredura

Com o objetivo de comparar os efeitos da secagem por microondas com os efeitos da secagem convencional, amostras de vários tratamentos realizados foram observadas pela análise microscópica de varredura e modificações estruturais foram documentadas por micrografias.

Para serem submetidos à microscopia eletrônica de varredura, os grãos foram processados segundo a metodologia proposta por KARNOVSKY (1965, citado por YOUNG & SCHADEL, 1990), modificada por YOUNG & SCHADEL (1990) com algumas adaptações estabelecidas após uma primeira investigação, listada à seguir:

- a) Fixação com solução de Karnovsky modificada (25 ml de paraformaldeído 8%, 3,6 ml de glutaraldeído 70% e 28,6 ml de tampão fosfato de sódio 0,1 M, pH 7,0, referido

posteriormente como tampão) à vácuo em temperatura ambiente ($\cong 25^{\circ}\text{C}$) por 30 minutos, ficando em seguida à pressão atmosférica sob refrigeração por $5\frac{1}{2}$ horas.

- b) 6 lavagens com tampão de 5 minutos cada.
- c) Corte com lâmina, sem congelamento do grão, em fatias de ≈ 1 mm de espessura, deixando também um grão inteiro para análise da superfície externa.
- d) Pós-fixação por 1 hora com solução de tetróxido de ósmio 1% em tampão.
- e) 2 lavagens de 15 minutos com tampão para remover o excesso de tetróxido de ósmio.
- f) Desidratação com soluções de etanol em água a concentrações crescentes (25, 50, 75, e 95%) com intervalos de 15 minutos.
- g) 2 lavagens de 30 minutos com etanol absoluto.
- h) Desidratação pelo processo do ponto crítico com CO_2 líquido, com o “Critical Point Dryer CPD 030” de marca Balzers.
- i) Metalização com carbono-ouro (camada de ≈ 30 nm), realizada no “Sputter Coater SCD 050” de marca Balzers.

O microscópio utilizado foi o JEOL JSM - T300 Scanning Microscope, a aceleração de voltagem utilizada foi 15kV. Foram feitas investigações nas ampliações de 35, 50, 75, 150, 200, 500, 1000, 1500, 2000, 3500, 5000 e 7500 vezes.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - Secagem convencional

Após ser processado no lavador/separador e descascador, o café apresentou umidade variando de 56,6 à 44,9% (início e fim de safra, respectivamente). O café passou então pela pré-secagem natural em bandejas por um dia, seguindo-se a secagem artificial. A tabela 1 apresenta os dados de 4 experimentos realizados segundo o 1º ciclo de secagem proposto, em secador convencional.

Tabela 1 - Dados do ciclo de secagem convencional

Experimento	Variedade	T _{AR} (°C)	T _{MASSA} (°C)		Umidade (%b.u.)		Tempo total (h)
		média	média	máxima	entrada	saída	
1	Mundo Novo	33	31,5	32,0	48,5	15,2	37,5
2	Catuaí Vermelho	43	38,0	40,0	44,9	12,3	26,0
3	Mundo Novo	54	43,6	50,0	48,4	10,3	19,0
4	Mundo Novo	59	50,0	57,0	50,0	10,0	15,0

A partir da umidade das amostras a diferentes tempos de secagem, foram construídas as curvas de secagem representativas da variação da umidade do produto com o tempo de secagem, e da umidade reduzida (U.R.) para cada temperatura de secagem.

Uma simplificação da solução da equação da difusão é frequentemente usada para se prever a secagem de grãos (BROOKER *et al.*, 1974), onde pode ser considerado apenas um termo da série, como mostra a equação abaixo:

$$U.R. = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = A_1 \cdot \exp(-kt_s) \quad (5.1)$$

onde U é a umidade variável no tempo, U_i é a umidade inicial do produto, isto é, no tempo zero de secagem, U_e é a umidade de equilíbrio, A₁ é um parâmetro que depende da geometria do material de secagem, k é um parâmetro denominado constante cinética de secagem que

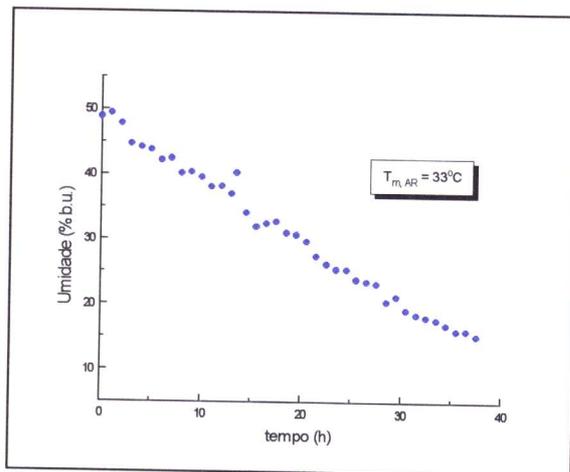
depende das propriedades físicas do material e da temperatura de operação e t_s é o tempo de secagem.

Com o objetivo de se estimar os parâmetros, foram construídas as curvas cinéticas de secagem (figura 11) para as quatro temperaturas

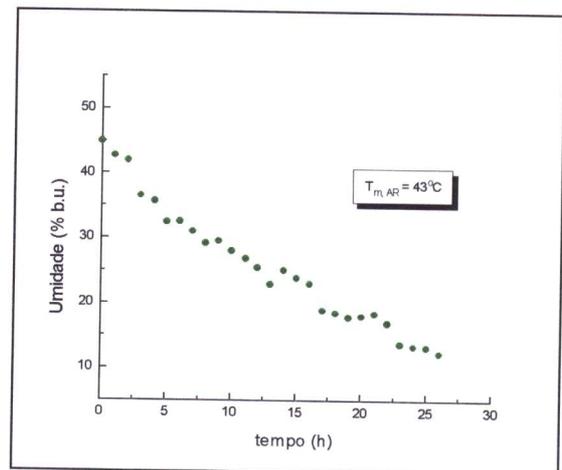
Com relação ao tempo de secagem é importante ressaltar que apenas o experimento 2 foi executado ininterruptamente, enquanto que nos experimentos 1, 3 e 4 o secador operou com paradas, como citado no item 3.1.1. O tempo total de secagem foi obtido somando-se os períodos em que o secador permaneceu ligado. Para a construção da curva de secagem foi feita a média do último valor de um período e a umidade inicial do período seguinte de secagem.

Na figura 10 pode-se observar o efeito da temperatura do ar na secagem de café representado nas curvas de secagem para os quatro experimentos. Foi observado que as curvas não se apresentam bem definidas, havendo algumas flutuações nos pontos, indicando uma condição não ideal de homogeneidade no secador. Com relação ao efeito da temperatura, foi observado que quanto maior a temperatura, maior a taxa de secagem e mais rapidamente se processa a secagem, mesmo com valores diferentes de umidade inicial e variedades diferentes de café (limitações inerentes à matéria-prima).

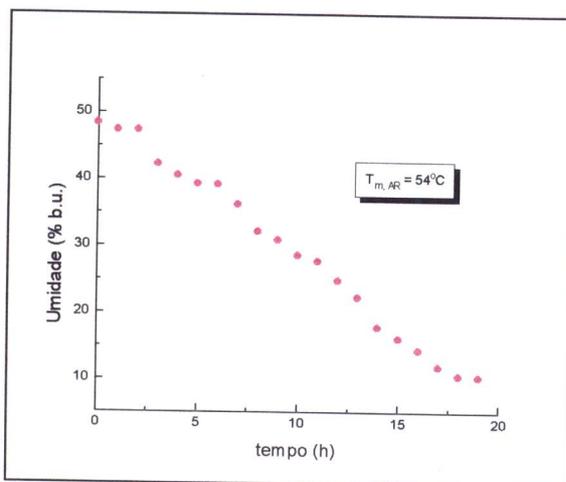
A figura 11 representa as curvas cinéticas de secagem com o ajuste para o modelo proposto (eq. 5.1) para as 4 diferentes temperaturas de secagem. Pode-se observar que os dados experimentais apresentaram um ajuste razoável ao modelo, estando os valores dos parâmetros listados na tabela 2



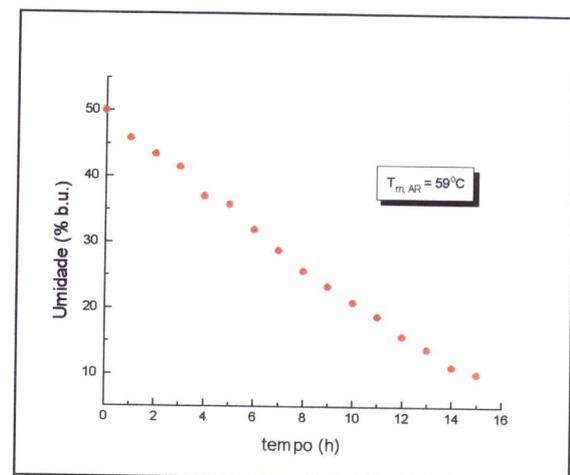
(a)



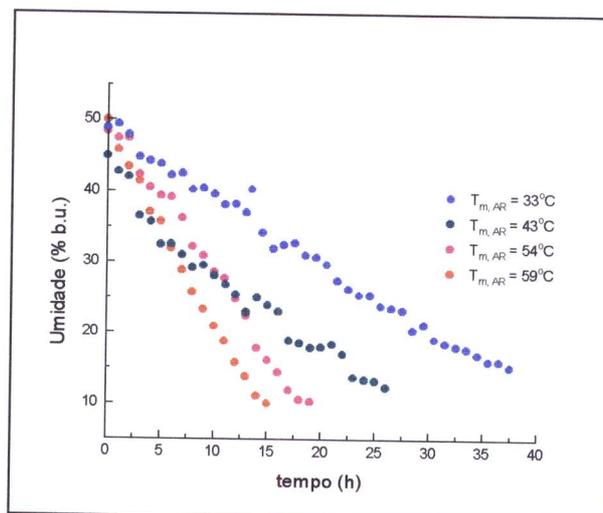
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 10 - Curvas de secagem ($U \times t$) para diferentes temperaturas do ar de secagem: (a) experimento 1; (b) experimento 2; (c) experimento 3; (d) experimento 4; (e) sobreposição dos gráficos (a), (b), (c) e (d)

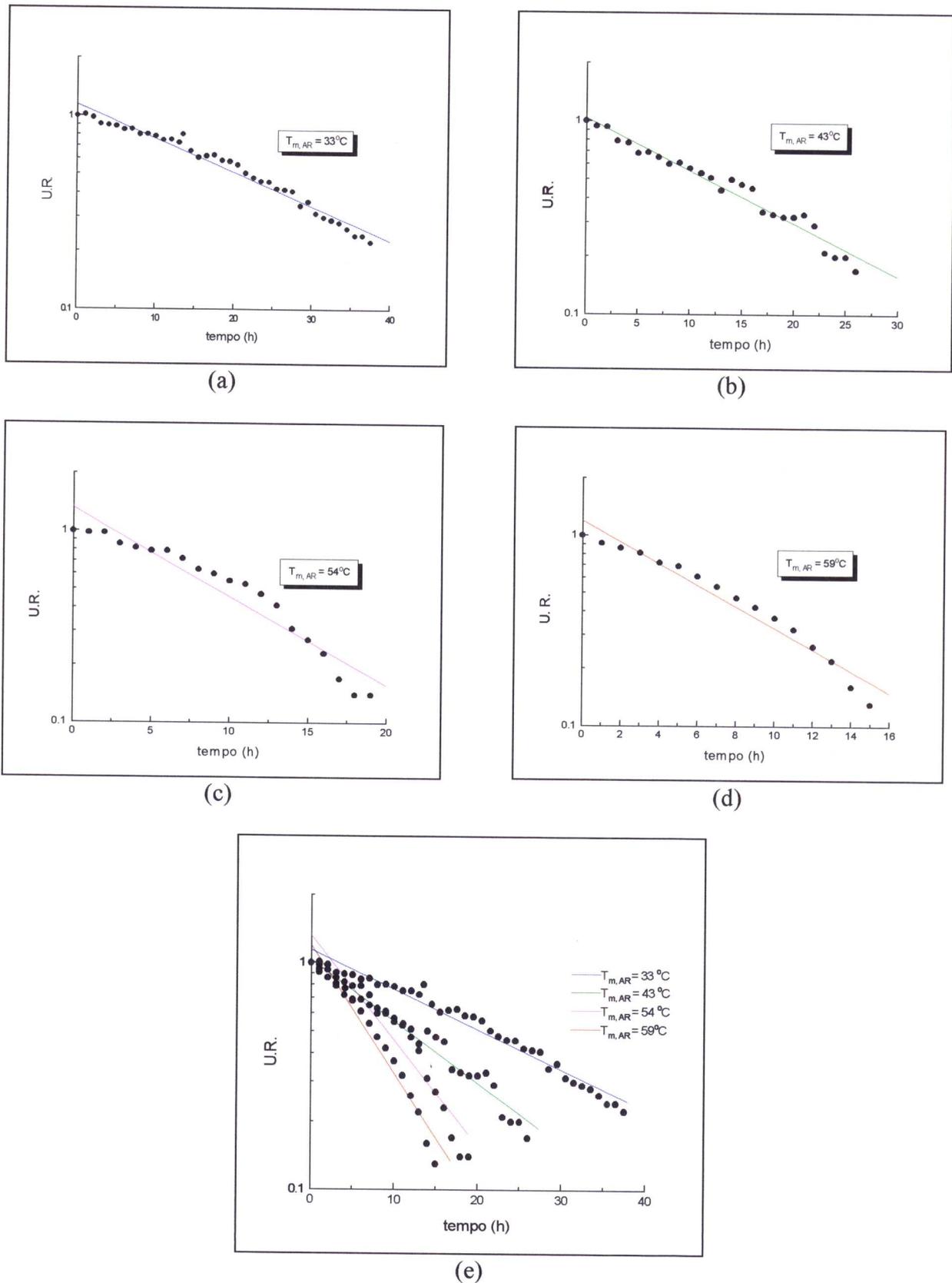


Figura 11 - Curvas de secagem (U.R. x t) para diferentes temperaturas do ar de secagem: (a) experimento 1; (b) experimento 2; (c) experimento 3; (d) experimento 4; (e) sobreposição dos gráficos (a), (b), (c) e (d)

