



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**

**ESTUDO DE DIFERENTES PROCESSOS DE TORRAÇÃO
DE CAFÉ POR MÉTODO CONVENCIONAL E
MICROONDAS**

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por **Marta Weber do Canto**, aprovada pela Comissão Julgadora em 17 de dezembro de 2001.

Campinas, 17 de dezembro de 2001

Prof. Dr. Antonio Marsaioli Júnior
Presidente da Banca

MARTA WEBER DO CANTO
Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos

Prof. Dr. ANTONIO MARSAIOLI, Jr
Orientador

PROFa. Dra. HILARY CASTLE DE MENEZES
Co-Orientadora

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Tecnologia de Alimentos

Campinas - SP
2001

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE BC
Nº CHAMADA T/UNICAMP
C168
V 1
TOME 47869
PREÇO 16.837/02
C 0 X
PREÇO R\$ 11,00
DATA 15-02-02
Nº CPD _____

CM00163698-5

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

C168a Canto, Marta Weber do

Estudo de diferentes processos de torração de café por método convencional e microondas / Marta Weber do Canto. - Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Antonio Marsaioli Junior

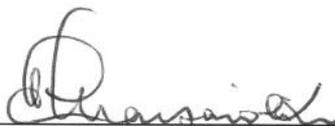
Co-Orientadora: Hilary Castle de Menezes

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

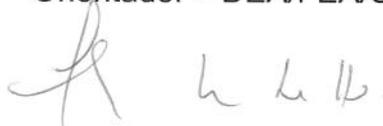
TORREFAÇÃO

1. Torração (cozimento) 2. Café 3. Microondas. I. Marsaioli Junior, Antonio II. Menezes, Hilary Castle. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Antonio Marsaioli Júnior
Orientador – DEA/FEA/UNICAMP



Prof. Dra. Flávia Maria Netto
Membro – DEPAN/FEA/UNICAMP



Prof. Dra. Helena Teixeira Godoy
Membro – DCA/FEA/UNICAMP

Prof. Dr. Nelson Horacio Pezoa García
Membro – DTA/FEA/UNICAMP



Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch
Membro – FEQ/UNICAMP

Prof. Dra. Gláucia Maria Pastore
Membro - DCA/FEA/UNICAMP

Prof. Dr. Evandro Conforti
Membro - FEEC/UNICAMP

AGRADECIMENTOS

A CAPES, pela concessão da bolsa PICDT e da sua taxa de bancada, que permitiu a realização deste trabalho

A COOPERATIVA REGIONAL DE CAFEICULTORES EM GUAXUPÉ LTDA (COOXUPÉ), pela doação dos cafés verdes usados neste estudo, e pela realização das análises sensoriais nos cafés, verde e torrado

A DIRETORIA DA FEA, e sua secretaria executiva, pelo inestimável apoio e colaboração

A Secretária do DTA, Marlene de Oliveira Pires, pela sempre disponibilidade, atenção e colaboração

Ao DEA, pela acolhida, ajuda e atenção na execução deste trabalho

Aos funcionários da biblioteca da FEA, pelo carinho, atenção e disponibilidade

Ao Sérgio Luiz Sabino Júnior, do Microcentro da FEA, pela sempre pronta atenção e colaboração na resolução dos problemas de informática

Ao Professor, Dr. Carlos Grosso, pelas facilidades concedidas no uso da infra-estrutura do DEPAN

Ao Químico, Francisco Carraro, pelo auxílio no uso dos equipamentos

As laboratoristas do Laboratório Geral do DTA, pelo apoio e colaboração, na utilização dos equipamentos

A todos aqueles que direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho, e me ensinaram a evoluir no conhecimento científico e profissional

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Tecnologia, Departamento de Tecnologia de Alimentos, por ter possibilitado a minha participação neste programa de Doutorado

A Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Tecnologia e Ciência dos Alimentos, por possibilitado a minha participação na fase conclusiva desta tese de doutorado

AGRADECIMENTO ESPECIAL

Ao professor, Dr. Antonio Marsaioli, Jr., por me permitir conhecer a tecnologia de microondas, assim como, pela acolhida, apoio e orientação na realização deste trabalho.

A Professora, Dra. Hilary Castle de Menezes, pela compreensão, carinho, apoio e colaboração na co-orientação deste trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|---|---------------|
| INDICE DE FIGURAS | XXI |
| INDÍCE DE TABELAS | XXVII |
| NOMENCLATURA | XXXVII |
| FORMULAS | XLI |
| RESUMO | XLV |
| SUMMARY | LI |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVOS | |
| 2.1. Objetivo Geral | 3 |
| 2.2. Objetivos Específicos | |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 3.1. Introdução | 4 |
| 3.2. Classificação do Grão de Café Verde | 4 |
| 3.3. Beneficiamento do Grão de Café Verde | 5 |
| 3.4. Seleção e Preparo do Grão de Café Verde | 8 |
| 3.5. Processo de Torração | 8 |
| 3.5.1. Convencional | 8 |
| 3.5.1.1. Resfriamento dos Grãos | 13 |
| 3.5.1.2. Tipos de Processos | 13 |
| 3.5.1.2.1. Lento e Rápido | 13 |
| 3.5.1.3. Equipamentos | 16 |
| 3.5.1.4. Calor e Requerimentos de Energia | 16 |
| 3.5.1.4.1. Taxa de Transferência de Calor | 18 |
| 3.5.2. Microondas | 18 |
| 3.5.2.1. Mecanismo de Aquecimento | 18 |

| | |
|---|----|
| 3.9.1.2. Propriedades | 50 |
| 3.9.1.2.1. Solubilidade | 50 |
| 3.9.1.2.2. Temperatura de Ebulição e Sublimação | 50 |
| 3.9.1.2.3. Absorção em Infravermelho e Ultravioleta | 50 |
| 3.9.1.2.4. Formação de Complexos | 51 |
| 3.9.1.2.5. Equilíbrio Ácido Base | 51 |
| 3.9.1.2.6. Antioxidante | 51 |
| 3.9.1.3. Métodos de Detecção | 52 |
| 3.9.1.4. Função na Planta | 53 |
| 3.9.1.5. Café Verde | 53 |
| 3.9.1.6. Café Torrado | 54 |
| 3.9.1.7. Bebida e a Característica Sensorial | 56 |
| 3.9.2. Ácidos Clorogênico e Caféico | 57 |
| 3.9.2.1. Propriedades | 58 |
| 3.9.2.1.1. Solubilidade e Polaridade | 58 |
| 3.9.2.1.2. Acidez | 58 |
| 3.9.2.1.3. Antioxidante | 59 |
| 3.9.2.1.4. Antibacteriana | 59 |
| 3.9.2.2. Métodos de Detecção | 59 |
| 3.9.2.3. Função na Planta | 60 |
| 3.9.2.4. Café Verde | 61 |
| 3.9.2.5. Café Torrado | 62 |
| 3.9.2.5.1. Perda Relativa de Matéria Seca | 64 |
| 3.9.2.5.2. Destino | 65 |
| 3.9.2.5.3. Relação entre 5-CQA e a Cafeína | 70 |
| 3.9.2.6. Bebida e a Característica Sensorial | 71 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 74 |
| 4.1. Materiais | 74 |
| 4.1.1. Seleção da Matéria-Prima | 74 |
| 4.1.2. Equipamentos | 74 |
| 4.1.2.1. Processo de Torração do Café | 74 |

| | |
|---|-----|
| 4.1.2.2. Análises Físicas e Químicas | 75 |
| 4.2. Métodos | 76 |
| 4.2.1. Processo de Torração | 76 |
| 4.2.1.1. Sistema Convencional | 76 |
| 4.2.1.2. Sistema por Microondas | 79 |
| 4.2.2. Métodos de Análise | 83 |
| 4.2.2.1. Físicos | 83 |
| 4.2.2.1.1. Determinação do Grau de Torração | 83 |
| 4.2.2.1.2. Densidade Aparente | 84 |
| 4.2.2.1.3. Grau de Inchaço do Grão de Café Torrado | 84 |
| 4.2.2.1.4. Aumento de Volume e de Tamanho do Grão | 84 |
| 4.2.2.1.5. Determinação da Atividade de Água | 85 |
| 4.2.2.1.6. Determinação do pH e da Concentração Iônica | 85 |
| 4.2.2.1.7. Determinação de Cor | 85 |
| 4.2.2.1.8. Determinação das Propriedades Dielétricas | 86 |
| 4.2.2.2. Químico | 87 |
| 4.2.2.2.1. Determinação de Cafeína e dos Ácidos 5-Cafeoil-Quínico e Caféico | 87 |
| 4.2.2.2.1.1. Extração | 87 |
| 4.2.2.2.1.2. Método Cromatográfico | 87 |
| 4.2.2.3. Sensorial | 89 |
| 4.3. Processamento de Dados | 90 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 91 |
| 5.1. Caracterização da Matéria-Prima (Física, Química e Dielétrica) | 91 |
| 5.2. Processo de Torração Convencional e por Microondas | 93 |
| 5.2.1. Torração Convencional Doméstica e Rápida | 93 |
| 5.2.1.1. Doméstica a 210°C e 220°C | 93 |
| 5.2.1.2. Rápida a 210°C e 220°C | 97 |
| 5.2.2. Torração por Microondas a 3500W, 3700W e 3850W | 99 |
| 5.3. Modificações Físicas do Grão e a Qualidade do Café | 101 |

| | |
|--|-----|
| 5.3.1. Atividade de Água, pH e Concentração Iônica | 101 |
| 5.3.1.1. Efeito na Análise Sensorial | 106 |
| 5.3.2. Densidade Aparente, Grau de Inchaço, Diâmetro do Grão, Aumento de Volume do Grão (AVG) e Aumento de Tamanho do Grão (ATG) | 113 |
| 5.3.3. Cor | 130 |
| 5.4. Relação das Propriedades Dielétricas com as Características de Aquecimento por Microondas | 152 |
| 5.4.1. Café Verde | 152 |
| 5.4.2. Café Torrado | 161 |
| 5.4.3. Fatores que Afetaram as Propriedades Dielétricas | 173 |
| 5.4.3.1. Composição Química | 173 |
| 5.4.3.2. Temperatura | 178 |
| 5.4.3.3. Densidade | 178 |
| 5.5. Cafeína, Ácidos 5-Cafeoil Quínico e Caféico | 180 |
| 5.5.1. Grão Verde | 180 |
| 5.5.1.1. Conteúdo | 180 |
| 5.5.2. Grão Torrado | 185 |
| 5.5.2.1. Processo de Torração | 185 |
| 5.5.2.1.1. Cafeína | 185 |
| 5.5.2.1.2. Ácido 5-Cafeoil Quínico | 193 |
| 5.5.2.1.3. Ácido Caféico | 199 |
| 5.5.2.1.4. Relação com a Qualidade do Café | 201 |
| 5.5.3. Avaliação da Metodologia de Análise | 210 |
| 6. CONCLUSÕES | 215 |
| 7. SUGESTÕES | 217 |
| 8. BIBLIOGRAFIA | 219 |
| APÊNDICE | 247 |