Tabela 2 - Resultados obtidos para os parâmetros do modelo (eq. 5.1)

Experimento	T _{AR} média (°C)	A ₁	k (hora ⁻¹)* 10 ²	Coef. corr.
1	33	1,14	1,75	0.99
2	43	1,03	2,71	0.98
3	54	1,32	4,63	0.96
4	59	1,20	5,65	0.98

Nota-se que o parâmetro A₁ praticamente não foi afetado pela variação da temperatura, enquanto que a constante cinética mostrou uma dependência significativa com a temperatura.

5.2 - Secagem assistida a microondas com pré-secagem convencional

Os dados da pré-secagem convencional dos experimentos realizados conforme o 2º ciclo de secagem se encontram na tabela 3.

Tabela 3 - Dados da pré-secagem convencional do 2º ciclo de secagem proposto

Experimento	Variedade	T _{AR} (°C)	T _{MASSA} (°C)		Umidade (%b.u.)		Tempo total (h)
		média	média	máxima	entrada	saída	
5	Mundo Novo	60	44,2	50,0	44,9	32,8	6,0
6	Catuaí Amarelo	44	37,3	40,0	45,5	33,4	7,5
7	Catuaí Vermelho	45	37,1	40,0	45,0	30,7	10,5
8	Catuaí Vermelho	46	35,2	40,0	44,9	28,0	10,0

Ao alcançar a umidade de $\cong 30$ % b.u., a pré-secagem no secador convencional foi interrompida passando o produto a ser alimentado no secador assistido à microondas. À partir de cada experimento, foram feitos alguns testes variando-se o tempo de retenção e a potência aplicada.

Os ajustes de velocidade de rotação e vazão de alimentação neste secador seguiram a seguinte metodologia:

O tempo de retenção ou tempo de passagem do material pelo secador, portanto a duração da secagem assistida a microondas, pode ser estimado pela equação (5.2) (DĂSCĂLESCU, 1969):

$$\theta = \kappa * \frac{L_d}{n * \text{tg}\alpha * D_d} \quad (\text{min}) \quad (5.2)$$

onde: θ = tempo de retenção, min

κ = coeficiente complexo, $\cong (0,5)$

n = velocidade de rotação do cilindro, RPM

$\text{tg}\alpha = \frac{\text{sen}\nu}{\text{sen}\lambda}$, sendo ν o ângulo de inclinação do cilindro ($1,189^\circ$) e λ o ângulo de talude¹ do material ($\cong 31^\circ$)

L_d = comprimento do cilindro (1,30 m)

D_d = diâmetro interno do cilindro (0,30 m)

O tempo de retenção foi ajustado de acordo com a velocidade de rotação do cilindro (n), mantendo-se fixos os outros parâmetros.

Segundo MISKELL & MARSHALL (1956), o desvio padrão do tempo de retenção para cilindros rotativos é mínimo quando a porcentagem de ocupação do volume interno do cilindro é de 7,5 a 8%. O volume ótimo de ocupação (V_o) foi calculado como sendo então 7,75% de 91,89 litros, ou seja, 7,12 litros. De acordo com o tempo de retenção escolhido, a vazão volumétrica de alimentação é dada por:

$$F = \frac{V_o}{\theta} \quad (\text{l/h}) \quad (5.3)$$

¹ É o ângulo formado pela inclinação da superfície do cone em relação ao plano horizontal quando uma massa de grãos é depositada sobre um plano horizontal (PUZZI, 1986).

Com o dado da densidade aparente do café (ρ), tem-se a vazão mássica à partir da equação (5.4):

$$Q = F * \rho \quad (\text{kg/h}) \quad (5.4)$$

O alimentador de escala digital foi calibrado para cada lote de café de modo que a vazão mássica (Q) fosse convertida por meio de uma curva de calibração linear à um valor na escala (E):

$$E = a + b * Q \quad (5.5)$$

Os dados referentes à secagem final dos experimentos 5, 6, 7 e 8 se encontram na tabela 4.

O primeiro algarismo do número do teste indica o processo de pré-secagem sofrido referente à tabela 3, a umidade inicial de cada série de testes é, portanto, a umidade final da pré-secagem convencional para o respectivo pré-tratamento. A densidade de potência foi calculada pela razão da potência absorvida pelo café (medida) e a vazão de alimentação (que variou de 2,52 a 4,27 kg/h, dependendo da densidade aparente e do tempo de retenção). A temperatura e a umidade final foram medidas na saída do secador e o tempo de retenção foi estimado pela equação 5.2. A vazão do ar de secagem utilizada foi de 1,5 m³/min, com fluxo de ar co-corrente.

No estágio final da secagem, a temperatura dos grãos ultrapassou a temperatura da pré-secagem convencional, devido à absorção das microondas. O breve tempo de exposição entretanto não causou danos à qualidade do produto.

Tabela 4 - Dados da secagem final realizada no secador assistido a microondas

Teste nº	Densidade de Potência (Wh/kg)	Temperatura(°C)		Tempo de retenção estimado (h)	Umidade final (%b.u.)
		Ar	Produto		
5.1	201	60	61,0	1,1	14,5
5.2	234	60	67,0	1,1	12,0
5.3	117	60	53,0	1,6	18,0
5.4	176	60	59,0	1,6	15,0
6.1	193	40	51,0	1,6	17,0
6.2	222	40	52,5	1,6	15,8
6.3	214	40	47,5	2,0	17,0
6.4	267	40	50,0	2,0	14,0
7.1	197	40	47,5	2,0	15,8
7.2	246	40	49,0	2,0	14,2
7.3	295	40	51,0	2,0	11,2
7.4	328	40	52,5	2,0	9,6
7.5	239	40	47,0	2,3	14,7
7.6	298	40	50,0	2,3	10,3
8.1	222	40	48,5	2,3	12,0
8.2	259	40	48,5	2,3	10,5

O tempo total de secagem na opção convencional + microondas foi reduzido em até quatro vezes quando comparado à secagem totalmente convencional. Os dados dos experimentos 4 e 8.1 foram sobrepostos (figura 12) para se ilustrar a diminuição do tempo de secagem total.

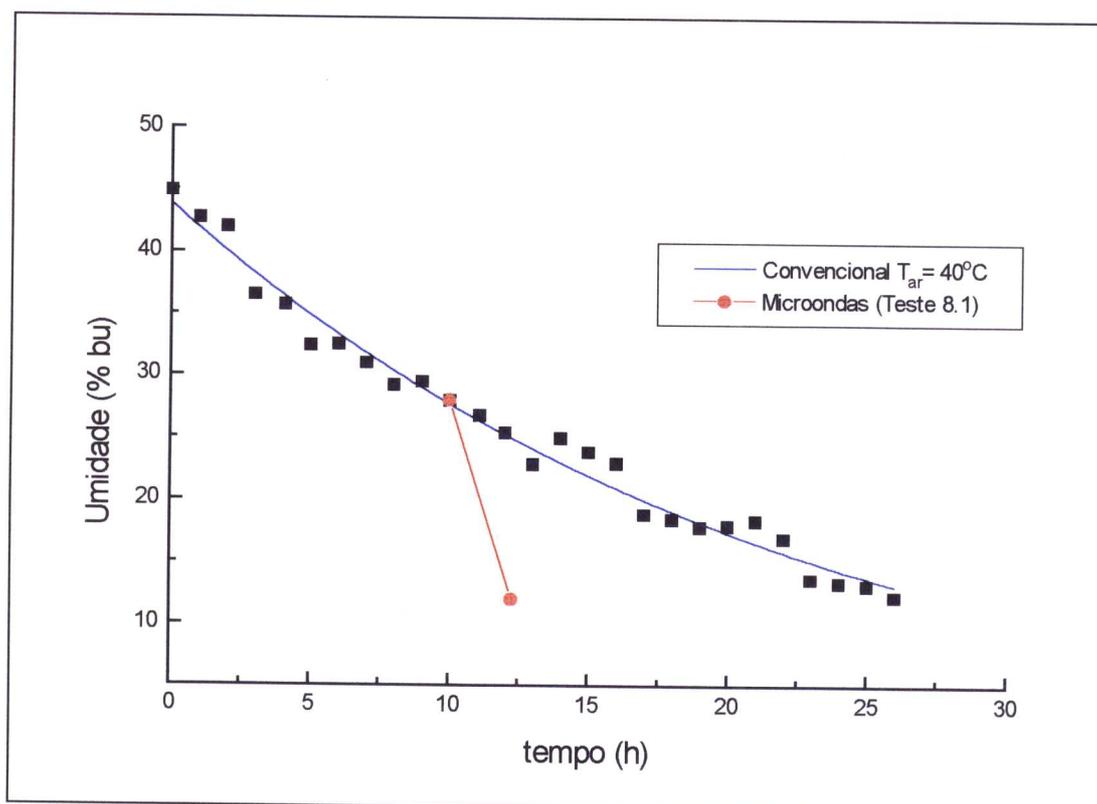


Figura 12 - Sobreposição das curvas de secagem dos experimentos 4 e 8.1

Devido à desuniformidade da matéria prima, não foi possível se fixar uma densidade de potência para reduzir a umidade dos grãos à desejada (12%), mas, analisando-se a figura 13, percebe-se que, para uma determinada umidade inicial e tempo de residência fixos, a umidade e a temperatura finais alcançadas pelo café variam linearmente com a densidade de potência aplicada, dentro da região estudada. Deste modo, pode-se fixar a densidade de potência necessária para reduzir a umidade do produto ao valor desejado, para uma determinada umidade de entrada e tempo de permanência, podendo-se prever a temperatura que será alcançada pelo grão.

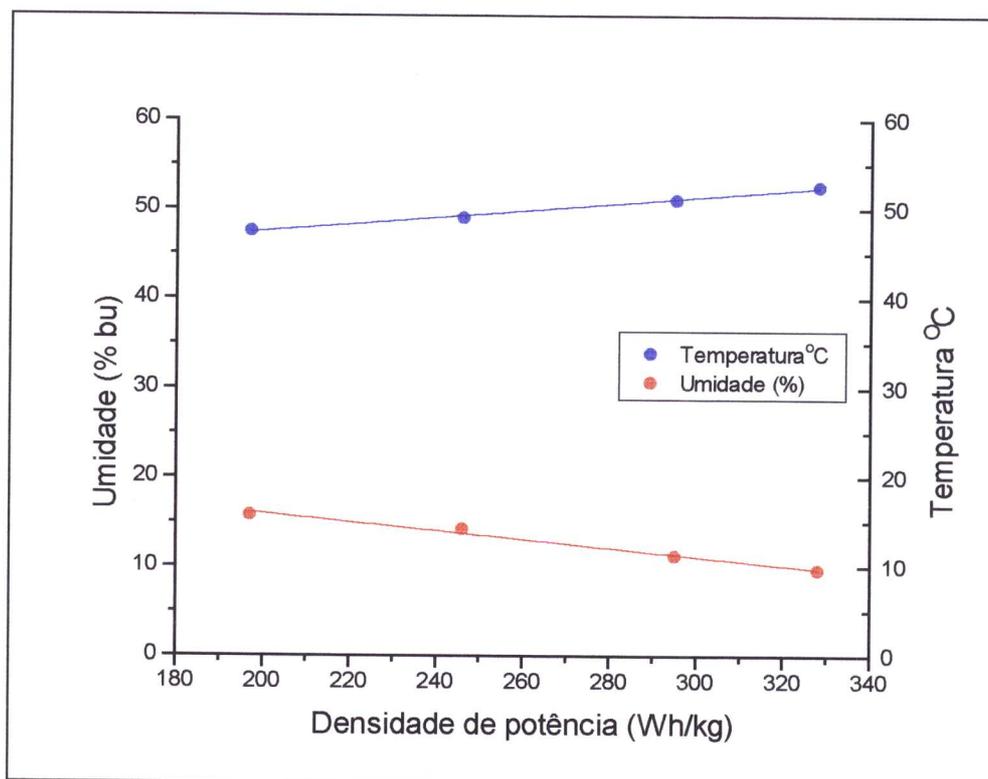


Figura 13 - Variação da temperatura e umidade finais com as densidades de potência aplicadas, para umidade inicial 30,7% b.u. e tempo de retenção de 2 h (experimentos 7.1 a 7.4)

A fim de testar a validade da equação 5.2 como modelo para a estimativa do tempo de retenção (TR), duas determinações da distribuição do TR no interior do secador foram realizadas alimentando-se 180g de marcador (café tingido de branco) no secador após atingido o regime permanente. As condições do secador eram as mesmas do experimento 8, diferindo apenas pela não aplicação de microondas. O café foi coletado em intervalos regulares de tempo e a massa de marcador (A) foi medida em relação à massa total coletada (A+B). As duas determinações foram realizadas com café de teores de umidade diferentes (26,3 e 12,2 %) e os resultados foram ajustados por meio de curvas Gaussianas (figura 14).

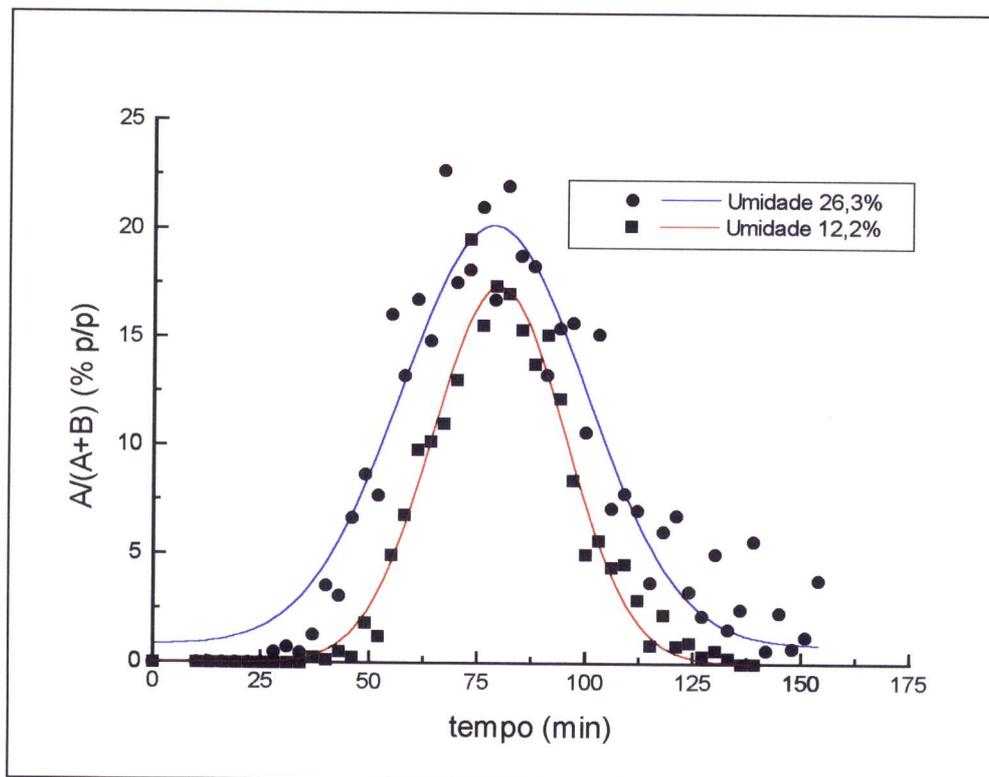


Figura 14 - Distribuições do tempo de retenção no secador cilíndrico rotativo a ar quente assistido a microondas do café do experimento 8 a diferentes umidades

Como se pode perceber, a distribuição do tempo de retenção (TR) para o café “úmido” apresentou uma variância maior que a encontrada para o café seco. Os TR’s médios praticamente coincidiram, entretanto os resultados encontrados foram bem menores que o estimado pela eq. 5.2, que deveria ser 136 min contra a média dos dois TR’s, 79 minutos. Ficou claro então que o modelo usado para a estimativa do TR não representou satisfatoriamente o sistema. Um parâmetro não representado no modelo, a vazão de ar, que por ter sido passado co-corrente diminui o TR, pode explicar esta não coincidência de valores.

Tabela 5 - Parâmetros das curvas da figura 14

Umidade (%)	Área	Centro	Largura
12,2	666,8	79,8	30,7
26,3	1134,5	78,9	45,4

5.3 - “Prova da xícara”

Os resultados da “prova da xícara” realizada na Bolsa de Cereais de São Paulo se encontram na tabela 6. A nota varia de 1 (pior) a 5 (melhor) e a classificação geral da bebida segue a escala citada no item 4.4.1

Uma limitação encontrada para a realização do trabalho foi a distância entre as dependências do Laboratório de Microondas e a fazenda fornecedora da matéria-prima (500 km), o que impossibilitou o tratamento do café logo após a colheita, considerado o procedimento normal para se evitar fermentações. O que ocorreu foi que muitas vezes o café já se encontrava em processo de fermentação, constatado pela temperatura elevada dos grãos e forte odor característico, antes do início do tratamento.

Sendo assim, os resultados da degustação podem ter sido afetados, já que não há um meio de se separar o paladar devido a fermentações da nota total dada às amostras. O que se pode perceber é que, mesmo com essa limitação, os resultados referentes à ambos os ciclos de secagem foram compatíveis. Um resultado inesperado, por exemplo, foi o grau obtido pelo experimento 4 que, mesmo tendo sido seco a uma alta temperatura, apresentou uma nota superior ao experimento 2, provavelmente alterado pela ação de microorganismos.

Algumas amostras analisadas em duplicata na “prova da xícara” resultaram em classificações discrepantes como classificações de bebidas apenas mole e dura (notas 3,0 e 2,5) para o mesmo tratamento até bebidas mole e dura (notas 4,0 e 2,5) na mesma amostra, confirmando a subjetividade do teste.

Tabela 6 - Resultados da “prova da xícara”

Experimento	Nota	Bebida
1	4,0	Apenas mole
2	2,5	Apenas mole
3	4,0	Apenas mole
4	4,0	Mole
5.1	4,0	Mole
5.2	2,5	Dura
5.3	3,0	Apenas mole
5.4	3,0	Dura
6.1	3,5	Apenas mole
6.2	3,5	Apenas mole
6.3	3,5	Apenas mole
6.4	3,5	Apenas mole
7.1	3,0	Apenas mole
7.2	2,5	Apenas mole
7.3	2,5	Apenas mole
7.4	3,0	Apenas mole
7.5	2,0	Apenas mole
7.6	2,5	Apenas mole
8.1	2,0	Apenas mole
8.2	1,0	Rio

5.4 - Microscopia eletrônica de varredura

Dentre os diferentes tratamentos executados, alguns produtos secos foram selecionados para serem submetidos à análise por microscopia eletrônica de varredura. Estes foram provenientes dos experimentos 1, 2, 4, 5.2, 5.3, 6.1, 6.4, 7.1, 7.3, 7.4, 8.1, 8.2.

Foi reportado por DENTAN (1985) não ser possível encontrar maiores diferenças entre *Coffea canephora* var. *Robusta* e o *Coffea arabica* var. *Catuai*. No presente estudo não foi possível determinar diferenças entre as variedades estudadas, presumindo-se que não há diferenças a nível microscópico entre estas variedades.

A forma específica do grão de café pode ser reconhecida por ser “dobrado sobre si mesmo”, mostrada na figura 15. Na periferia do grão existe uma única camada de células epidérmicas pavimentosas, sendo a maior parte do grão formado de células de armazenagem parenquimatosas. As células perto da epiderme são mais alongadas que as células centrais. No meio da seção pode-se distinguir uma camada de material mucilaginoso de espessura variável, chamado de mucilagem central, no qual fica embebido o embrião.

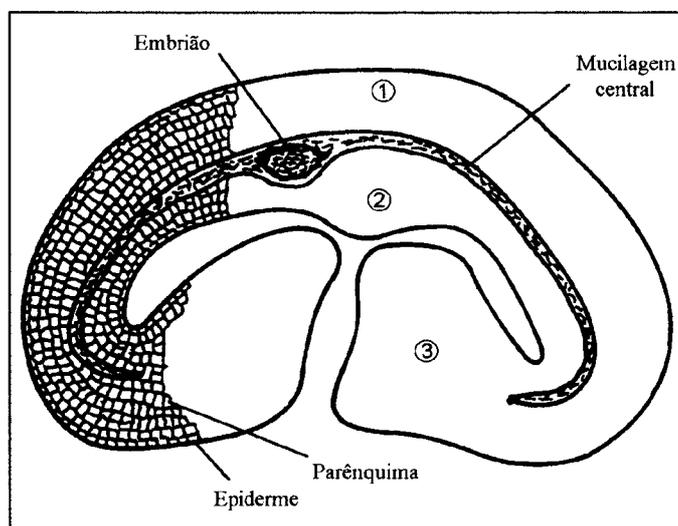


Figura 15 - Seção transversal do grão de café (DENTAN, 1985)

Após o preparo descrito no item 3.4.2 as amostras foram fotografadas e os parâmetros analisados foram o nível de integridade da membrana citoplasmática, e pelo aspecto da

superfície externa do grão, para medir a agressividade dos diferentes tratamentos. As análises na seção transversal foram feitas em três diferentes regiões do grão, mostradas na figura 15 (regiões 1, 2 e 3).

De um modo, geral pode-se dizer que após sofrer um processo de secagem convencional, o conteúdo celular dos grãos adquiriu um aspecto mais compactado, enquanto que os grãos que sofreram a secagem combinada (convencional + microondas) apresentaram o conteúdo celular retraído pela secagem, com um aspecto mais poroso.

Tabela 7 - Resultados da análise por microscopia eletrônica de varredura

Amostra	Integridade da membrana citoplasmática (%)			Número de fissuras na superfície externa
	região1	região2	região3	
1	100	100	100	4
2	100	100	100	21
4	84	88	100	4
5.2	67	0	33	48
5.3	94	80	100	16
6.1	93	100	55	8
6.4	50	50	31	41
7.1	100	100	100	4
7.3	35	8	71	7
7.4	49	38	96	23
8.1	40	21	31	15
8.2	17	25	25	25

O índice de integridade da membrana citoplasmática (MC) foi computado pela razão entre o número de células com a membrana íntegra e o número de células total visualizado numa fotografia com aumento de 500 vezes. Os tratamentos convencionais 1 e 2 apresentaram

100% de integridade da MC nas três regiões estudadas, entretanto o tratamento 4 resultou em uma destruição parcial da MC nas regiões 1 (84% de integridade) e 2 (88% de integridade).

Nos tratamentos com microondas, de um modo geral a região mais afetada foi a região central (2), levando à conclusão que, provavelmente pela geometria do grão, o acoplamento de energia foi maior nesta região. Ficou claro pela análise feita que elevadas potências associadas à tempos de retenção mais longos levam à um índice de destruição maior da MC, sendo que os tratamentos que conseguiram uma preservação maior nas três regiões foram o 7.1 (100%), seguido pelo 5.3 (91%) e o 6.1(83%), enquanto que os tratamentos que mostraram os menores índices de preservação da MC foram o 8.2 (22%), 8.1 (31%) e 5.2 (33%) (médias dos valores nas 3 regiões).