INDICE DE FIGURAS

| Número | | Página |
|--------|--|--------|
| 1 | Secção transversal do grão de café (DENTAN, 1985) | 6 |
| 2 | Forças físicas que controlam o processo de torração no grão de café (secção transversal): condução de calor para o interior do grão, evaporação de água do grão, estrutura do grão que impede a perda de água e CO ₂ , aumento de pressão interna e expansão do grão (SMALL & HORREL, 1993) | 12 |
| 3 | Esquema do desenvolvimento da torração no grão de café: GC (grão verde), L (torração clara), M (torração média), F (torração francesa), I (torração italiana) (NAKABAYASHI & SUZUKI, 1986) | 29 |
| 4 | Energia de transmissão, reflexão e refração a superfície do alimento (MUDGETT, 1990) | 34 |
| 5 | Estrutura química da cafeína (SPILLER, 1998) | 49 |
| 6 | Estrutura química dos ácidos clorogênicos do grão de café: R = H (ácido quínico livre), R = cafeoil (5-CQA), R = feruloil (5-FQA), R = p-cumaroil (5-CQA) (CLIFFORD & WILLSON, 1985) | 57 |
| 7 | Sugestão para o mecanismo de degradação do 3,5 diCQA durante o processo de torração (tempo em segundos) (LELOUP et alii, 1995) | 67 |
| 8 | Reação do ácido clorogênico (ácido 5-cafeoil quínico) durante a torração do café (HUGHES & THORPE, 1987) | 71 |
| 9 | Torrador de prova de café PROBAT WERK® modelo PRE1Z: tipo tambor rotativo horizontal, elétrico, dotado de sistema digital para o controle da temperatura, marca WEST®, modelo 6100 | 77 |
| 10 | Desenho esquemático do aplicador contínuo de microondas utilizado para a torração: (1) Depósito de café; (2) Alimentador; (3) Cavidade de microondas (MO); (4) Café seco; (5) Toco triplo; (6) A/B Sistema medidor de MO; (7) guia de onda flexível; (8) Gerador de MO; (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; (18) Abertura do Guia de Onda para a Medição de Temperatura Interna; (19) Termômetro de Infravermelho | 81 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 11 | Cromatograma por CLAE de uma amostra de café duro para melhor verde. Condições cromatográficas: coluna C18 (LICHROSORB) (250 mm x 4 mm e 10 μ m), fase móvel (metanol:água 30:70 v/v, e ácido cítrico:citrato de potássio 0,05M:0,1M em pH 6), fluxo de 1,5 mL/minuto, e detecção a 313 nm | 89 |
| 12 | Comportamento das diferentes qualidades de café, duro para melhor, mole e estritamente mole, torradas pelo processo convencional doméstico a 210°C e 220°C (onde cada curva representa a média dos valores de cada lote de torração) | 95 |
| 13 | Comportamento das diferentes qualidades de café, duro para melhor, mole e estritamente mole, torradas pelo processo convencional rápido a 210°C e 220°C (onde cada curva representa a média dos valores de cada etapa do processo de torração) | 97 |
| 14 | Comportamento dos cafés duro para melhor e mole durante o processo de torração por microondas a 3500 W, 3700W e 3850W | 101 |
| 15 | Relação entre o pH, a concentração iônica (CI) (mV), e as concentrações dos ácidos 5-cafeoil-quinico (5-CQA) e caféico (AC) (g/100g café) nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, torrados pelos sistemas convencional e microondas | 109 |
| 16 | Efeito dos processos de torração convencional e microondas, nos cafés, duro para melhor, mole e estritamente mole em relação aos parâmetros físicos [densidade aparente do grão verde (DGV) e torrado (DGT) (g/mL), grau de inchação (GI) (%), e aumento de volume do grão (AVG) (%)] e a perda de peso (Pp)(%) | 115 |
| 17 | Efeito dos processos de torração convencional e microondas nos cafés, duro para melhor, mole e estritamente mole em relação aos parâmetros físicos [atividade de água (aw), diâmetro do grão verde e torrado (DiâGV) (DiâGT) (mm), e aumento de tamanho do grão (ATG) (%)] e a perda de peso (Pp) (%) | 119 |
| 18 | Os parâmetros de cor CIELAB a*, b*, nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, verde e torrado (sistemas convencional e microondas) em relação a perda de peso (%) | 137 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 19 | Diferença de cromaticidade (delta C*), diferença de matiz (delta H*) e diferença total de cor (delta E*), nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, torrados pelo sistema convencional e microondas | 141 |
| 20 | Efeito dos parâmetros de cor CIELAB L* e ΔL^* (delta L*) e o Fator "f", nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, verde e torrado (sistema convencional e microondas) | 149 |
| 21 | Propriedades dielétricas [coeficiente dielétrico (ϵ'), perda dielétrica (ϵ''), fator de perda dielétrica efetiva (ϵ''_{eff}), tangente de perda dielétrica ($\text{Tan } \delta$), tangente de perda efetiva ($\text{Tan } \delta_{\text{eff}}$), coeficiente de atenuação (α) (Neper/m) e profundidade de penetração (m)] e densidade aparente (g/mL) dos cafés duro para melhor e mole, verde e torrado pelo sistema de microondas (3500W, 3700W e 3850W) a 2450 MHz | 163 |
| 22 | Propriedades dielétricas [coeficiente de fase (β) (radianos/m) e impedância intrínseca (η) (ohms)], taxa de aumento de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$), energia dissipada/volume (kW/m^3) e perda de peso (%), dos cafés, duro para melhor e mole, verde e torrado pelo sistema de microondas a 2450 MHz | 169 |
| 23 | Efeito das perdas (%) de cafeína (CF) e dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico, durante os processos de torração convencional e microondas, nas diferentes qualidades de café (duro para melhor, mole e estritamente mole) | 189 |
| 24 | Efeito da perda de peso dos ácidos 5-cafeoil quínico (5-CQA) e caféico (AC) a cada 1% de redução de peso, nos cafés (duro para melhor, mole e estritamente mole) torrados pelos sistemas, convencional e microondas | 197 |

INDICE DE TABELAS

| Número | | Página |
|--------|---|--------|
| 1 | Relação entre o processo de torração, grau de torração, perda de peso (%) com a cor do grão de café (SIVETZ & DESROSIER, 1979) | 11 |
| 2 | Percentual aproximado da perda de matéria seca (%) para os diferentes graus de torração (CLIFFORD & WILLSON, 1985 e CLARKE & MACRAE, 1989) | 30 |
| 3 | Valores mínimos e máximos do índice de saturação e ângulo de matiz, para as amostras de café <i>arabica</i> variedade Santos em grãos inteiros e moídos, a diferentes graus de torração (SEVERINI et alii, 1991) | 31 |
| 4 | Efeitos da modificação dos parâmetros [intensidade do campo elétrico (E), coeficiente dielétrico (ϵ'), fator de perda dielétrica (ϵ''), espessura/diâmetro, coeficiente de transferência de calor e condutividade térmica] em modelos matemáticos de perfis de temperatura, após o aquecimento por microondas a 2450 MHz (VAN REMMEN et alii, 1996) | 47 |
| 5 | Propriedades dielétricas [fator de perda dielétrica (ϵ''), coeficiente dielétrico (ϵ') e profundidade de penetração (dp)(cm)] de materiais de baixa perda a 2450 MHz e a 20°C (ENGELDER & BUFFLER, 1991; KRESS-ROGERS & KENT, 1987; PEZOA GARCIA, 1989) | 48 |
| 6 | Temperaturas de sublimação e de ebulição (°C) para as metilxantinas (VITZTHUM, 1976; WINDHOLZ et alii, 1976; TARKA, 1982) | 50 |
| 7 | Constantes de equilíbrio ácido (pK_a) e básico (pK_b) a uma determinada temperatura (°C) para as metilxantinas (SPILLER, 1998) | 51 |
| 8 | Conteúdo de cafeína (%) de cafés verdes <i>arabica</i> e <i>robusta</i> (MERRIT & PROCTOR, 1959; MENCHU & IBARRA, 1967; ROFFI et alii, 1971; CHARRIER, 1975; CLARKE & MACRAE, 1985 e PURDON & McCAMEY, 1987) | 53 |

| | | |
|----|--|-----|
| 9 | Conteúdo de cafeína (%) e o respectivo percentual de perda (%) a diferentes tempos (minutos) de torração dos cafés arabica e robusta (TRUGO & MACRAE, 1989) | 55 |
| 10 | Conteúdo de cafeína (% e mg/xicara) em cafés verde e torrado (arabica e robusta) (SPILLER, 1998) | 56 |
| 11 | Conteúdo de ácidos clorogênicos (CQA: 3, 4 e 5; diCQA: 3,4, 3,5 e 4,5; FQA: 3, 4 e 5) (%) em grãos de café verde (arabica e robusta) (VAN der STEGEN & VAN DUJIN, 1980; MAIER & GRIMSEHL, 1982; PURDON & McCAMEY, 1987) | 63 |
| 12 | Conteúdo de ácidos clorogênicos (CQA, diCQA e FQA) (%) em grãos de café torrado (arabica e robusta), a uma determinada perda de peso (%) (REES & THEAKER, 1977; VAN der STEGEN & VAN DUJIN, 1980; OHIOKPEHAI, 1982; PURDON & McCAMEY, 1987) | 63 |
| 13 | Perda de ácidos clorogênicos (CQA: 3, 4 e 5; diCQA: 3,4, 3,5 e 4,5; FQA: 5) (%) / segundo durante a torração de café (arabica e robusta) (dados recalculados de TRUGO, 1984) (CLARKE & MACRAE, 1985) | 66 |
| 14 | Concentração do ácido 5-cafeoil quínico (5-CQA) (%), cafeína (CF) (%) e da relação 5-CQA/CF, nos grãos de café verde e torrado (arabica e robusta) (PURDON & McCAMEY, 1987) | 70 |
| 15 | Caracterização da matéria-prima quanto a sua composição física [grau de compactação do grão (relação entre o diâmetro e a densidade aparente), parâmetros de cor CIELAB (a^* , b^* , L^* , ΔL^* e fator de "f ") pH, concentração iônica (CI) (mV) e atividade de água (a_w)], química [cafeína (CF), ácidos 5-cafeoil quínico (5-CQA) e caféico (AC)] e dielétrica [coeficiente de atenuação (α) e profundidade de penetração (dp)] | 91 |
| 16 | Média dos resultados de densidade aparente (ρ) (g/mL), grau de inchação (GI %), diâmetro do grão (diâ) (mm), aumento de tamanho do grão (ATG) (%), aumento de volume do grão (AVG) (%), atividade de água (a_w) (café torrado) (a_w), pH (café torrado), concentração iônica (CI) (mV) (café torrado), obtidos para os cafés (duro para melhor, mole e ETM) verdes e torrados pelos sistemas, convencional e microondas a uma determinada perda de peso (Pp%) | 104 |