O número de fissuras foi contado nas micrografias com aumento de 500 vezes da superfície externa. A análise dos resultados mostrou uma pequena relação entre o número de fissuras contado e o tratamento, uma vez que o experimento 2 (secado convencionalmente à temperatura de 40°C) apresentou um número de fissuras 5 vezes maior que o tratamento 4 (secado convencionalmente à 57°C) na região estudada. Para os tratamentos a microondas, observou-se que o teste 5.2, que alcançou a maior temperatura final do grão, apresentou o maior número de fissuras enquanto que o teste 7.1, que resultou em menor temperatura final do grão, apresentou o menor número de fissuras. Isso leva à conclusão que a microscopia eletrônica de varredura pode ser um bom método de análise da agressividade do tratamento e do efeito posterior na qualidade da bebida; é preciso ter uma amostragem mais significativa de grãos de cada tratamento.

Algumas fotos obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura podem ser vistas no Apêndice D, a fim de que sejam visualizados os parâmetros analisados. As figuras 20, 21, 22 e 23 ilustram exemplos de preservação da membrana citoplasmática para um tratamento convencional (figuras 20 e 21) e convencional + microondas (figuras 22 e 23). Nas figuras 24 e 25 observa-se um baixo nível de integridade da membrana citoplasmática. As figuras 26, 27, 28 e 29 mostram a superfície externa dos grãos de uma amostra com poucas fissuras (figuras 26 e 27) e de uma amostra com muitas fissuras (28 e 29). O aspecto “encerado” característico das células epidérmicas pode ser observado nestas micrografias

5.5 - Aspectos econômicos

A potência teórica de microondas P_{teor} (W) necessária para secar a umidade final do café de 28 até 12 % b.u. pode ser calculada, para o experimento 8.1, pela equação 5.6 (METAXAS & MEREDITH, 1988):

$$P_{\text{teor}} = \frac{M_{\text{ad}}}{3600} \left[C_p \Delta T + \frac{M_e}{M_{\text{ad}}} (\Delta T + L_h) \right] \quad (\text{W}) \quad (5.6)$$

onde: M_e = quantidade de umidade evaporada: $2,7 * \frac{0,28 - 0,12}{1 - 0,12} = 0,4909 \text{ kg/h}^1$, onde 2,7 é

a vazão de alimentação com o produto a 28 % b.u. e 12 % b.u. é a umidade de saída.

$$M_{\text{ad}} = \text{vazão mássica de massa seca} = 2,7 * \left(1 - \frac{0,28 - 0}{1 - 0} \right) = 1,9440 \text{ kg/h}$$

$$\frac{M}{M_{\text{ad}}} = \text{teor fracionário de umidade base seca} = 0,2525$$

$$C_p = \text{calor específico da massa seca} : 840 \text{ J/kg}^\circ\text{C}^2$$

$$\Delta T = \text{variação da temperatura entre entrada e saída} : 48,5 - 25 = 23,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$L_h = \text{calor latente de evaporação à temperatura do ar (40}^\circ\text{C)} : 2.407.000 \text{ J/kg (EARLE, 1983)}$$

Substituindo os valores numéricos encontra-se:

$$P_{\text{teor}} = 338,9 \text{ W}$$

A vazão mássica de saída do café seco a 12 % b.u. é:

$$2,7 * \frac{1 - 0,28}{1 - 0,12} = 2,21 \text{ kg/h}$$

A densidade de potência aplicada em relação ao café seco fica:

$$d_p = \frac{338,2}{2,21} = 153 \text{ Wh/kg}$$

¹ Relações entre os teores de umidade podem ser vistos no Apêndice E

² C_p de alimentos (EARLE, 1983): $4,19 \left(\frac{p}{100} \right) + 0,84 \left(\frac{100 - p}{100} \right)$ (kJ/kg $^\circ$ C) onde $p = \% \text{ H}_2\text{O}$

Considerando que o acoplamento médio de energia de microondas absorvida foi de 90% (10% de reflexão), tem-se a potência teórica aplicada (P_a):

$$P_a = \frac{d_p}{0,9} = 170 \text{ Wh/kg}$$

Admitindo um custo médio da energia elétrica para consumo industrial de R\$ 0,30/kWh, o custo operacional devido ao consumo de energia elétrica será:

$$\frac{0,170}{0,55} * 0,30 = \text{R\$ } 0,0927/\text{kg de café seco}$$

Obs.: O fator 0,55 foi aplicado tendo em conta as informações do fabricante da unidade geradora de microondas Cober modelo S6F (COBER ELECTRONICS INC., 1986) que fornece o valor de 55% para a razão de transformação da potência elétrica da rede em potência de microondas.

Se o objetivo primário deste processo em particular é o de ampliar a capacidade da secagem mecânica industrial do café cereja descascado, isto pode ser alcançado através da instalação de um aplicador de microondas no final de uma linha de secagem já existente, que poderá funcionar com uma “velocidade maior”. Este é um dos critérios propostos por METAXAS & MEREDITH (1988) para uma avaliação econômica que foi denominada de capacidade ampliada. O secador a ar quente convencional da figura 16, admitindo-se que esteja operando na sua capacidade nominal, não pode absorver a produção ampliada, a menos que se processe o produto até uma umidade final maior que 12%, que deliberadamente se impõe que corresponda ao valor de 30% b.u.

A unidade a microondas terá então que evaporar a diferença de umidade até 12% b.u. O acréscimo de produção devido à inclusão das microondas deverá portanto pagar pelos custos dos novos investimentos, pelos custos operacionais e qualquer taxa de juros que incida sobre o capital emprestado.

Primeiramente devem ser estimados os lucros anuais. Tome-se como exemplo os dados operacionais e a capacidade de um secador convencional industrial do tipo Guardiola (SIVETZ & DESROSIER, 1979), cujas informações estão reproduzidas e ampliadas para a pré-secagem na tabela 8.

Tabela 8 - Desempenho de um secador Guardiola na pré-secagem e secagem convencional

	Pré-secagem	Secagem
Cereja descascado (52 %b.u.) carregado	4.150 kg	4.150 kg
Cereja descascado pré-seco (30 %b.u.) descarregado	3.308 kg	
Cereja descascado seco (12,18 %b.u.) descarregado		2.284 kg
Água evaporada na pré-secagem	842 kg	
Água evaporada na secagem		1.866 kg
Tempo de pré-secagem ¹	9h	
Tempo de secagem		33,5h
Temperatura do ar média de pré-secagem	45°C	
Temperatura do ar média de secagem		61°C
Óleo combustível utilizado na pré-secagem ²	116,1 l	
Óleo combustível utilizado na secagem		257,4 l
Água evaporada por litro de óleo combustível	7,25 kg/l	7,25 kg/l
Demandas teóricas de calor:		
(a) para aquecer 4.150 kg de 21,1 a 54,4°C ($\Delta T = 33,3^\circ\text{C}$) com $C_p = 2,5325 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$	350.000 kJ	350.000 kJ
(b) para pré-evaporar 842kg de água a 2.395 kJ/kg	2.016.590 kJ	
(c) para evaporar 1.866kg de água a 2.379 kJ/kg		4.439.214 kJ
Eficiência calorífica na pré-secagem = $\frac{2.366.590}{116,1 \cdot 39.022,28} \cdot 100$	52,2%	
Eficiência calorífica na secagem = $\frac{4.789.214}{257,4 \cdot 39.022,28} \cdot 100$		47,7%
Capacidades do secador na pré-secagem	367,6 kg/h	
Capacidades do secador na secagem		68,2 kg/h

¹ Tempo de pré-secagem estimado com base na curva de secagem da figura 11(b)

² Capacidade calorífica do combustível: 39.022,28 kJ/l

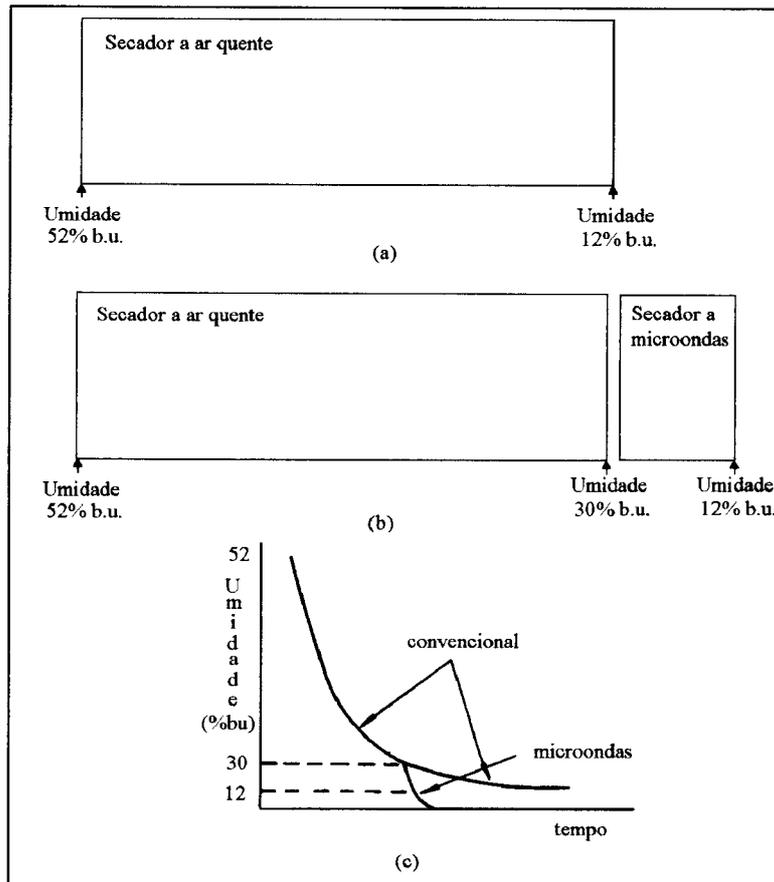


Figura 16 - Capacidade ampliada com energia de microondas: (a) processo convencional; (b) processo combinado (c) curvas de secagem (METAXAS & MEREDITH, 1988)

Percebe-se pela tabela 8 que a capacidade produtiva do sistema com pré-secagem pelo processo convencional e secagem final assistida a microondas foi ampliada da seguinte forma:

Capacidade de material pré-seco (a 30% b.u.):

$$367,6 \text{ kg/h}$$

Capacidade equivalente de material seco (a 12,18% b.u.):

$$= 367,6 * \frac{1 - 0,3}{1 - 0,1218} = 293,0 \text{ kg/h}$$

Portanto, uma unidade industrial a microondas alimentada por 367,6 kg/h de produto pré-seco a 30% b.u. deverá ter capacidade de secagem para produzir um total final de 293,0 kg/h de produto seco a 12,18% b.u., ou seja, permitindo a ampliação de $293,0/68,2 \cong 4,3$ vezes (430%) em relação ao processo de secagem convencional

Para isso, será necessário investir em um conjunto gerador/aplicador de microondas em escala industrial, cuja potência estimada será de:

$$293,0 \text{ kg/h} * 0,170 \text{ kWh/kg} \cong 50 \text{ kW}$$

Assumindo uma eficiência de 0,55, obtem-se uma potência consumida na rede elétrica de aproximadamente 91 kW. Tendo em conta mais 10 kW de motores, tem-se um total de 101 kW. Calculando-se uma base anual de 3000 horas de operação a um custo de R\$ 0,30 /kWh, o custo operacional vai ser R\$ 90.900,00. O custo total para o investimento em um sistema industrial gerador + aplicador instalado, pode ser estimado, com base em índices fornecidos por DECAREAU (1985) e PETERS & TIMMERHAUS (1991) em R\$ 271.000,00 (Apêndice F). A taxa de juros anuais avaliada em 12 % produziria o valor de R\$ 32.520,00. O lucro auferido pelo acréscimo de 224,8 kg/h vendendo-se o café a R\$ 140,00/saca de 60 kg (ABIC, 1996) é estimado em 12 % da receita diferencial (R\$ 1.573.600,00) ou seja, R\$ 188.832,00. Equacionando as receitas e despesas (METAXAS & MEREDITH, 1988) , chega-se a:

$$271.000 + 32.520 * y + 90.900 * y = 188.832 * y$$

$$y = 4,14 \cong 4 \text{ anos}$$

Portanto 4 anos é o tempo que se leva para pagar o investimento em um sistema industrial para secagem final assistida a microondas para os valores do exemplo.

Observações:

1. A estimativa econômica foi baseada em um valor teórico de potência de microondas, calculado conforme roteiro aplicado por METAXAS & MEREDITH (1988), em virtude deste valor se encontrar mais próximo de grandezas otimizadas de escala industrial. Os valores medidos experimentalmente na unidade piloto do Laboratório de Microondas não refletem as condições encontradas na prática industrial, sendo a eficiência operacional desta unidade menor, em virtude desta ter sido projetada para atender faixas amplas de parâmetros e processar diversos produtos do tipo granular, sem que seu projeto fosse otimizado para algum produto específico.
2. Vale acrescentar que na escala industrial de consumo correspondente à unidades geradoras de microondas de potência acima de 6 kW somente existem disponíveis geradores na frequência de 915 MHz, nas potências de “magnetron” de 5, 30, 50, 60 e 75 kW. Apesar

dos guias de onda e acessórios para equipamentos que operam a esta frequência apresentarem um custo maior que para 2.450 MHz, devido às suas dimensões maiores, o custo de kW instalado, notadamente para os geradores de maior potência, é inferior aos R\$ 2.000,00/kW (aplicável para os geradores de 2.450 MHz, Apêndice F), barateando desta forma as estimativas de custo, como aqui foram calculadas.

6 - CONCLUSÕES

Foi demonstrado que é possível diminuir o tempo de secagem e se obter um produto de qualidade mediante a utilização da energia de microondas. Os resultados apresentados neste trabalho indicam que a energia de microondas pode apresentar muitas vantagens se utilizada em conjunto com tecnologias de aquecimento aplicadas a secadores convencionais de grãos. A aplicação da energia de microondas acelera os processos convencionais de secagem, também agindo como um complemento ao aquecimento convencional, de maneira a reduzir substancialmente o tempo de secagem, com um bom controle dos parâmetros do processo, gerando uma melhoria na qualidade.

De acordo com os resultados obtidos conclui-se que:

- a secagem efetuada no secador convencional em escala piloto com uma temperatura média da massa de 50°C (experimento 4) não ocasionou danos à qualidade da bebida, como acontece em escala industrial.
- a temperatura dos grãos no estágio final da secagem (efetuada no secador assistido a microondas) ultrapassou o limite de temperatura da pré-secagem convencional, mas o tempo breve de exposição não acarretou danos à qualidade do café.
- a umidade final e a temperatura alcançada pelo grão variam linearmente com a densidade de potência aplicada, para umidade de entrada e tempo de retenção fixos, dentro da faixa de potência estudada.
- a distância entre a fazenda fornecedora de matéria-prima e o Laboratório de Microondas não permitiu que o produto fosse processado logo após a colheita, ocasionando fermentações que mascararam os resultados da análise sensorial.
- a subjetividade da “prova da xícara” foi confirmada com resultados discrepantes de amostras iguais, provenientes do mesmo tratamento.
- a microscopia eletrônica de varredura pode ser usada como um método de análise da agressividade do tratamento e do posterior efeito na qualidade da bebida, mas é preciso ter uma amostra significativa de grãos de um determinado tratamento.

- com relação aos custos, mostrou-se que a implantação de um sistema para a secagem final assistida a microondas é economicamente viável, sendo que para a capacidade de produção dada como exemplo de 293 kg de café seco/h, o custo do investimento em um conjunto gerador/aplicador é pago em aproximadamente 4 anos.

7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é de grande importância que a fazenda fornecedora de matéria-prima se encontre a uma distância suficientemente próxima da Faculdade de Engenharia de Alimentos/Unicamp que permita que o café seja processado poucas horas após a colheita, de modo a evitar fermentações que mascarem os resultados da análise sensorial da bebida.

Para o controle mais preciso da segunda etapa da secagem (no secador a microondas), é preciso testar outros modelos para a predição do tempo de retenção de modo a se caracterizar satisfatoriamente o secador cilíndrico rotativo a ar quente assistido a microondas.

Seria interessante realizar o mesmo tipo de experimento utilizando as frações de café descartadas no presente trabalho, bóia e verde, e testar o comportamento destas sob as mesmas condições de secagem, uma vez que, mesmo que a colheita seja realizada com muito cuidado, é impossível colher apenas café cereja.

Seria também muito interessante estudar a secagem do café em uma frequência de 915 MHz, uma vez que esta frequência seria usada em um “scale-up” para escala industrial. A medição do dielétrico do café nas potências de 915 e 2.450 MHz poderiam dar uma idéia da potência absorvida pelo mesmo nas duas frequências.

Propõe-se que sejam estudados a variação da umidade final e da temperatura alcançada pelo grão, assim como o efeito sobre a qualidade da bebida, em secagens com aplicação de densidade de potência abaixo de 100 e acima de 300 Wh/kg.

Com relação às análises, propõe-se o uso de métodos mais precisos e mais rápidos para a determinação da umidade dos grãos, como um equipamento existente dotado de um forno de microondas com balança analítica integrada, do tipo microprocessado. Tal equipamento é capaz de fornecer o resultado de uma análise de umidade de grãos em menos de 5 minutos, o que seria mais compatível com a velocidade de atuação das microondas nos processos de secagem assistidos. Sugere-se ainda que seja realizada a análise por cromatografia gasosa para se caracterizar alguns compostos mais importantes para o aroma do café, após os diferentes tratamentos, fazendo-se a comparação com os resultados da análise sensorial (“prova da xícara”).

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ABIC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ. Jornal do Café, v. 5, n. 57, 24p., mai, 1996.
- 2 - ANÔNIMO. Economic indicators. Chemical Engineering, v. 103, n. 6, p.180, june, 1996.
- 3 - BRAHAM, J. E.; BRESSANI, R. Coffee Pulp: composition, technology, and utilization. 1.ed. Ottawa: International Development Research Centre, 1979. 95p.
- 4 - BRANDO, C. H. J. Introdução do café cereja descascado nas regiões cafeeiras do Brasil Publicação Pinhalense S.A. - Máquinas Agrícolas, E. S. Pinhal - São Paulo. 1993. 7p.
- 5 - BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying Cereal Grains. 1. ed. Connecticut: AVI Publishing Company, 1974. 265p.
- 6 - CAMPAÑA, L. E.; SEMPÉ, M. E.; FILGUEIRA, R. R. Physical, chemical, and baking properties of wheat dried with microwave energy. Cereal Chemistry, v. 70, n. 6, p. 760-762, Nov./Dec. 1993.
- 7 - CHAGAS, S. J. R. Caracterização química e qualitativa de cafés de alguns municípios de três regiões produtoras de Minas Gerais. Lavras, 1994. 83p. Tese (Mestre em Ciência de Alimentos) - Escola Superior de Agricultura de Lavras.
- 8 - COBER ELETRONICS INC.: Cober Model S6F - Industrial Microwave Generator Technical Manual, 1986.
- 9 - DĂSCĂLESCU, A. Le séchage et ses applications industrielles. 2. ed. Paris: Dunod, 1969. 536p.

- 10 - DECAREAU, R. V. Microwaves in the Food Processing Industry. 1.ed. London: Academic Press, 1985. 234p.
- 11 - DECAREAU, R. V.; PETERSON, R. A. Microwave Processing and Engineering. 1.ed. Chichester: Ellis Horwood, 1986. 224p.
- 12 - DENTAN, E. The Microscopic Structure of the Coffee Bean. In: CLIFFORD, M. N.; WILLSON, K. C. Coffee: botany, and production of beans and beverage. 1. ed. Connecticut: AVI, 1985. cap.12, p. 284-304.
- 13 - EARLE, R. L. Unit Operations in Food Processing. 2. ed. Manchester: Pergamon Press, 1983. 207p.
- 14 - FREGNI, L. E.; LEONHARDT, G. F. Secagem de soja em secador a microondas: resultados preliminares. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 2, n. 2, p. 151-163, jul./dez., 1982.
- 15 - GARRUTI, R. S.; CONAGIN, A. Escala de valores para avaliação da qualidade de bebida de café. Bragantia, v. 20, p. 557-562, 1961. Apud: Caracterização química e qualitativa de cafés de alguns municípios de três regiões produtoras de Minas Gerais. Lavras, 1994. 83p. Tese (Mestre em Ciência de Alimentos) - Escola Superior de Agricultura de Lavras.
- 16 - GONDÁR, J. Dielektrisches rösten von kakao-und kaffeebohnen. Fette-Seifen-Anstrichmittel, v. 66, n. 12, p. 1032-1040, 1964.
- 17 - GUNASEKARAN, S. Grain drying using continuous and pulsed microwave energy. Drying Technology, v. 8, n. 5, p. 1039-1047, Dec., 1990.
- 18 - HENDERSON, S. M.; PERRY, R. L. Agricultural Process Engineering. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1955. 402p.

- 19 - HUTT, W.; MEIERING, A.; OELSCHLAGER, W.; WINKLER, E. Grain contamination in drying with direct heating. Canadian Agricultural Engineering, v. 20, n. 2, p. 103-107, Dec., 1978.
- 20 - JONES, P. L. High frequency dielectric heating in paper making. Drying Technology, v. 4, n. 2, p. 217-244, May, 1986.
- 21 - JORDÃO, B. A.; OKADA, M.; PULZ, F. S.; MORI, E. E. M. Secagem do café no secador "Vitória": modificações do protótipo e avaliação posterior do café processado. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos - ITAL, v.17, n.2, p.189-204, abr./jun., 1980.
- 22 - KARNOVSKY, M. J. A formaldehyde glutaraldehyde fixative of high osmolarity for use in electron microscopy. Journal of Cell Biology, v. 27, p. 137A-138A, 1965. Apud: Food Structure, v. 9, n. 2, p. 109-112, 1990.
- 23 - LOPES FILHO, J. F.; CUNHA, R. M.; RAMOS, A. M.; JORGE, J. T. Curvas de secagem e estudo da massa específica e porosidade do café. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 10, n. 1, p. 43-56, jan., 1990.
- 24 - MARSAIOLI Jr., A. Desenvolvimento da tecnologia de aplicação de microondas em secador cilíndrico-rotativo combinado com ar quente para produtos granulados. Campinas, 1991. 197p. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- 25 - MATIELLO, J. B. O Café: do cultivo ao consumo. 1. ed. São Paulo: Globo, 1991. 320p.
- 26 - MAURER, R. L.; TREMBLAY, M. R.; CHADWICK, E. A. Microwave processing of pasta - improves product, reduces cost and production time. Food Technology, v. 25, n. 12, p. 1244-1249, Dec., 1971.

- 27 - METAXAS, A. C.; MEREDITH, R. J. Industrial Microwave Heating. 2. ed. London: Peter Peregrinus, 1988. 357p.
- 28 - M.E.S. - MICRO-ONDES ÉNERGIE SYSTÈME. Industries Alimentaires et Agricoles, n. 10, p. 794-797, oct., 1992.
- 29 - MISKELL, F.; MARSHALL Jr., W. R. A study of retention time in a rotary dryer. Chemical Engineering Progress, v. 52. n. 1, p.35-38, Jan., 1956.
- 30 - MUDGETT, R. E. Microwave properties and heating characteristics of foods. Food Technology, v. 40, n. 6, p.84-93, June,1986.
- 31 - MUDGETT, R. E. Microwave food processing. Food Technology, v. 43, n. 1, p.117-126, Jan.,1989.
- 32 - NELSON, S. O. Potential agricultural applications for RF and microwave energy. Transactions of the ASAE, v. 30, n. 3, p. 818-822, May/June, 1987.
- 33 - OWUSU-ANSAH, Y. J. Advances in microwave drying of foods and food ingredients. Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, v. 24, n. 3/4, p. 102-107, July, 1991.
- 34 - PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 910p.
- 35 - PUZZI, D. Abastecimento e Armazenagem de Grãos. 1.ed. São Paulo: Instituto Campineiro do Ensino Agrícola, 1986. 603p.

- 36 - SCHIFFMANN, R. F. Microwave and Dielectric Drying. In: MUJUNDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. 1. ed. New York: Marcel Dekker, 1987. cap.10, p. 327-356.
- 37 - SENISE, J. T. A utilização de rádio frequência e microondas na eletrônica industrial. Revista Brasileira de Engenharia Química, v. 8, n. 1, p. 51-61, jul/set, 1985.
- 38 - SHIVHARE, U. S.; RAGHAVAN, G. S. V.; BOSISIO, R. G. Microwave drying of corn II. Constant power, continuous operation. Transactions of the ASAE, v. 35, n. 3, p. 951-957, May/June, 1992a.
- 39 - SHIVHARE, U. S.; RAGHAVAN, G. S. V.; BOSISIO, R. G.; MUJUNDAR, A. S. Microwave drying of corn III. Constant power, intermitent operation. Transactions of the ASAE, v. 35, n. 3, p. 959-962, May/June, 1992b.
- 40 - SIVETZ, M.; DESROSIER, N. W. Coffee Technology. 1. ed. Connecticut: AVI Publishing Company, 1979. 715p.
- 41 - SMITH, F. J. Microwave-hot air drying of pasta, onions, & bacon. Microwave Energy Applications Newsletter, v. 12, n. 6, p. 6-12, 1979.
- 42 - ST. JOHN, C.; OTTEN, L. Thin-layer microwave drying of peanuts. Canadian Agricultural Engineering, v. 31, n. 2, p. 265-270, July, 1989.
- 43 - STEELE, R. J. Microwaves in the food industry. CSIRO food Research Quaterly, v. 47, n. 4, p. 73-78, Dec., 1987.
- 44 - TANGO, J. S. Utilização industrial do café e dos seus subprodutos. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos - ITAL, n. 28, p. 49-71, dez., 1971.
- 45 - TOSELLO, A. Ensaio sobre a secagem dos produtos agrícolas. Bragantia, v. 6, n. 2, p. 39-107, fev., 1946.