- 17 Resultados da análise sensorial dos cafés duro para melhor, mole e ETM, torrados pelos sistemas, convencional e microondas em comparação ao pH, presença no café torrado do 5-CQA e AC (maior e/ou menor) e a perda de peso (%) 108
- 18 Valores médios encontrados para o coeficiente dielétrico (ϵ'), perda dielétrica (ϵ''), tangente de perda dielétrica ($\text{Tan } \delta$), fator de perda efetiva (ϵ''_{eff}), tangente de perda dielétrica efetiva ($\text{Tan } \delta_{\text{eff}}$), densidade aparente (ρ) (g/mL), coeficiente de atenuação (α) (Neper/m), coeficiente de fase (β) (radianos/m) e profundidade de penetração (dp) (m), e os respectivos percentuais de diferença (%) entre os cafés duro para melhor e mole verdes 132
- 19 Resultados médios encontrados para os parâmetros de cor [a^* , b^* , L^* , ΔL^* , fator "f", ângulo de matiz (h^*) (°graus), ΔH^* , croma (C^*), ΔC^* , e ΔE^*] nos grãos de café (duro para melhor, mole e estritamente mole) torrados pelos sistemas 134
- 20 Valores mínimos e máximos dos parâmetros de cor CIELAB [a^* , b^* , L^* , ângulo de matiz (h^*) (graus), croma (C^*), ΔC^* , ΔH^* , e ΔE^*] obtidos pelos diferentes processos de torração (convencional e microondas) a uma determinada perda de peso (Pp) (%) 144
- 21 Valores médios obtidos para o coeficiente dielétrico (ϵ'), perda dielétrica (ϵ''), tangente de perda dielétrica ($\text{Tan } \delta$), fator de perda efetiva (ϵ''_{eff}), tangente de perda dielétrica efetiva ($\text{Tan } \delta_{\text{eff}}$), densidade aparente (ρ) (g/mL), diâmetro do grão (dia) (mm), relação $\text{dia}_{\text{GV}}/\rho_{\text{GV}}$ (estrutura de compactação do grão verde), coeficiente de atenuação (α) (Neper/m), profundidade de penetração (dp) (m), impedância intrínseca (ohms), coeficiente de fase (β) (radianos/m) e os percentuais de diferença (%), para os cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, verdes 155

| | | |
|----|---|-----|
| 11 | Cromatograma por CLAE de uma amostra de café duro para melhor verde. Condições cromatográficas: coluna C18 (LICHROSORB) (250 mm x 4 mm e 10 μ m), fase móvel (metanol:água 30:70 v/v, e ácido cítrico:citrato de potássio 0,05M:0,1M em pH 6), fluxo de 1,5 mL/minuto, e detecção a 313 nm | 89 |
| 12 | Comportamento das diferentes qualidades de café, duro para melhor, mole e estritamente mole, torradas pelo processo convencional doméstico a 210°C e 220°C (onde cada curva representa a média dos valores de cada lote de torração) | 95 |
| 13 | Comportamento das diferentes qualidades de café, duro para melhor, mole e estritamente mole, torradas pelo processo convencional rápido a 210°C e 220°C (onde cada curva representa a média dos valores de cada etapa do processo de torração) | 97 |
| 14 | Comportamento dos cafés duro para melhor e mole durante o processo de torração por microondas a 3500 W, 3700W e 3850W | 101 |
| 15 | Relação entre o pH, a concentração iônica (Cl) (mV), e as concentrações dos ácidos 5-cafeoil-quinico (5-CQA) e caféico (AC) (g/100g café) nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, torrados pelos sistemas convencional e microondas | 109 |
| 16 | Efeito dos processos de torração convencional e microondas, nos cafés, duro para melhor, mole e estritamente mole em relação aos parâmetros físicos [densidade aparente do grão verde (DGV) e torrado (DGT) (g/mL), grau de inchação (GI) (%), e aumento de volume do grão (AVG) (%)] e a perda de peso (Pp)(%) | 115 |
| 17 | Efeito dos processos de torração convencional e microondas nos cafés, duro para melhor, mole e estritamente mole em relação aos parâmetros físicos [atividade de água (aw), diâmetro do grão verde e torrado (DiâGV) (DiâGT) (mm), e aumento de tamanho do grão (ATG) (%)] e a perda de peso (Pp) (%) | 119 |
| 18 | Os parâmetros de cor CIELAB a*, b*, nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, verde e torrado (sistemas convencional e microondas) em relação a perda de peso (%) | 137 |

| | | |
|----|---|-----|
| 27 | Perda (%) de 5-CQA (ácido 5-cafeoil quínico) e AC (ácido caféico) a cada 1 % de redução de peso, nos cafés torrados (duro para melhor, mole, e estritamente mole) pelos sistemas, convencional e microondas | 195 |
| 28 | Valores médios encontrados para as concentrações de CF, 5-CQA e AC (g/100g café), percentual de diferença entre as concentrações de 5-CQA e AC ($D_{5-CQA \text{ e } AC}$) (%), perda de peso (%) e as relações 5-CQA/CF e 5-CQA/AC nos processos de torração convencional e por microondas | 203 |
| 29 | Análise de variância ao nível de 5 % significância ($p < 0,05$), em relação a concentração de cafeína e dos ácidos cafeoil quínico e caféico ($\mu\text{g/mL}$), e a área do pico cromatográfico obtido por CLAE | 211 |
| 30 | Análise de regressão ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$), em relação a concentração de cafeína e dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico ($\mu\text{g/mL}$), e a área do pico cromatográfico obtido por CLAE | 213 |

NOMENCLATURA

| Símbolo | | Unidade |
|--------------------|---|--|
| α | Coefficiente de Atenuação | Neper/m |
| β | Coefficiente de Fase | radianos/m |
| C_0 | Velocidade da Onda Eletromagnética no Vácuo | m / s |
| C_l | Concentração Iônica | Volts / m |
| C_p | Calor Especifico | J/(kg/°C) |
| $C V \%$ | Coefficiente de Variação | % |
| DP | Desvio Padrão | |
| ϵ_0 | Permissividade do Espaço Livre ($8,842 \times 10^{-12}$ F/m) | Farads/m |
| ϵ' | Coefficiente Dielétrico | |
| ϵ'' | Fator de Perda Dielétrica | |
| ϵ''_{eff} | Fator de Perda Efetivo | |
| Tan δ | Tangente de Perda Dielétrica | |
| Tan δ_{eff} | Tangente de Perda Efetiva | |
| dp ou z | Profundidade de Penetração do Campo Elétrico | Metros |
| $ E $ | Intensidade do Campo Elétrico (geral) | Volts/m |
| E_{rms} | Intensidade do Campo Elétrico (raiz quadrada média) | Volts/m |
| f | Freqüência | Hertz |
| λ | Comprimento de Onda | Metros |
| λ_0 | Comprimento de Onda do Espaço Livre | Metros |
| η | Impedância Característica da Onda | Ohm |
| η_0 | Impedância da Onda no Espaço Livre (377Ω) | Ohm |
| μ_0 | Permeabilidade no Espaço Livre ($4 \pi \times 10^{-7}$ H/m) | Henry/m |
| μ' | Permeabilidade Magnética | Henry/m |
| P | Energia Dissipada/Volume | Watts/m ³ |
| P_d | Densidade de Potência | Watts.s/kg |
| $ P $ | Vetor Poynting | Watts/m |
| pK_a e pK_b | Constantes de Dissociação | |
| ρ | Densidade Aparente | kg/m ³ ou g/mL x 10 ⁻³ |
| T | Temperatura final | °C |
| T_0 | Temperatura inicial | °C |
| t | Tempo | Segundos |
| σ | Condutividade Dielétrica | Siemens/m |
| V | Velocidade de Fase | metros/segundos |
| ω | Freqüência Angular | radianos/segundos |
| CF | Cafeína | |
| AC | Ácido Caféico | |
| 5-CQA | Ácido 5-Cafeoil Quínico | |
| Pp | Perda de Peso | (%) |

NOMENCLATURA

Símbolo

| | |
|--------------|--|
| D | Café Duro para Melhor |
| M | Café Mole |
| ETM | Café Estritamente Mole |
| MO | Microondas |
| AVG | Aumento de Volume do Grão |
| ATG | Aumento de Tamanho do Grão |
| GI | Grau de Inchação do Café Torrado |
| aw | Atividade de Água |
| CI | Concentração Iônica |
| L* | Luminosidade |
| LTM | L* no grão Torrado e Moído |
| LTI | L* no grão Torrado Inteiro |
| LVM | L* no grão Verde Moído |
| C* | Croma ou Índice de Saturação |
| ΔC^* | Diferença de Croma |
| h* | Ângulo de Matiz |
| a* | Coordenada de Cromaticidade (variação de cor) |
| b* | Coordenada de Cromaticidade (variação de cor) |
| ΔE^* | Diferença Total de Cor |
| CLAE | Cromatografia Líquida de Alta Eficiência |
| D 210 | Torração Convencional Doméstica a 210 °C |
| D220 | Torração Convencional Doméstica a 220 °C |
| R210 | Torração Convencional Rápida a 210 °C (Industrial) |
| R220 | Torração Convencional Rápida a 220 °C (Industrial) |
| MO 3500W | Torração por Microondas a 3500 W |
| MO 3700W | Torração por Microondas a 3700 W |
| MO 3850W | Torração por Microondas a 3850 W |
| PS | Filme Plástico (Poli-Estireno) |
| PE | Filme Plástico (Poli-Etileno) |

FORMULAS

Profundidade de Penetração do Campo Elétrico (dp ou z): $\left(\frac{\epsilon''_{eff}}{\epsilon'}$

$$dp = \frac{\lambda_o \cdot (\epsilon')^{1/2}}{2\pi\epsilon''_{eff}}$$

Coeficiente de Atenuação (α): $\omega \cdot \left(\frac{\mu_o \cdot \mu' \cdot \epsilon' \cdot \epsilon_o}{2}\right)^{1/2} \cdot \left[\left(1 + \left(\frac{\epsilon''_{eff}}{\epsilon'}\right)^2\right)^{1/2} - 1 \right]^{1/2} = \text{Neper/m}$
 $\mu' = 1$ (materiais biológicos)

Coeficiente de Fase (β): $\omega \cdot \left(\frac{\mu_o \cdot \mu' \cdot \epsilon' \cdot \epsilon_o}{2}\right)^{1/2} \cdot \left[\left(1 + \left(\frac{\epsilon''_{eff}}{\epsilon'}\right)^2\right)^{1/2} + 1 \right]^{1/2} = \text{radianos/m}$

Mudança de Fase (radianos/m): $\beta \times \lambda$

Graus = radianos/m $\times 57^\circ$ graus

Velocidade de Fase (V): $\frac{\omega}{\beta} = \text{m / segundos}$

Velocidade da Onda Eletromagnética (VOM): $\frac{Co}{\sqrt{\epsilon'}} = \text{m / segundos}$

velocidade de propagação da onda eletromagnética no espaço livre (velocidade da luz) (Co): 3×10^8 m/s

RESUMO

Este trabalho teve como escopo contribuir com um maior conhecimento sobre a aplicação da tecnologia de microondas, na torração de café, em comparação ao método convencional, nas diferentes qualidades de cafés *arabicas* (duro para melhor, mole e estritamente mole). Para este fim, foram desenvolvidas condições experimentais para a torração dos grãos de café por microondas a 3500W, 3700W e 3850W, na frequência de 2450 MHz, em um secador rotativo combinado a ar quente, em planta piloto, e para a torração por método convencional [doméstico e rápido (industrial) a 210°C e 220°C], em um torrador de prova de café.

O sistema de aquecimento por microondas promoveu um aumento de qualidade no café duro para melhor, menor qualidade de café neste estudo, quando torrado à potências de 3500W e de 3700W, passando de uma resposta sensorial de café duro para melhor com acidez forte para café mole com acidez considerável. Todavia, no café mole, de maior qualidade que café duro para melhor, as microondas apenas proporcionaram a manutenção desta mesma qualidade na potência de 3500W, e uma diminuição desta a 3700W. Nas condições estudadas, não foi possível torrar o café estritamente mole, por este sistema de aquecimento não convencional. Assim, a tecnologia de microondas, desponta como um potencial de desenvolvimento, principalmente para a aplicação em cafés verdes de menor qualidade.