- 46 - TULASIDAS, T. N.; RAGHAVAN, G. S. V.; NORRIS, E. R. Microwave and convective drying of grapes. Transactions of the ASAE, v. 36, n. 6, p. 1861-1865, Nov./Dec., 1993.
- 47 - VELUPILLAI, L.; VERMA, L. R.; WADSWORTH, J. I. Quality aspects of microwave-vacuum-dried parboiled rice. Transactions of the ASAE, v. 32, n. 5, p. 1759-1762, Sept./Oct., 1989.
- 48 - VIEIRA, G. Secagem intermitente de café (*Coffea arabica* L.) em secadores de fluxo cruzado e em secador experimental de camada fixa. Lavras, 1994. 91p. Tese (Mestre em Ciência de Alimentos) - Escola Superior de Agricultura de Lavras.
- 49 - VON HIPPEL, A. R. Dielectrics and waves. 2.ed. Massachusetts: MIT Press, 1995. 284p.
- 50 - WADSWORTH, J. I.; VELUPILLAI, L.; VERMA, L. R. Microwave-vacuum drying of parboiled rice. Transactions of the ASAE, v. 33, n. 1, p. 199-210, Jan./Feb., 1990.
- 51 - YOUNG, C. T.; SCHADEL, W. E. Transmission and scanning electron microscopy of peanut (*Arachis hypogaea* L. CV. FLORIGIANT) cotyledon after roasting. Food Structure, v. 9, n. 2, p. 109-112, 1990.

Apêndice A

Tabela 9 - Propriedades dielétricas de alguns sólidos e líquidos

Produto	T (°C)	Umidade % b.u.	915 MHz		2450 MHz	
			ϵ_r'	$\tan\delta$	ϵ_r'	$\tan\delta$
Porcelana	25		8,93	$9 \cdot 10^{-4}$	8,90	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Teflon	22		2,1	$1,4 \cdot 10^{-4}$	2,1	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Vidro	25		3,85	$6,0 \cdot 10^{-4}$	3,84	$6,8 \cdot 10^{-4}$
Polietileno	23		2,26	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,25	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Etanol					6,5	$25 \cdot 10^{-2}$
Metanol					24	$64 \cdot 10^{-2}$
Poliamida (Nylon)	25		3,06	$1,4 \cdot 10^{-2}$	3,02	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Tetracloroeto de carbono					2,17	$4 \cdot 10^{-4}$
Borracha natural	25		2,85	$2,4 \cdot 10^{-2}$	2,80	$1,8 \cdot 10^{-2}$
Neoprene	25				4,0	$3,4 \cdot 10^{-2}$
Água destilada	25		77,5	$1,5 \cdot 10^{-2}$	76,7	$15,7 \cdot 10^{-2}$
Gelo puro	-12				3,2	$9 \cdot 10^{-4}$

(MARSAIOLI, 1991)

Tabela 10 - Propriedades dielétricas de alguns alimentos

Produto	T (°C)	Umidade % b.u.	915 MHz		2450 MHz	
			ϵ_r'	$\tan\delta$	ϵ_r'	$\tan\delta$
Carne cozida	20	68			41,6	0,31
Carne crua	-20	74			4,6	0,11
Bife cru	-15		5,0	0,15		
Carne gorda	-10		2,4	0,1		
Óleo de milho	25				2,53	0,06
Óleo de soja	25		2,61	0,06	2,51	0,06
Manteiga	0	17			4,05	$9,6 \cdot 10^{-2}$
Batata branca crua	25	81	70,3	0,37	62,9	0,27
Espinafre fervido	23		34,0	0,80		
Trigo em grão	24	11	2,8	0,11		
Semente de alfafa	24	4,9			2,6	0,05
Leite em pó	30	3,3			2,29	$2,1 \cdot 10^{-2}$
Soro de leite em pó	30	4,8			2,04	$1,2 \cdot 10^{-2}$

(MARSAIOLI, 1991)

Apêndice B

Calibração da balança de Infravermelho marca OHAUS modelo MB-200 pelo método da estufa para determinação de umidade de café cereja descascado.

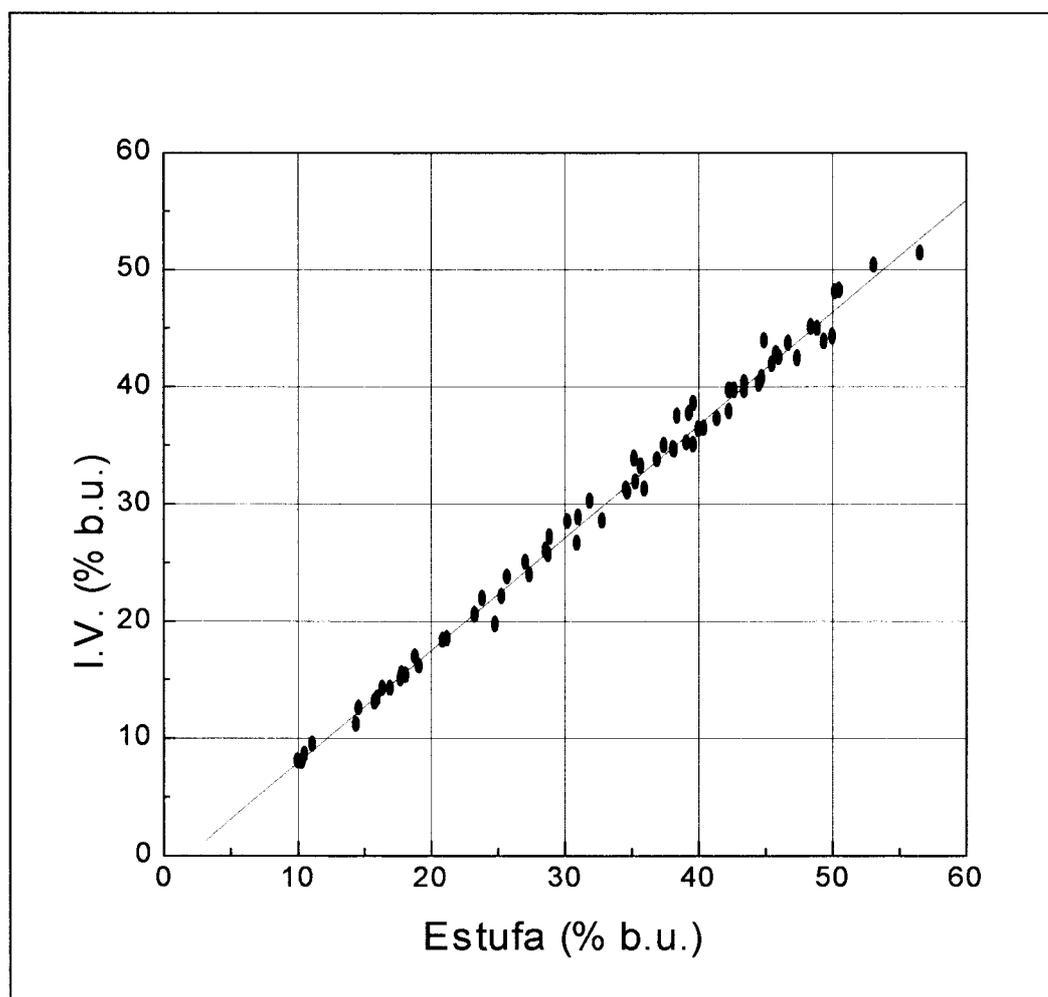


Figura 17 - Curva de calibração da balança de infravermelho pelo método da estufa

Ajuste linear: $Y = A + B \cdot X$

parâmetro	valor	sd
A	-1,69	0,3456
B	0,96	0,0098

Coefficiente de correlação: $R = 0,99645$

Desvio padrão: $SD = 1,00491$

Número de pontos: $N = 71$

Apêndice C

Tabela 11 - Classificação e características de resultados de degustação proposta por GARRUTI & CONAGIN (1961, citado por CHAGAS, 1994).

Classificação da bebida	Características organolépticas
Estritamente Mole	Bebida de sabor suavíssimo e adocicado
Mole	Bebida de sabor suave acentuado e adocicado
Apenas Mole	Bebida de sabor suave, porém com leve adstringência
Dura	Bebida com sabor adstringente e gosto áspero
Riada	Bebida com leve sabor de iodofórmio ou ácido fênico
Rio	Bebida com sabor forte e desagradável lembrando iodofórmio ou ácido fênico
Rio Zona	Bebida de sabor e odor intoleráveis ao paladar e ao olfato