Os parâmetros físicos [densidade aparente, diâmetro do grão, grau de inchação, aumento de volume e aumento de tamanho do grão, atividade de água, pH, concentração iônica, cor CIELAB (a^* , b^* , L^* , ΔL^* , C^* , ΔC^* , h^* , ΔH^* , ΔE^*) e perda de peso] do café verde e torrado foram avaliados nas diferentes condições de aquecimento convencional e de microondas. As propriedades dielétricas (coeficiente de atenuação, profundidade de penetração, coeficiente dielétrico, fator de perda dielétrica, tangente de perda dielétrica, coeficiente de fase, velocidade de fase, condutividade dielétrica, intensidade de campo elétrico, energia dissipada por volume, fator de perda dielétrica efetiva e tangente de perda dielétrica efetiva) do café também foram determinadas a fim de se avaliar o seu comportamento sob a ação das microondas, e relacioná-las com o processo de torração por microondas. A presença de cafeína e dos ácidos 5-cafeoil

quínico e caféico foram determinados por CLAE, no café verde e torrado, de maneira a, relacioná-los com os diferentes processos de torração e as diferentes qualidades de café arábica. Testes sensoriais foram realizados por classificadores e provadores de café.

A utilização das propriedades dielétricas para a avaliação do processo de microondas permitiu uma maior compreensão dos fenômenos que ocorreram durante a torração do café. E desta maneira prever e avaliar o comportamento do café, frente a um determinado campo eletromagnético.

No grão verde de café duro para melhor, uma maior densidade aparente média em um maior diâmetro de grão, ou seja, uma estrutura de grão verde mais compactada em relação as outras qualidades de café, reportou em termos de propriedades dielétricas, uma maior constante de atenuação, menor profundidade de penetração, menor impedância intrínseca (maior reflexão e menor transmissão), maior coeficiente dielétrico, maior perda dielétrica, maior condutividade dielétrica, maior coeficiente e velocidade de fase, em uma menor tangente de perda dielétrica. Estas em diferentes potências de microondas, no café torrado, resultaram em uma menor taxa de aumento de temperatura, menor intensidade de campo elétrico (E_{rms}) a 3500 W e 3700 W, menor perda de peso (mas em valores de menor luminosidade para L^*) em comparação ao café mole. A resposta sensorial para estes cafés torrados a 3500W e a 3700W foi de, cafés moles com acidez considerável.

O café duro para melhor torrado a 3500W, exibiu o maior ΔL^* e o maior fator "f", maior grau de destruição térmica na superfície do grão que no seu interior, maior grau de desuniformidade térmica, e quando torrado a 3700W, mostrou um menor ΔL^* positivo e menor fator de "f" positivo, e com isso, uma menor destruição térmica na superfície do grão, maior grau de uniformidade de tratamento térmico.

SUMMARY

The objective of this study was to contribute a greater knowledge about different coffee roasting processes by both conventional and microwave methods, comparing the effects on different qualities of arabica coffee (hard to better, soft and very soft). Thus experimental coffee roasting conditions were developed [domestic and rapid (industrial) at 210°C and 220°C] using a laboratory scale roaster, and by microwaves at 3500W, 3700W and 3850W at a frequency of 2450 MHz, in a pilot rotary dryer combined with hot air.

The heating system using microwaves resulted in an increase in quality in the lowest quality coffee sample studied (hard to better), when roasted at 3500W and at 3700W, improving from a classification of hard to better with strong acidity to soft with considerable acidity. However, with the soft coffee sample, the use of microwaves at 3500W only maintained this classification, and at 3700W, resulted in a decrease in quality. Under the conditions studied, it was not possible to roast the very soft coffee sample using microwaves. Thus a technology with potential for development, especially for application in lower quality coffees, was demonstrated.

The physical parameters [apparent density, bean diameter, bean swelling, increase in volume and size, water activity, pH, ionic concentration, CIELAB colour (a^* , b^* , L^* , ΔL^* , C^* , ΔC^* , h^* , ΔH^* , ΔE^*) and loss of weight] of the raw and roasted coffees, were evaluated for the different heating conditions by both conventional and microwave systems. The dielectric properties (attenuation coefficient, depth of penetration, dielectric coefficient, dielectric loss factor, dielectric loss tangent, phase coefficient and velocity, dielectric conductivity, electric field intensity, energy dissipated per volume, factor and tangent of the effective dielectric loss) of the coffees were also determined, in order to evaluate the behaviour under the action of microwaves, and relate this to the microwave roasting process. Caffeine, 5-caffeoylquinic acid and caffeic acid were determined in both the raw and roasted coffees by HPLC, so as to relate them to the different roasting processes and to

the different qualities of arabica coffee. Sensory tests were carried out by qualified coffee tasters and classifiers.

The use of the dielectric properties to evaluate the microwave process allowed for a greater understanding of the phenomena occurring during the roasting of coffee, and thus forecast and evaluate the behaviour of the coffee when submitted to a determined electromagnetic field.

In the raw coffee bean of the hard to better sample, a greater mean apparent density in a bean with a greater diameter, that is, a more compact green bean structure in relation to the other coffee qualities, resulted in the following effects on the dielectric properties: a greater attenuation constant, greater depth of penetration, lower intrinsic impedance (greater reflection and lower transmission), greater dielectric coefficient, greater dielectric loss, greater dielectric conductivity, greater phase coefficient and velocity, in a smaller tangent of dielectric loss. These effects, at the different microwave powers, resulted in roasted coffees with a lower rate of temperature increase, a lower intensity of electric field (E_{rms}) at 3500W and 3700W and a smaller weight loss (but with lower values for luminosity L^*), as compared to the soft coffee. The sensory classification of these coffees, roasted at 3500W and at 3700W, was soft coffees with considerable acidity.

The hard to better coffee roasted at 3500W, exhibited a greater ΔL^* and greater "f" factor, a greater degree of thermal destruction on the bean surface as compared to that in the internal part of the grain, a greater degree of thermal lack of uniformity. When roasted at 3700W, it showed a lower positive ΔL^* and lower positive "f" factor, and, together with this, less thermal destruction on the bean surface and a greater degree of lack of uniformity with the thermal treatment.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem capacidade instalada para transformar, anualmente, cerca de 6 milhões de sacas de café verde em café torrado e moído e 3 milhões de sacas de café em café solúvel (NOTES ECONOMIQUES, 1992), através de 1.594 torrefações e cerca de 2.595 marcas. Dessas, 84% torram menos de 1000 sacas/mês (empresas de pequeno e médio porte na sua grande maioria), 64% torram até 300 sacas, 13% entre 301 e 600 sacas, e 7% entre 601 e 1000 sacas. E apenas 16% do total das indústrias do setor consomem mais de 1000 sacas mensais. Entretanto, apesar desta estrutura pulverizada, trata-se de uma atividade que gera mais de 23 mil empregos diretos e fatura mais de R\$ 2,5 bilhões/ano, gerando impostos da ordem de R\$ 300 milhões (ABIC, 1999_a).

Em maio de 1996, as indústrias de café, o governo e a cadeia do café firmaram uma nova política consubstanciada na postura competitiva, privilegiando a excelência da qualidade, produtividade, o preço competitivo, a agressividade nas vendas, o 'marketing' forte, a conquista de mercados emergentes e o aumento do consumo interno (previsão de aumento de 50%) (ABIC, 1996).

O mercado do café, interno e externo, vêm passando por mudanças significativas tais como: a globalização, a necessidade de diminuir os custos, o crescente nível de exigência e esclarecimento por parte do consumidor, as novas tendências de consumo que, principalmente nos países desenvolvidos, são visíveis, como a busca de produtos diferenciados e/ou produzidos de forma politicamente correta, e o crescimento da concorrência global, entre outras coisas, que vêm fazendo com que a cadeia produtiva do café tenha que se preparar para uma nova realidade (NUNES, 1999).

NUNES (1999) reporta entre as vantagens e desafios do 'agribusiness' da indústria de torrefação para os próximos anos: o aumento do consumo doméstico,

a possibilidade de maior segmentação com o aumento de renda da população e os acordos no âmbito da ALCA, que podem abrir perspectivas para a exportação de café torrado e moído.

A tendência do mercado para os "cafés especiais", encontra nas misturas (*blends*) um destaque especial, principalmente nos Estados Unidos, que se aperfeiçoou neste segmento de mercado, associado ainda às características de torração de acordo com a regionalização (ABIC, 2000).

A definição para "cafés especiais", segundo a Organização Internacional de Café (OIC), insere a maneira como foi produzido, os que receberam cuidados especiais (seja na seleção: dos tipos de plantio, dos melhores grãos, de áreas com condições de cultivo de qualidade excepcional, da maneira como foram preparados e servidos) (ABIC, 1999_b).

A evolução constante no aspecto mercadológico com relação ao café torrado e moído, bem como a grande preocupação do setor industrial para a melhoria do café vêm enfatizando a sua qualidade e a manutenção de suas características mais nobres. Neste escopo, este trabalho vem contribuir com um maior conhecimento sobre a tecnologia de torração de café por microondas a 2450 MHz, em comparação ao método convencional, nas diferentes qualidades de café *arabica* (duro para melhor, mole e estritamente mole).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar os diferentes processos de torração de café, por método de aquecimento convencional e por microondas, nas diferentes qualidades de café *arabica* (*duro para melhor, mole e estritamente mole*).

2.2. Objetivos Específicos

1. Desenvolvimento das condições experimentais para a torração dos grãos de café por processo convencional [doméstico e rápido (industrial)] e por microondas

2. Comparar o processo de torração de café por microondas com o convencional, nas diferentes qualidades de café *arabica*

3. Avaliação dos parâmetros físicos do café verde e torrado a diferentes condições de aquecimento convencional e por microondas

4. Conhecer as propriedades dielétricas do café a fim de prever o seu comportamento sob a ação das microondas, e relacionar estas com o processo de torração por microondas

5. Avaliação da presença da cafeína e dos ácidos cafeoil quínico e caféico no café verde, e torrado por diferentes processos de torração convencional e microondas, nas diferentes qualidades de café *arabica*

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Introdução

As duas espécies de interesse comercial no gênero *Coffea* são *Coffea arabica* e *Coffea canephora* var. *robusta*. Elas são convenientemente referidas como *arabica* e *robusta*, respectivamente. Cada gênero compreende um número de variedades, onde de café *arabica* são pelo menos 13 variedades. O gênero pertence à família das *Rubiaceae*.

Coffea arabica

O *Coffea arabica* é considerado como um arbusto folhoso-lustroso ou como uma pequena árvore de fragância, com flores brancas e frutas de grãos vermelhos. Foi introduzido na Arábia e no Yemen no século quinze, onde logo tornou-se uma das bebidas preferidas. O *Coffea arabica* é originário da Etiópia, próximo a Arábia, cruzando o Mar Vermelho. A partir do século 17, começou a ser cultivado nas colônias tropicais por alemães, franceses e ingleses. No Brasil, foi introduzido em 1723. Atualmente, nosso país é um dos maiores produtores de café do mundo (SPILLER, 1998).

Coffea canephora variedade *robusta*

O *Coffea canephora* variedade *robusta* foi reconhecido em 1895, como uma espécie *Coffea*, nativa do Congo Africano. O *C. canephora* var. *robusta* pode ser cultivado a altas altitudes entre os trópicos, onde a precipitação pluviométrica fica em torno de 190 cm, e a temperatura na faixa de 15 a 26 °C, distingue-se do *arabica*, na tolerância a condições mais úmidas sem sofrer o ataque de fungos (SPILLER, 1998).

3.2. Classificação do Grão de Café Verde

De acordo com PULTINAS (1986), os cafés podem ser classificados, segundo conveniência e a simplificação, em cafés de baixo grau, grau intermediário e alto grau. Como cafés de baixo grau, podem ser incluídos os naturalmente *robustas* (Costa do Marfim e de Angola) e *arabicas* (Peru e Equador); os cafés de grau intermediário os *arabicas* do Brasil (Santos, Paraná e Minas) e da Etiópia; e os cafés de alto grau os *arabicas* lavados (México, Costa Rica, Colômbia, Quênia e Nova Guiné).

LEITE (1991), baseado na atividade da polifenoloxidase e índice de coloração, classificou o café verde de Minas Gerais em bebida fina ou extra-fina ao café despulpado de Patrocínio, Lavras e São Sebastião do Paraíso, e para derriça no pano de Patrocínio; bebida entre aceitável e fina, para despulpados de Viçosa, Machado e cereja de Patrocínio e Lavras; bebida aceitável para os de derriça de Lavras, São Sebastião do Paraíso, Viçosa e Machado e cerejas de São Sebastião do Paraíso e Machado; e bebida inferior para os cerejas de Viçosa.

3.3. Beneficiamento do Grão de Café Verde

O beneficiamento dos grãos de café verde envolve a remoção da casca vermelha mais externa e da polpa da baga de café. Este processo é seguido da retirada da mucilagem, da cobertura de pergaminho e, finalmente, da película prateada que envolve o grão verde de café (endosperma) (Figura 1).

Existem dois métodos correntemente usados para o beneficiamento de grãos de café verdes, descritos como métodos “úmido” e “seco”. Todavia, existe uma nomenclatura alternativa freqüentemente usada: “lavado” e “processamento natural”, respectivamente, a qual deve ser sempre especificada em cada lote de grãos de café (SPILLER, 1998).

Método Úmido

Este método é realizado preferencialmente com bagas de café de maturação uniforme e que estejam ainda firmes. Para atingir esta uniformidade as bagas de café sofrem colheita manual seletiva. Tanto quanto possível, são classificadas em um sistema de flotação em água e enviadas posteriormente para uma máquina despulpadora. Ali, as cerejas têm a camada mais externa e a polpa removidas, expondo a camada mucilaginosa (SPILLER, 1998).

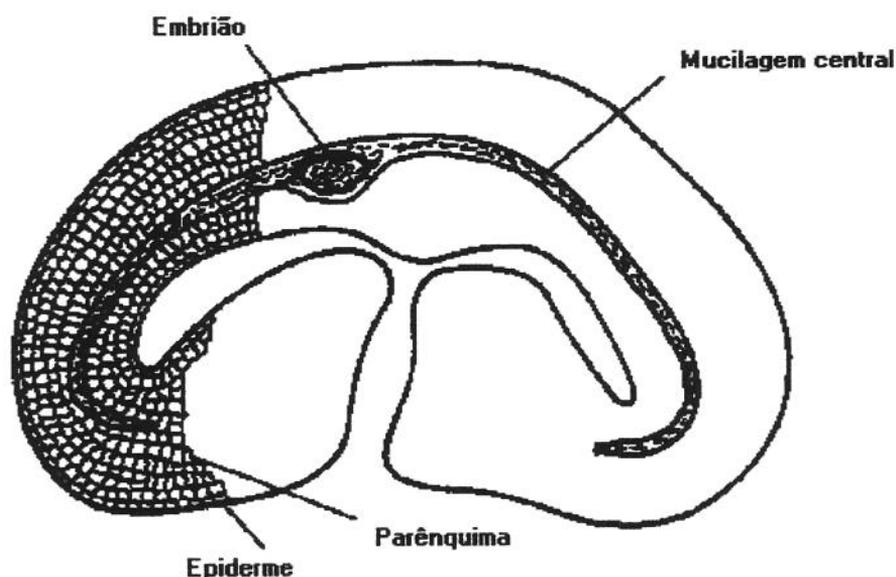


FIGURA 1: Secção transversal do grão de café (DENTAN, 1985)

A retirada da mucilagem é realizada em tanques de fermentação de concreto, onde os grãos ficam mergulhados em água. A fermentação é devida principalmente a lactobacillus e leveduras que produzem enzimas, as quais dissolvem a mucilagem do grão. Os grãos, logo após, são lavados para a remoção da mucilagem, provocando a exposição da camada de pergaminho. Após, sofrem dessecação ao sol e/ou secagem em secadores com circulação de ar. O descascamento completa o beneficiamento do grão verde. Geralmente, a camada de pergaminho e muito da película prateada é removida no descascamento mecânico. Os grãos de café verdes, desta forma produzidos, são agora levados ao armazenamento e transporte (CLARKE & MACRAE, 1989).

Método Seco

As cerejas colhidas são espalhadas ao sol, onde periodicamente serão revolvidas, de modo a propiciar uma uniformização das condições de secagem no grão. Para que, os microrganismos e as enzimas inerentes à cereja de café alterem a polpa e a mucilagem, o que facilita a retirada da casca vermelha, polpa, mucilagem, e pergaminho, o café, neste estágio, é chamado de pergaminho. A descascadora mecânica irá remover a casca e simultaneamente retirar uma certa quantidade da película prateada. Os cafés *arabica* e *robusta* podem ser beneficiados desta maneira, embora, para o *robusta*, seja necessário uma etapa adicional, devido a maior rigidez da película prateada. Esta etapa consiste no mergulho dos grãos em água, antes da remoção da película prateada. A película prateada umedecida, será mais facilmente removida mecanicamente e os grãos poderão novamente ser dessecados antes do seu armazenamento e distribuição (SPILLER, 1998).

O método seco proporciona grãos de café verde de menor preço do que o método úmido. Beneficiados por este método encontram-se uma grande proporção dos cafés *arabica* brasileiros, e quase todos os cafés *robusta*. A bebida final produzida a partir deste café, proporciona um sabor freqüentemente descrito como duro e algumas vezes característico de uma região, como o café Rio (SPILLER, 1998).

Geralmente, o método seco é o menos controlado dos dois métodos. O estágio, em que cuidados extras podem ser introduzidos após a colheita, caracteriza-se pelo ponto onde as cerejas podem ser lavadas e classificadas por flotação (antes do processo de secagem). O risco de contaminação por fungos nas cerejas e conseqüentemente nos grãos é muito alto, caso as bagas estiverem empilhadas. O empilhamento das bagas deve ser feito de maneira a formar uma camada muito fina, revolvida freqüentemente, não podendo ser molhada pela chuva (SPILLER, 1998).

3.4. Seleção e Preparo do Grão de Café Verde

A seleção do café verde para a torração e moagem pelas torrefadoras se constitui, principalmente, em uma questão de mistura, ainda que muitas torrefadoras também produzam cafés individualizados, designados por país de origem (ex: 100% brasileiro). Todas, entretanto, são baseadas nos critérios de preferência do consumidor. Os vários princípios de mistura resultam de uma considerável perícia, experiência e arte requeridos na prática (DAVIDS, 1980), junto aos fatores de minimização dos custos do produto final. Várias combinações de cafés suaves podem ser usadas. Entretanto, os cafés do Brasil (*arabicas* beneficiados por via seca) são caracterizados por sua misturabilidade e baixo custo, geralmente.

Classificações ainda podem ser realizadas por pequenos torrefadores, através da seleção de grãos cereja, grãos de grande tamanho e café moca. O gosto nacional e regional são importantes na seleção, como por exemplo, o café verde *robusta* mais barato, com torração escura, muito popular na França e Itália. Assim como, é justo dizer que os torrefadores sueco e alemães oferecem uma significativa proporção de cafés de alta qualidade para seus mercados (CLIFFORD & WILLSON, 1985).

3.5. Processo de Torração

3.5.1. Convencional

A qualidade de um café torrado, percebida por um degustador de café, está diretamente relacionada ao gosto e ao aroma da bebida. Isto, por sua vez, depende das modificações físicas e químicas, que ocorrem quando os grãos de café verde são torrados. Os principais fatores que influenciam estas modificações são a origem e o tipo de café verde, o processo de torração, o grau de torração, a

temperatura e o tempo de torração (Tabela 1) (Apêndice A) (BALTES, 1977; SIVETZ & DESROSIER, 1979; GARNERO, 1982; WURZIGER, 1985).

Na mistura de diferentes tipos de café verde, para a obtenção de uma bebida desejável em termos de gosto e aroma, CLIFFORD & WILLSON (1985) recomendaram que os diferentes cafés sejam torrados separadamente e subseqüentemente misturados. Pois, se a uniformidade de cor na torração for um parâmetro desejável, pode ser frustrada por diferenças individuais nos grãos. Como exemplo, grãos imaturos resultam em um menor grau de cor, assim como, o controle da torração é importante para se evitar a carbonização dos grãos individualmente.

O processo de torração é normalmente realizado sob pressão atmosférica com ar quente e gases de combustão como os principais agentes de aquecimento; o calor também pode ser promovido por contato com as superfícies metálicas aquecidas, direta ou indiretamente, mas geralmente como um suplemento da convecção de gases aquecidos. Algum calor pode ser suprido por radiação, e, em alguns equipamentos, como uma fonte primária de calor a qual pode proporcionar vários tipos de pirólise (CLARKE & MACRAE, 1989).

Ao início do processo de torração, a água vai sendo gradativamente eliminada, diminuindo o resfriamento evaporativo, e aumentando a temperatura do grão. A uma temperatura de 140 a 160°C inicia-se a pirólise exotérmica, levando à formação da bem conhecida cor, aroma e gosto dos produtos de café torrados. Os picos de pirólise situam-se entre 190°C e 210°C, com entalpias de 230 e 375 J/g. A carbonização começa a cerca de 230°C, se o processo de torração não for interrompido, o que requer um considerável controle do processo para um dado grau de torração (CLIFFORD & WILLSON, 1985).

O grau de torração, expresso, através da medida das diferentes quantidades de voláteis produzidas durante o aquecimento, e da quantidade dos

voláteis perdidos durante a última fase da torração (MUNARI et alii, 1997), determina, em grande parte, as características de sabor do extrato e subsequente da bebida do café torrado, qualquer que seja a sua mistura (CLARKE & MACRAE, 1989).

Segundo SPILLER (1998), o tipo da torração é uma matéria de gosto pessoal, onde para muitos um grau de torração mais clara em cafés *arabica* é o desejado, devido a característica de suavidade destes cafés. Se estes *arabicas* forem sempre torrados a altas temperaturas, tornar-se-ão amargos. Contudo, para os *arabicas* brasileiros e *robustas*, processados pelo método seco, um grau de torração mais forte melhora a qualidade da sua bebida (SPILLER, 1998).