Apêndice D

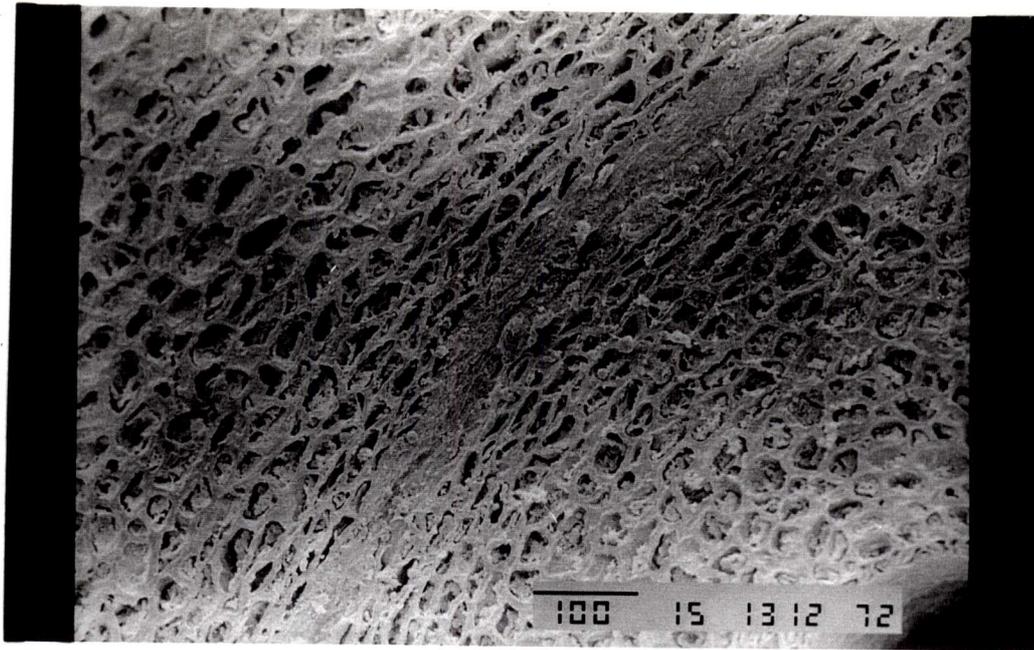


Figura 18 - Camada de mucilagem central - aumento :150x

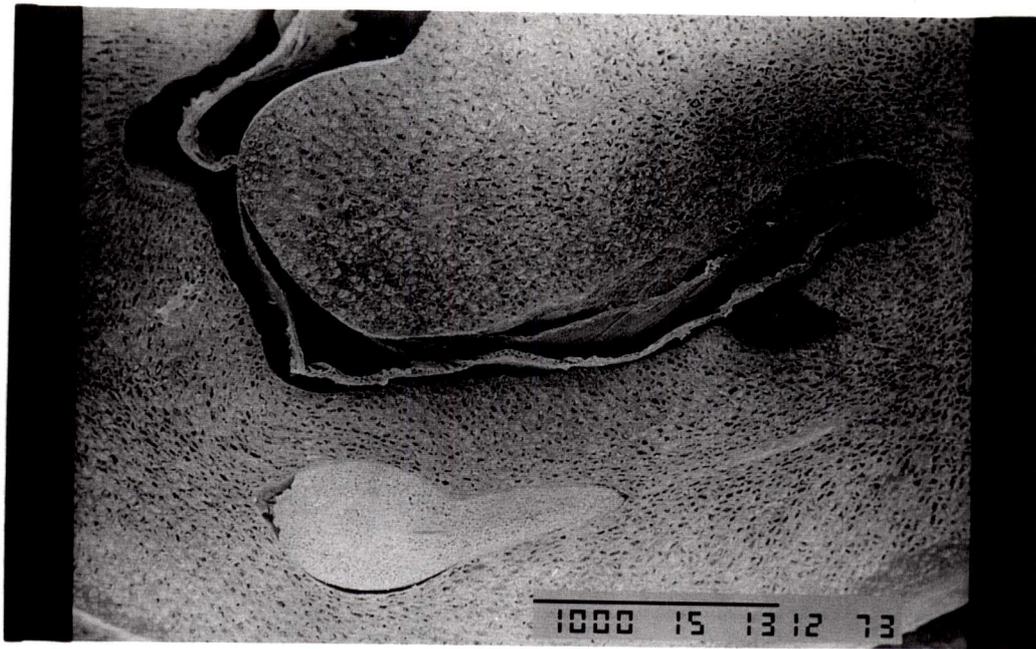


Figura 19 - Embrião - aumento :35x

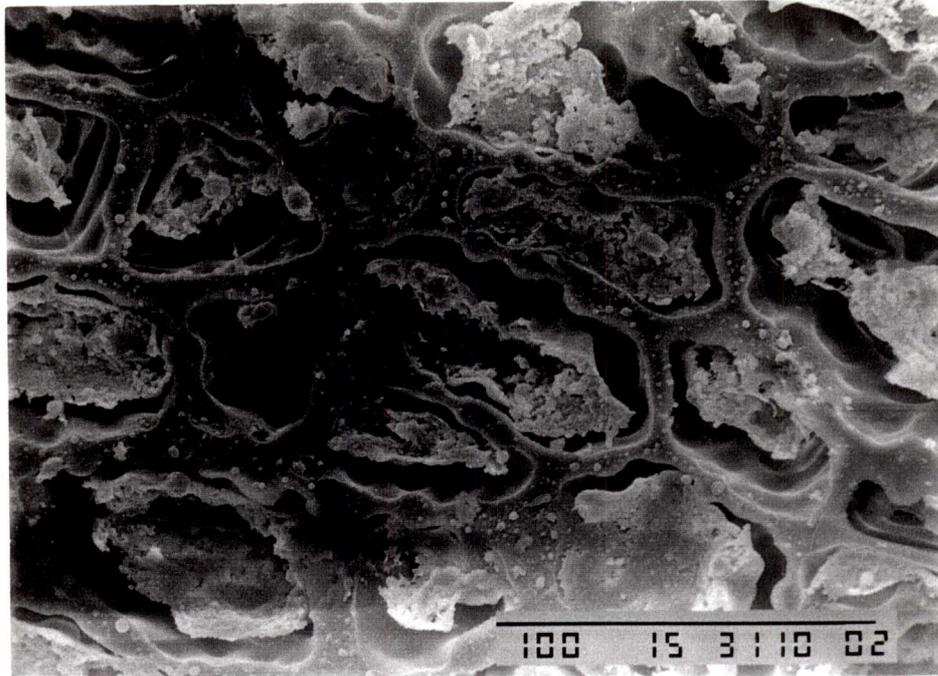


Figura 20 - Células do parênquima (região 1) - experimento 1 - aumento :500x

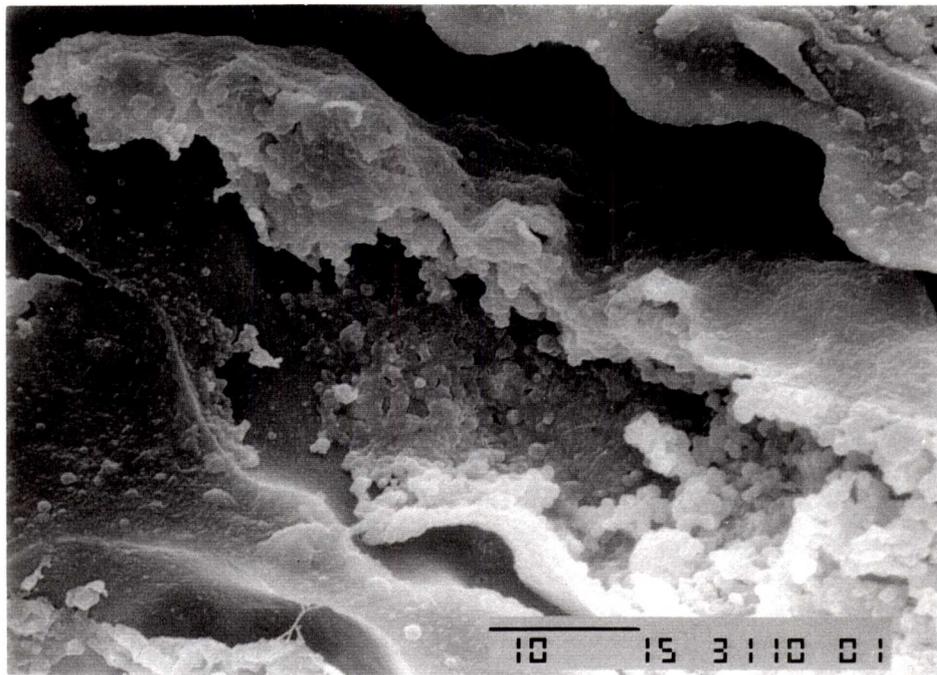


Figura 21 - Ampliação de célula da figura 20 - aumento :2000x

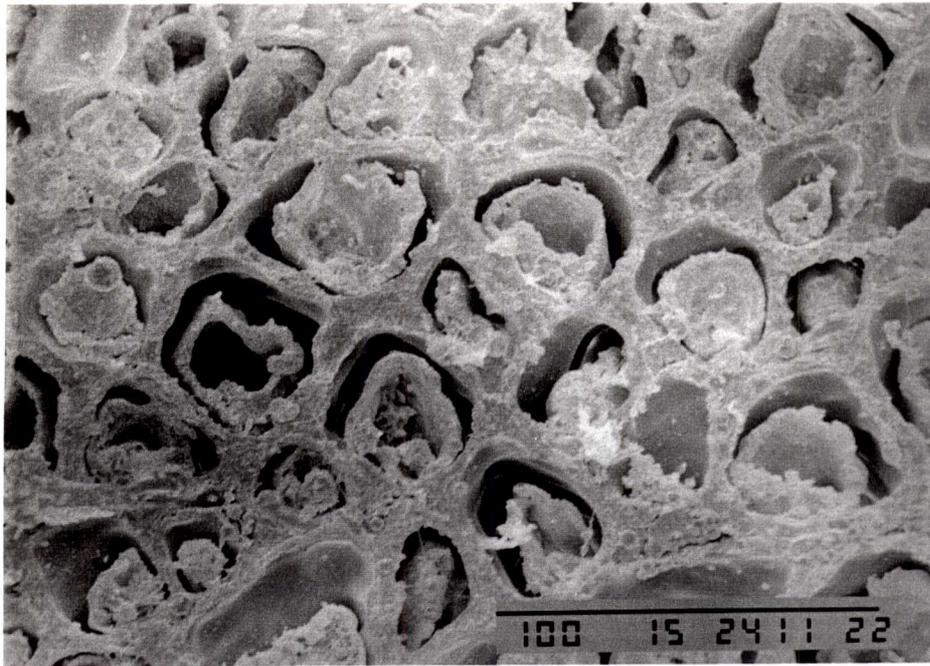


Figura 22 - Células do parênquima (região 1) teste 5.3 - aumento :500x

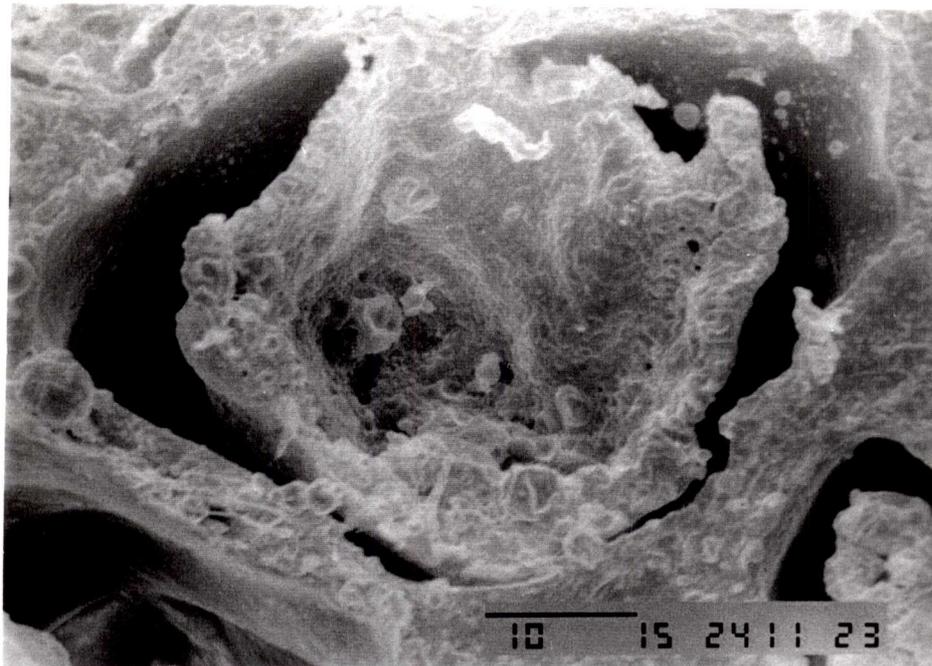


Figura 23 - Ampliação de célula da figura 22 - aumento :2000x

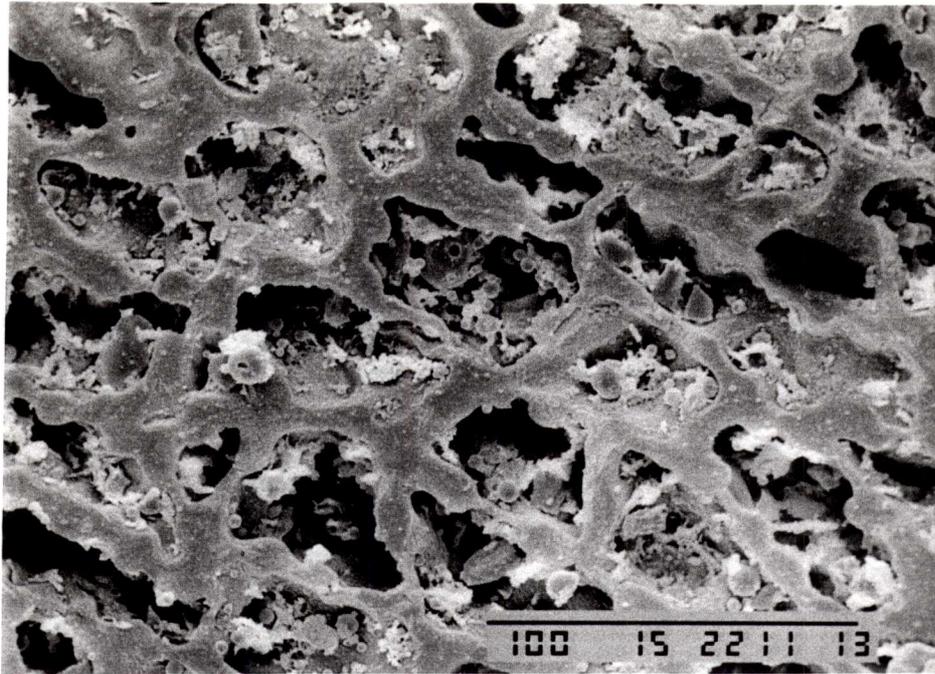


Figura 24 - Células do parênquima (região 3) teste 8.2 - aumento :500x

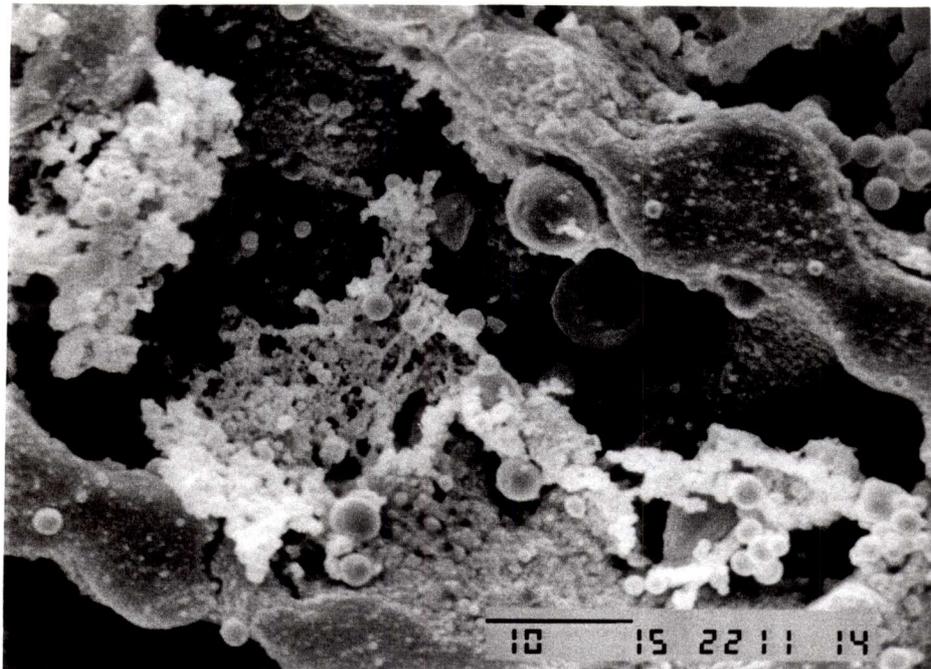


Figura 25 - Ampliação de célula da figura 24 - aumento :2000x

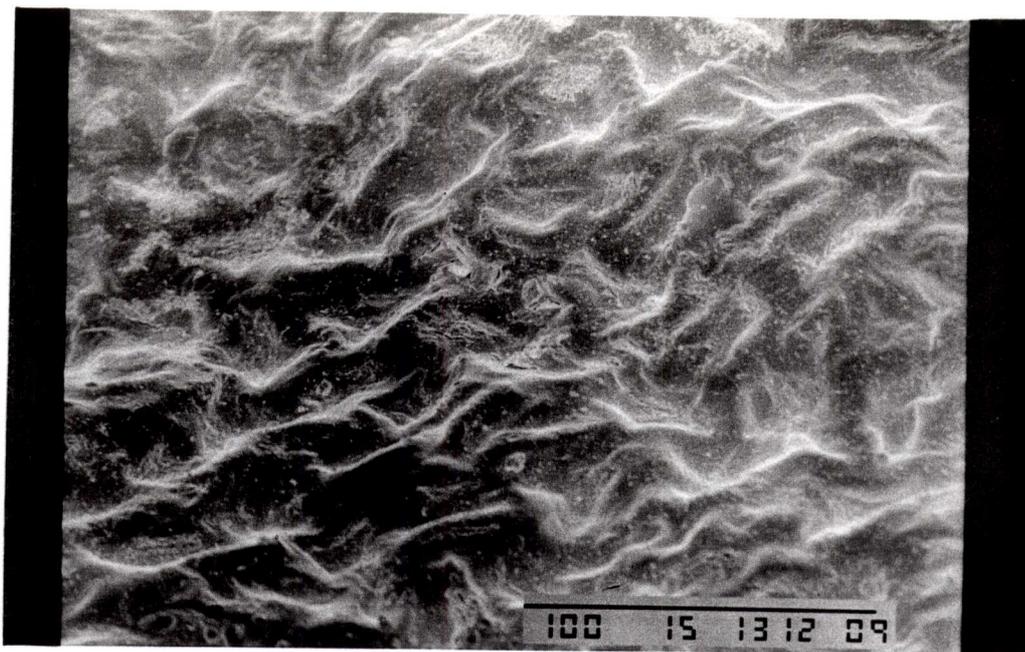


Figura 26 - Superfície externa - teste 6.1 - aumento :500x

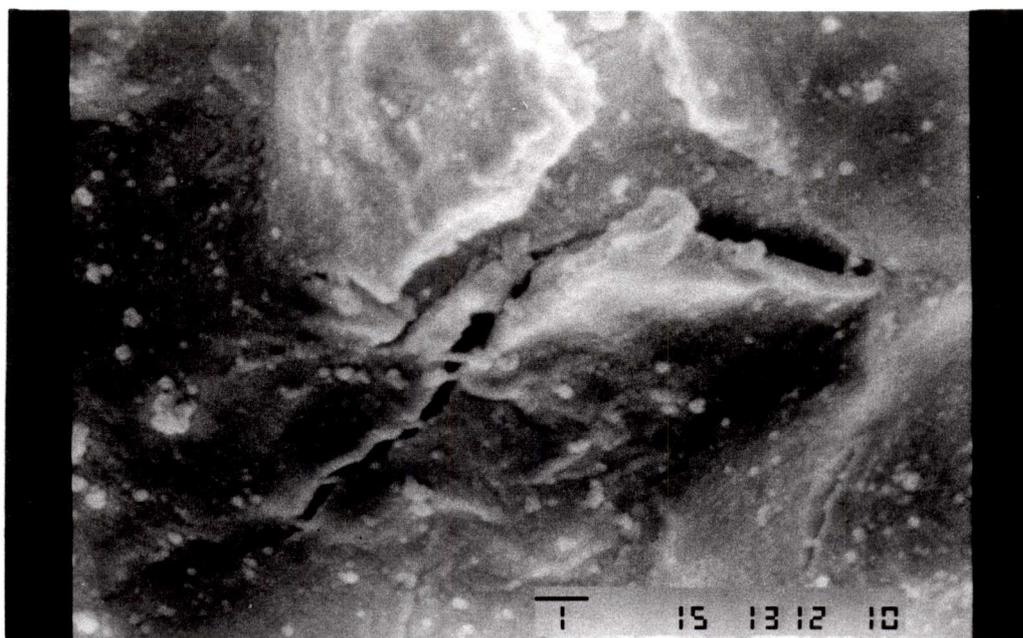


Figura 27 - Ampliação de célula da figura 26 - aumento :7500x



Figura 28 - Superfície externa - teste 5.2 - aumento :500x

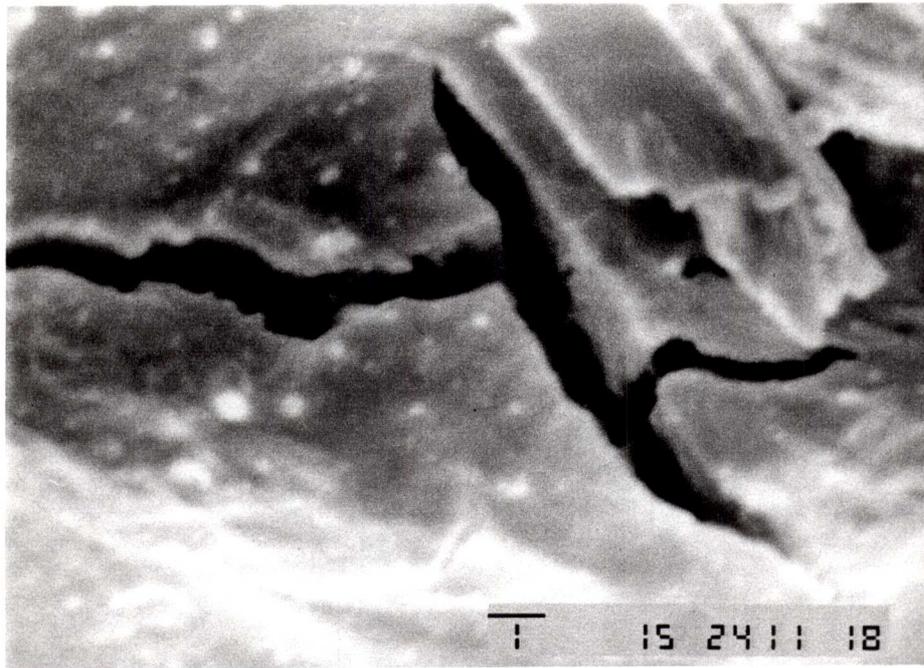


Figura 29 - Ampliação de célula da figura 28 - aumento :7500x

Apêndice E

Algumas relações entre os teores de umidade são dados por HENDERSON & PERRY (1955) em função da umidade em base seca e em base úmida.

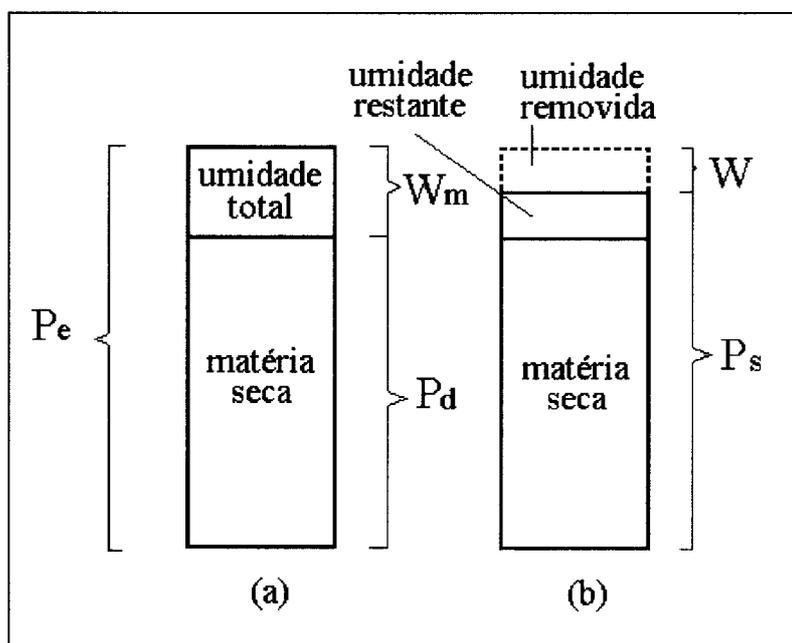


Figura 30 - Relações entre os teores de umidade: (a) antes da secagem,(b) após a secagem (HENDERSON & PERRY, 1955)

P_e = Peso do material úmido, kg

W_m = Peso da umidade total, kg

W = Peso da umidade evaporada, kg

P_s = Peso do material após a secagem, kg

P_d = Peso da matéria seca, kg

M = Teor de umidade decimal base seca

m = Teor de umidade decimal base úmida

$$M = \frac{W_m}{P_d} \quad (\text{kg/kg})$$