A cor do grão torrado está correlacionada ao percentual de perda da matéria seca, expressa em base seca; uma perda de 3 a 5% corresponde a um grau de torração clara, de 5 a 8% um grau de torração média, e de 8 a 14% um grau de torração escura (CLIFFORD & WILLSON, 1985). Uma grande quantidade de dióxido de carbono é formada em função desta perda de matéria seca, gerando uma pressão interna na faixa de 5,5 a 8,0 atmosferas, o que justifica a inchação do grão em cerca de 170 a 230% durante a torração comercial (RADTKE, 1975; RAEMY, 1981; RAEMY & LAMBELET, 1982). Cerca de metade deste CO₂ total, pode ser retido no interior do café torrado, juntamente com uma maior proporção de importantes substâncias de sabor voláteis (CLARKE & MACRAE, 1989).

O tempo de torração é determinado por fatores de transferência de calor convencionais, como, a velocidade de deslocamento da relação grão e ar e a superfície de contato grão a grão, em conjunto, com o efeito de radiação do calor internamente no grão. Nos torradores, a temperatura do ar fica na faixa de: 540°C nos mais antigos; 430 a 480°C; ou de 370°C a uma menor temperatura, a diferentes velocidades (CLIFFORD & WILLSON, 1985).

TABELA 1: Relação entre o processo de torração, grau de torração, perda de peso (%) com a cor do grão de café

| Tipo Torração e Origem | Temperatura Tempo | Perda Peso (%) | Grau Torração | Cor | Característica |
|------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|---|--|
| Americana | 199°C 11-12' | 14 - 14,9 | Clara | ➤ amarelo → marrom amarelado claro | <ul style="list-style-type: none"> ➤ 127°C - 188°C: H₂O ligada removida lentamente do grão ➤ cor verde → cor amarela → começando a tornar-se castanho |
| | 210°C 14' | 15 - 16,9 16 | Média | ➤ marrom médio | <ul style="list-style-type: none"> ➤ desenvolvimento aroma e gosto em níveis ótimos ➤ sólidos extratáveis (%): ± 23 (perda peso 15,5%) |
| Latino - Americana | | 17 - 18 | Escura | ➤ marrom intenso - não escuro enegrecido | <ul style="list-style-type: none"> ➤ > destruição da parede celular e da sua resistência estrutural → > compressibilidade |
| Francesa | 227°C/16' 232°C/17' | 18 | Muito Escura | ➤ marrom muito escuro | <ul style="list-style-type: none"> ➤ gotas de óleo na superfície do grão ➤ sólidos extratáveis (%): ± 21 ➤ sabor de torração francesa |
| Italiana | 200 - 240°C 10 - 15' | 19 - 20 | Muito Escura | ➤ marrom muito escuro com regiões de carbonização | <ul style="list-style-type: none"> ➤ aroma reduzido (sabor italiano) ➤ caracterizado pelo gosto cultural |

Fonte: SIVETZ & DESROSIER (1979)

O grão de café, conhecido por apresentar uma grande quantidade de carboidratos cristalinos, como mannana e celulose, quando atinge a sua temperatura de transição vítrea, entre 210°C e 225°C, os carboidratos sofrem amolecimento (tornando-se amorfos e provavelmente vítreos) perdendo a estrutura cristalina, e deste modo, abrindo a estrutura do grão para a torração (MAHLMANN et alii, 1985). SMALL & HORREL (1993) descreveram um modelo físico-químico (Figura 2), relacionando a degradação do ácido clorogênico com a evolução do CO₂ próximo a transição vítrea, e esta como sendo um fator chave para a expansão do grão de café durante a torração.

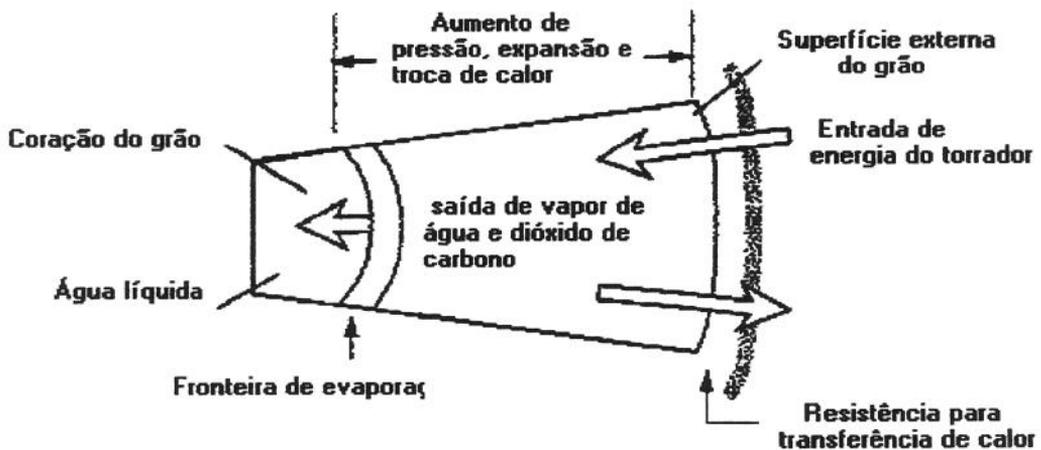


FIGURA 2: Forças físicas que controlam o processo de torração no grão de café (secção transversal): condução de calor para o interior do grão, evaporação de água do grão, estrutura do grão que impede a perda de água e CO₂, aumento de pressão interna e expansão do grão (SMALL & HORREL, 1993)

Uma das modificações físicas induzidas no grão café verde, durante o processo de torração, inclui a fase de expansão, ligada à considerável diminuição da densidade, em função do grau e da velocidade de torração. Esta diminuição da densidade se processa de modo contínuo no grão que está sendo torrado e posteriormente quando for moído. Esta característica é um importante

determinante para o tamanho da embalagem. Grãos de café verde, de diferentes fontes e idades e por isso de diferentes densidades, torrarão de maneira diferente. Como exemplo, grãos mais duros torram mais lentamente até a cor desejada (CLIFFORD & WILLSON, 1985).

3.5.1.1. Resfriamento dos Grãos

Imediatamente após o processo de torração, existe a necessidade de um rápido resfriamento com água e/ou ar frio, para que o grão não sofra alterações físicas e químicas e perda de aroma. Este resfriamento deve ser o mais uniforme possível em todos os grãos, para a manutenção de sua qualidade (WILHELM & WILFRIED, 1992). 'Quenching' é o termo aplicado quando a água é adicionada por aspersão para o resfriamento do grão após a torração, de maneira que a distribuição de água seja uniforme e não permita uma umidade adicional ao grão de café torrado (HEUMAN, 1994); outro objetivo é o de também proporcionar uma maior uniformidade no tamanho das partículas na etapa subsequente de moagem (CLARKE & MACRAE, 1989).

O conteúdo de umidade no café torrado é determinado pela duração e tempo de torração, pela temperatura usada, e pela quantidade de água usada no processo de 'quench' ao final da torração. Produtos de café devem ter preferencialmente um conteúdo de umidade de 3% a 6% por peso, pois que, valores acima de 2,5% evitam que as partículas resultantes sejam muito quebradiças e produzam muitos finos durante o processo de manipulação e empacotamento. E teores de umidade acima de 8%, são menos desejáveis por conduzirem a alterações na qualidade do grão (PULTINAS, 1986).

3.5.1.2. Tipos de Processo

3.5.1.2.1. Lento e Rápido

Os grãos inteiros e torrados são caracterizados pelo processo e o grau de torração pelo qual foram submetidos. Isto se reflete na cor externa, no sabor desenvolvido, na perda de matéria seca, e nas modificações químicas dos componentes selecionados. Em termos simples, o café torrado pode ser descrito como tendo torração 'clara', 'média' ou 'escura'. Assim como, adicionalmente descrito, como possuidor de torração 'rápida' (ex: tempo de torração de alguns minutos ou menos) ou 'lenta' (tempo da ordem de 8 a 15 minutos) (CLARKE & MACRAE, 1989).

Segundo LERICI et alii (1978), a torração lenta a um grau de torração italiana é normalmente conduzida por um aumento gradativo de temperatura até a 200 ou 240°C a um tempo de 10 a 15 minutos, compreendendo no café torrado inúmeras transformações químicas, físico-químicas e físicas. A complexidade destas modificações quali e quantitativa conferem ao produto final as suas características organolépticas típicas de aroma, gosto, cor, corpo, aumento de volume (1/3 a 1/2 em relação ao seu valor inicial), e perda de peso (15 a 20%).

A estrutura do café (*arabica* Colombiano e *robusta* da Costa do Marfim), torrado e moído, estudada por microscopia óptica e por SEM (Microscopia de Varredura Eletrônica), demonstrou que o processo de torração rápido (90 segundos) em comparação ao lento (9 minutos) sob condições industriais, produziu poros de menor diâmetro e em maior número, de menor peso e com maior volume, permitindo um menor grau de moagem e uma maior extratabilidade dos seus sólidos quando do preparo da bebida de café. Esta maior extratabilidade dos sólidos na bebida de café torrado por processo rápido, refletiu-se em um maior extrato seco, especialmente na granulometria de 0,25 a 0,5 mm, um maior conteúdo de compostos voláteis totais a 0,5 a 1 mm e a 0,25 a 0,5 mm e uma maior acidez (DUPLATRE et alii, 1987).

Comparando o café torrado de modo lento com o de torração rápida, RUBACH & KIRCHOFF (1984), verificaram que o de torração rápida apresentava

um aumento no conteúdo de aroma e na força da bebida, assim como, um baixo conteúdo de cafeína e esteróis no extrato a um tempo de torração de 3 a 5 minutos, e num tempo de residência menor que 1 minuto havia um insuficiente desenvolvimento de sabor e uniformidade no grão torrado. Paralelamente, o grão torrado, em virtude do tempo de residência curto, no processo rápido, apresentava uma tendência de sofrer um maior grau de torração na superfície que no seu centro. Desta maneira, de acordo com PURDON & McCAMEY (1987), seria vital monitorar a sua composição química em adição a medida de cor.

KIRKPATRICK et alii (1992) patentearam um processo de torração rápida que utilizava como transferência de calor um meio convectivo (gás inerte ou preferencialmente ar). Os grãos dessecados entravam em contato com o vapor de ar quente no torrador de leito fluidizado. A torração rápida era operada a uma temperatura de aproximadamente 177 a 649°C (preferencialmente 204 a 427°C) por um tempo de 10 segundos até cerca de 5:50 minutos (preferencialmente 10 a 47 segundos). Os grãos torrados resultantes apresentavam um parâmetro de cor Hunter para L* de 14 a 25 e um valor de ΔL^* menor que 1,2, com uma densidade aparente na faixa de 0,28 a 0,38 g/mL.

Nos E.U.A, historicamente o café torrado e moído era vendido por peso (498 g/1000 mL). Todavia, em 1988, houve a colocação no mercado americano de misturas de cafés com 404 g/1000 mL. Estas, eram preparadas por tecnologia chamada de 'torração rápida' que resultava em um grão de reduzida densidade. Treze onças desta mistura de densidade reduzida tinham aproximadamente o mesmo volume da tradicional mistura de 16 onças. Como resultado, obtiveram um lucro de 20 cents de dólar pela menor quantidade de café utilizada, o que encontrou uma ampla aceitação na indústria (KIRKPATRICK et alii, 1992). Os grãos processados por torração rápida, além de um maior rendimento de sólidos na bebida, exibiam melhores características de extração no preparo da bebida. Consequentemente, obtinha-se um maior número de xícaras pelas 13 onças do que previamente as de 16 onças.