$$m = \frac{W_m}{W_m + P_d} \quad (\text{kg/kg})$$

$$M = 100 * \frac{W_m}{P_d} \quad (\%)$$

$$m = 100 * \frac{W_m}{W_m + P_d} \quad (\%)$$

$$M = \frac{m}{1 - m}$$

$$\frac{W}{P_e} = \frac{M_1 - M_2}{M_1 + 1}$$

$$\frac{W}{P_s} = \frac{M_1 - M_2}{M_2 + 1}$$

$$\frac{P_e}{P_s} = \frac{M_1 + 1}{M_2 + 1}$$

$$\frac{W}{P_d} = M_1 - M_2$$

$$m = \frac{M}{1 + M}$$

$$\frac{W}{P_e} = \frac{m_1 - m_2}{1 - m_2}$$

$$\frac{W}{P_s} = \frac{m_1 - m_2}{1 - m_1}$$

$$\frac{P_e}{P_s} = \frac{1 - m_2}{1 - m_1}$$

$$\frac{W}{P_d} = \frac{m_1 - m_2}{(1 - m_1)(1 - m_2)}$$

Apêndice F

O custo total para o investimento em um sistema industrial gerador + aplicador instalado, pode ser estimado, com base em índices fornecidos por PETERS & TIMMERHAUS (1991) para o aplicador e DECAREAU (1985) para o gerador, atualizados pelo índice M & S industrial (ANÔNIMO, 1996).

Aplicador:

Alimentação: 293 kg/h

Densidade média (20% b.u.): 0,405 kg/l

$$\rho = 0,4021 + 0,2114 * M_1 - 0,0596 * M_1^2 \quad \text{kg/l (LOPES FILHO et al., 1990)}$$

onde M_1 = umidade decimal em base seca: 0,25

Alimentação: 723 l/h

Para uma ocupação de 10% do volume total do secador e um tempo de retenção de 1,5 h,

$$\text{este deverá ter uma capacidade de } 11 \text{ m}^3 \text{ (} D_d = 1,3\text{m e } L_d = 8,3\text{m.} \therefore \frac{L_d}{D_d} = 6,4 \text{)}$$

A área periférica será: $33,9 \text{ m}^2 = 364,9 \text{ ft}^2$

Preço estimado do aplicador : R\$ 140.000,00

Com o custo de instalação a 15% do custo do aplicador : R\$ 21.000,00

Custo total do aplicador: R\$ 161.000,00

Gerador (2.450 MHz):

Custo do gerador : R\$ 2.000,00/kW

Para uma unidade de 50 kW: R\$ 100.000,00

Com o custo de instalação a 10% do custo do aplicador: R\$ 10.000,00

Custo total do gerador: R\$ 110.000,00

Custo total da unidade industrial gerador + aplicador: R\$ 271.000,00