3.5.1.3. Equipamentos

Até os dias de hoje, houve uma gradual evolução do torrador de tambor horizontal em comparação a aquele usado no século 19, através de projetos buscando cada vez mais uma diminuição na contribuição do calor condutivo das superfícies metálicas aquecidas, fornos mais adaptados as diferentes condições de processo, temperaturas mais baixas para o aquecimento do ar e/ou gás, e a utilização de sistemas de recirculação (CLARKE & MACRAE, 1989).

A instalação completa de um torrador (descontínuo ou contínuo) consiste em mais do que o torrador propriamente dito, como: a. silo para o café verde acoplado a uma balança e a um painel de controle; b. silo para o resfriamento do café torrado (deve possuir sistema para a aspersão de água e entrada de ar frio) acoplado a um sistema de pesagem; c. sistema para a combustão da fumaça gerada durante a torração; d. sistema para a remoção do resíduo gerado na torração (CLARKE & MACRAE, 1989).

Diminuindo a temperatura do ar e a proporção de calor condutivo, característico de torradores do tipo recirculatório (e de outros), diminuí a transferência de calor, principalmente de superfícies metálicas muito aquecidas, e desta forma as temperaturas excessivas de torração, evitando as modificações químicas indesejáveis à superfície (onde a composição é diferente daquela do corpo do grão) e ao interior do grão, como a carbonização (CLARKE & MACRAE, 1989)

3.5.1.4. Calor e Requerimentos de Energia

Os dados da análise térmica de RAEMY & LAMBELET (1982) indicaram que a entalpia medida ou o conteúdo de calor de um café *arabica* Mexicano (teor de umidade: 7,5% p/p) ficou entre 60 a 100 kcal/kg de café torrado. Este valor é

menor do que o calculado para o calor latente e sensível, necessário para levar o café verde à temperatura de torração (em torno de 200°C). A diferença pode representar o calor exotérmico gerado. E estes valores de 60 a 100 kcal seriam os requeridos para a torração propriamente dita; na prática, a existência de gases aquecidos aumenta o valor da entalpia, do mesmo modo que existe a perda de calor pela superfície do equipamento de torração (CLARKE & MACRAE, 1989).

Um balanço de calor e massa incluíram os seguintes itens: (1) massa de café verde dessecado entrando, juntamente com o de água inerente; (2) peso de água gerado na torração; (3) ar de combustão (incluindo o excesso de ar) e o óleo combustível usado; (4) gases presentes no torrador desligado; (5) temperatura de torração do café, gases de combustão e gases de saída; (6) calor específico do café dessecado, óleo combustível, vapor de água, ar de combustão, e dos gases de saída, para o cálculo do calor sensível; (7) calor latente para a evaporação da água, o qual pode ser maior para a água ligada (se química ou fisicamente); (8) calor exotérmico de entrada para a pirólise; (9) perda de calor da superfície do torrador, baseado no tipo de isolamento (ex: espessura e condutividade térmica) e as temperaturas interna/externa (CLARKE & MACRAE, 1989).

O requerimento de energia líquida (resultado da subtração do calor exotérmico estimado do valor bruto) no balanço de calor e massa, para uma torração (temperatura do ar quente de 249°C e do grão de 196°C, com uma perda de peso de 18,3%) realizada em um torrador de tambor contínuo de grande porte, foi de 295 kcal/kg (SIVETZ & DESROSIER, 1979). E o consumo de energia do torrador, ficava em torno de 0,0217 kVA/kg de café verde, equivalente a 18,7 kcal/kg (CLARKE & MACRAE, 1989).

SIVETZ & DESROSIER (1979) ainda mencionam que o calor exotérmico gerado, era calculado para o fornecimento de 11% do requerimento total de energia bruta para o aquecimento do ambiente de torração, ou 35,5 kcal/kg de café verde, equivalente a 40,3 e 43 kcal/kg em café verde dessecado e torrado,

respectivamente. A perda de calor da superfície era de aproximadamente 19% do requerimento da energia líquida, sugerindo que cerca de 81% da utilização de calor era para o processo de torração propriamente dito, ou seja, um valor muito similar a aquele dado por VINCENT et alii (1977).

3.5.1.4.1. Taxa de Transferência de Calor

Fatores de transferência de calor convencionais, determinam principalmente o tempo realmente obtido para atingir um dado grau de torração (ou grau de torração em um dado tempo): que é, $Q/t = U.A.\Delta T_m$, onde **Q** é a quantidade de calor requerida em tempo *t* (excluindo o calor exotérmico); **U** é o coeficiente de transferência global de energia; **A** é a área de superfície dos grãos de cafés verdes (aproximadamente constante para um dado peso); e ΔT_m é a temperatura diferencial média entre o ar aquecido (gases) e o café torrado. Na prática, a situação torna-se complicada devido a alguns graus de variação na transferência de calor por condução e radiação (CLARKE & MACRAE, 1989).

3.5.2. Microondas

3.5.2.1. Mecanismo de Aquecimento

3.5.2.1.1. Convencional

Torração e assamento são essencialmente a mesma operação unitária, na qual ambas, utilizam ar aquecido para alterar a qualidade atrativa do alimento. Tem como objetivo secundário, a preservação, seja pela destruição dos microorganismos, seja pela redução da atividade de água a superfície do alimento. No forno, o calor é suprido para o alimento por radiação das paredes do forno, por convecção do ar circulante e por condução através do suporte onde o alimento estiver contido (FELLOWS, 1992).

A radiação de infravermelho é absorvida pelo alimento e convertida em calor por interação com as moléculas do alimento. Ar, outros gases e vapor úmido no forno, transferem calor por convecção. O calor é convertido em calor condutivo a superfície do alimento e nas paredes do forno. Um filme limite de ar atua como uma resistência para a transferência de calor no alimento e o movimento do vapor de água no alimento. A espessura da camada limite é determinada comumente, pela velocidade do ar e pelas propriedades de superfície do alimento. As correntes de convecção, promovem uma distribuição uniforme do calor através do forno, e em muitos projetos comerciais a presença de ventiladores proporciona correntes de convecção que reduzem a espessura do filme limite, aumentando os coeficientes de transferência de calor, e melhorando a eficiência da utilização de energia (FELLOWS, 1992).

Quando um alimento é colocado em um forno com aquecimento convencional, a umidade na superfície é evaporada e removida pelo ar quente. A baixa umidade do ar no forno estabelece um gradiente de pressão do vapor úmido, o qual causa o movimento da umidade do interior para a superfície do alimento, onde a extensão da perda de umidade é determinada pela natureza do alimento e pela taxa de aquecimento (FELLOWS, 1992).

3.5.2.1.2. Microondas

Energia de microondas é uma radiação eletromagnética, que ocupa uma pequena faixa de um largo espectro eletromagnético. São ondas eletromagnéticas de comprimento de onda da ordem de centímetros e milímetros (SMIT, 1987), onde o principal efeito da exposição de um material biológico a radiação de microondas ou RF é a geração de calor volumétrico que induz a um aumento de temperatura no material. Esta geração de calor volumétrico, geralmente, não é uniforme em materiais homogêneos (KRITIKOS et alii, 1975).

Materiais termicamente isolantes como grãos, madeira e plásticos, dentre outros, quando submetidos a um processo convencional de aquecimento são difíceis de serem aquecidos uniformemente, o que torna relativamente lento este aquecimento. As microondas, no entanto, atravessam estes materiais e os aquecem internamente de modo rápido (SMIT, 1987).

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 (meio de transporte da energia) no interior de um guia de onda metálico (linha de transmissão), até ser injetado no aplicador (cavidade com paredes metálicas onde está situado o produto a ser aquecido). A penetração e o aquecimento dos alimentos em um campo de microondas é praticamente instantâneo, em contraste, com os métodos convencionais de aquecimento, onde a transferência de calor da superfície para o centro se dá 10 a 20 vezes mais lentamente (MUDGETT, 1989).

Existem vários mecanismos em escala molecular e atômica para a conversão de energia de microondas em energia térmica, entretanto, no aquecimento de alimentos, apenas a migração iônica e a rotação dipolar são de maior interesse (SCHIFFMANN, 1995).

No mecanismo de condução iônica, as cargas elétricas sofrem aceleração sob ação de um campo elétrico, deslocando-se na direção oposta a da sua polaridade. Deste modo, colidem com moléculas de água não ionizadas, cedendo energia cinética, causando-lhes aceleração e colisão com outras moléculas de água. A modificação de polaridade acelera os íons para o lado oposto. Isto ocorre a milhões de vezes por segundo, com um grande número de colisões e transferência de energia. Por conseguinte, existem duas etapas de conversão de energia: a primeira, quando a energia do campo elétrico é convertida para induzir

o ordenamento da energia cinética; e a segunda, quando é convertida em energia cinética desordenada, proporcionando aquecimento. Este tipo de aquecimento, não é significativamente dependente da temperatura e da frequência (SCHIFFMANN, 1995).

No mecanismo de rotação dipolar, muitas moléculas como a água, são dipolares por natureza, elas possuem um centro de carga assimétrico. Outras moléculas podem apresentar "dipolo induzido", devido ao estresse causado pelo campo elétrico. Os dipolos são influenciados pela rápida modificação de polaridade do campo elétrico. Embora estejam normalmente orientados 'ao acaso', o campo elétrico tenta alinhá-los. Todavia, como o campo elétrico decai a zero (relaxação), o dipolo retorna a sua orientação 'ao acaso', até ser novamente alinhado pelo campo elétrico, construído pela polaridade oposta. Esta elevação e decaimento do campo elétrico, ocorre a uma frequência de milhões de vezes por segundo. Isto causa uma conversão de energia, do campo elétrico a energia potencial armazenada no material, para em seguida armazenar energia cinética 'ao acaso' ou energia térmica no material. A frequência conhecida como *frequência de relaxação*, é definida pela dependência da temperatura e do tempo, ao tamanho molecular, para a elevação e decaimento do campo elétrico (SCHIFFMANN, 1995). O mecanismo de rotação dipolar é ainda conhecido como *polarização orientacional*, e definido como o momento dipolo médio por unidade de volume, característico de fluidos polares sobre uma ampla faixa de frequências de microondas e rádio (MUDGETT, 1995).

Para moléculas pequenas, como a água e monômeros, a *frequência de relaxação* é maior que a frequência de microondas e aumenta com a elevação da temperatura, proporcionando uma lenta conversão de energia. Moléculas grandes, como polímeros, tem uma *frequência de relaxação* a temperatura ambiente que é muito menor que a frequência de microondas mas que aumenta com a elevação da temperatura, resultando em melhor conversão da energia em aquecimento. Isto pode desencadear um aquecimento 'sem controle', em materiais que a

temperatura ambiente são muito transparentes às microondas. O faz com que, líquidos como a água e monômeros sejam melhores absorvedores da energia de microondas que polímeros (SCHIFFMANN, 1995).

3.5.2.2. Comparação entre os Sistemas Convencional e Microondas

O aquecimento convencional é feito por condução de energia da superfície do material para o seu interior. A fonte de aquecimento (ex: chama direta, ar aquecido, infra-vermelho, contato direto com placas aquecidas) proporciona uma significativa reação das moléculas da superfície para o interior do alimento, com sucessivo aquecimento das camadas próximas. Isto produz um gradiente de temperatura, que pode queimar uma determinada região, antes da temperatura em todo alimento elevar-se apreciavelmente (POTTER & HOTCHKISS, 1986).

As microondas possuindo uma alta capacidade de penetração, geram calor no interior do material de forma rápida e equilibradamente através da sua massa. O resultado é a evaporação interna da umidade, e o vapor formado aquece os sólidos adjacentes por condução. Neste caso, o aquecimento do material não ocorre por gradiente de temperatura, e sim pela distribuição de calor uniforme em todo o material (CAMPOS, 1986).

HOLZMINDEN (1991) verificou que o mecanismo de aquecimento dos alimentos por microondas diferia do processo convencional pelos seguintes fenômenos: a. formação de uma série de campos eletromagnéticos alternados, pelo choques leves entre as moléculas polares, em movimento, proporcionando aumento de temperatura no alimento; b. o aumento de temperatura é significativo e atingido em curto tempo; c. o aquecimento ocorre equilibradamente em todo o alimento, ainda que não regularmente constante; d. o alimento tende a desidratar sem a formação de crosta; e. reações de escurecimento ocorrem em limitada extensão, pela temperatura baixa da superfície do alimento, bem como, pela diferente relação tempo/temperatura. Da mesma forma, levanta a hipótese de que

a energia de microondas, além do efeito térmico mencionado acima, é ainda capaz de produzir efeitos atérmicos, tais como: quebra de ligações inter ou intramoleculares e induzir reações químicas que não ocorrem sob condições convencionais.

Perfis de aquecimento na superfície são típicos da frequência de 2450 MHz, devido a maior absorção de energia próximo a superfície que no centro do produto, e por isso, maior temperatura na superfície que no centro; enquanto que a 915 MHz, os padrões de aquecimento centrais são mais comuns. Estes diferentes perfis de aquecimento a diferentes frequências, dependem da forma do produto, tamanho e conteúdo de sais; observados em produtos esféricos e cilíndricos de pequeno diâmetro e a baixo conteúdo de sais, mas não observados em produtos de forma plana (MUDGET, 1989).

Segundo DATTA & HU (1992), a capacidade das microondas para promover uma melhor qualidade (menor degradação térmica média) em relação ao aquecimento convencional, não é universalmente verdadeiro, pois, certas combinações de taxas de aquecimento e propriedades termofísicas podem originar um processo de microondas mais degradante termicamente do que o convencional. Todavia, quando o processo por microondas for termicamente menos degradantes que o equivalente processo convencional, isto é atribuído a rapidez e a maior uniformidade de aquecimento das microondas.

3.5.2.3. Torração de Café

O processo de torração de café pelo método convencional submete o grão ao contato com gases tóxicos e extremamente aquecidos ($\pm 426^{\circ}\text{C}$), resultantes da combustão direta do gás natural ou óleo combustível, a uma alta velocidade. Estes gases passam através do torrador, que consiste de um cilindro perfurado rotacional, de maneira suficientemente vigorosa e turbulenta para produzir agitação e transferência de calor por condução e convecção. O que acarreta uma

diminuição do rendimento de torração, devido a remoção excessiva de partículas; assim como, elevam a temperatura de superfície do grão a um nível superior ao da própria temperatura de torração ($\pm 218^{\circ}\text{C}$), causando uma grande decomposição térmica nesta superfície (GERLING et alii, 1982).

GERLING et alii (1982) desenvolveram um sistema de torração de café por microondas, o que proporcionou as seguintes características ao grão torrado: um aumento do rendimento de torração pela redução da decomposição térmica e diminuição da perda de partículas, melhora no gosto e aroma do café torrado pela ausência de atmosfera oxidativa (resultante dos voláteis desprendidos no processo), e ausência do contato direto com gases combustíveis (produtores de fumaça e alcatrão), responsáveis pelo 'sabor atípico' do produto.

LE-VIET & TRUCHEMENT (1988) patentearam um dispositivo para realizar o controle do grau de torração do café por ação das microondas. O dispositivo consistia de: um tubo inclinado horizontalmente (contendo grãos de café) como aplicador das microondas; três fontes de 5 KWatts cada uma distribuídas ao longo deste tubo; um compartimento com a quarta fonte de microondas visando realizar o completo controle da torração; e ainda, um outro compartimento para o resfriamento dos grãos de café torrado. O processo de torração por microondas foi desenvolvido em duas etapas: a primeira, para desidratação dos grãos de café de 6 a 300 segundos, e a segunda, para a torração propriamente dita a uma temperatura entre 200 a 240°C por 12 a 180 segundos.

Como a qualidade do café está relacionada ao gosto e ao aroma, e que o desenvolvimento destes depende das modificações químicas que ocorrem durante a torração. Fatores como a origem e o tipo de grão de café, tempo e temperatura de torração, grau e processo de torração, afetam a sua qualidade resultante (LEINO et alii, 1992). Por conseguinte, a aplicação de microondas a torração de café, além de propiciar todas as vantagens inicialmente descritas por GERLING et alii (1982), necessita de um estudo de maior profundidade sobre a influência das

microondas na qualidade física, química, organoléptica e sensorial do café e seus derivados.

3.6. Moagem e Armazenamento do Café Torrado

Os grãos de café torrados e inteiros, de acordo com CLARKE & MACRAE (1989) requerem preferencialmente na moagem, um ato de corte a um violento esmagamento, para a sua redução de tamanho e forma das partículas, de acordo com o tipo de bebida desejado. Desta forma, o moinho de rolos oferece o melhor tipo de corte, permitindo a moagem dos grãos de café torrados sem aquecimento excessivo, com uma maior retenção de sabor e de maior estabilidade no armazenamento. PULTINAS (1986) já recomendava o resfriamento dos grãos de café torrados a uma temperatura inferior a 18°C, quando da sua moagem.

Grãos torrados com grau de torração clara são relativamente flexíveis e tendem a ser esmagados em vez de moídos. Grãos de torração escura sofrem moagem mais facilmente. Grandes quantidades de dióxido de carbono são liberadas do café torrado, com outros compostos voláteis, durante o processo de moagem. Para o café recentemente moído, isto proporciona uma proteção temporária ao oxigênio e a umidade do ar. Café moído é comumente extraído ou empacotado até 8 horas após a moagem. O café torrado e moído, quando acondicionado em embalagem à vácuo e armazenado a - 20°C, resiste melhor ao envelhecimento. A totalidade dos grãos de café torrados, contudo, tem uma vida-de-prateleira da ordem de meses com respeito ao envelhecimento (CLARKE, 1993).

A estabilidade do café torrado e moído embalado é também dependente do seu conteúdo de umidade inicial (recomendado usualmente não ser superior a 4%). A embalagem por si própria não deve permitir a absorção de umidade e oxigênio, bem como, promover a saída de compostos de aroma voláteis (CLIFFORD & WILLSON, 1985).

3.6.1. Equipamentos

BEZJIAN (1995) discutiu os critérios para a seleção de um moedor de café. Estabelecendo que a moagem incorreta poderia prejudicar a adequação do café a um determinado propósito, como na moagem muito grosseira, que proporcionaria pouco sabor no café espresso. Na moagem em pequenos grânulos, importante seria evitar o superaquecimento, pois o mesmo provoca a perda de óleos voláteis. Para a moagem em pequena escala, variantes do moinho de disco são geralmente usadas. Os discos, um que gira, e o outro com superfície serrilhada, são separados por um espaço ajustável para promover o grau de moagem requerido. A alimentação é feita ao centro, e a descarga na periferia do disco (CLARKE & MACRAE, 1989).

Os moinhos industriais mais usados são os sistemas de rolos e martelo. Os grãos torrados são distribuídos nos dentes dos roletes, onde eles são cortados. Estes rolos dispostos em série proporcionam uma moagem sucessivamente mais fina. O resíduo obtido pode ser remoído e misturado aos grãos de café moídos. Todavia, a inclusão dos resíduos tende a conferir um sabor amargo ao café. O processo de mistura contribui para a liberação do óleo das partículas de grãos moídos, antecipando o envelhecimento. Outro sistema usado em uma larga escala é o moinho de martelos com facas de corte (SPILLER, 1998).

3.7. Modificações Físicas do Café Torrado

3.7.1. Atividade de Água

De acordo com DIAZ et alii (1973), os grãos verdes contêm 1% de água fortemente ligada, um adicional de 4% de água fracamente ligada e mais 5% de água com baixa mobilidade. Sob estas circunstâncias (conteúdo de umidade de 10%) os grãos verdes tem uma atividade de água (aw) entre 0,5 e 0,6 e são

estáveis por cerca de 1 ano a uma temperatura não excedendo os 25°C (CLIFFORD & WILLSON, 1985).

Para FENNEMA (1976), os grãos de café torrados e o pó de café solúvel possuindo uma atividade de água na faixa de 0,10 a 0,30, deveriam sofrer modificações oxidativas, porém os mesmos foram os menos afetados por este tipo de alteração, em razão do alto conteúdo de compostos fenólicos (aceptores de radicais livres) e a atmosfera inerte (dióxido de carbono) produzida durante o acondicionamento (sob condições de vácuo ou nitrogênio).

3.7.2. Densidade

Os grãos verdes individuais de café variam em massa de menos de 100 mg a mais de 200 mg, com considerável sobreposição entre *arabicas* e *robustas*, mas com alguma evidência de variação associada a origem geográfica. Tais variações podem estar associadas com as quantidades de água disponíveis na planta (MELO et alii, 1980).

Para CLARKE & MACRAE (1989) a informação disponível para a densidade absoluta do café verde, foi da ordem de 1,25 g/mL (ou 0,80 mL/g), apesar de que no *arabica* de alto rendimento foram geralmente maiores, 1,30 g/mL (ou 0,77 mL/g). A densidade aparente (escoamento livre) de acordo com SIVETZ & DESROSIER (1979), em um café de torração clara foi de 369 kg/m³, e de 289 kg/m³ em uma torração mais escura.

O grau de inchação no torrado foi da ordem de 40 a 60%, isto é, percentagem da densidade original; onde os *robusta* incharam menos do que os *arabica* para o mesmo grau de torração (e eram torrados mais lentamente) (RADTKE, 1975).

PULTINAS (1986) observou que para produzir um produto de café torrado e moído que tivesse a aceitabilidade do consumidor, era essencial que o café moído tivesse uma espessura média de partícula na faixa de 30 a 40 micras (0,75 a 1,02 mm), com partículas retidas na malha nº16 do tamanho padrão americano e uma densidade aparente de 0,4 a 0,46 g/mL. E a densidade aparente dos grãos de café torrados na faixa de 0,38 a 0,50 g/mL, assegurou a aceitabilidade pelo consumidor. Isto porque nesta faixa de densidade aparente encontram-se os cafés torrados e moídos preparados comercialmente, a um grau de moagem de 'regular', 'médio' e 'finos'. Se a densidade aparente ficasse fora desta faixa ou se fosse maior, o consumidor necessitaria usar uma quantidade substancialmente menor do que a usual para produzir a bebida de uma determinada força; isto iria requer a adaptação dos hábitos do consumidor, o que pode ser feita com dificuldade (PULTINAS, 1986).

3.7.3. Estrutura Interna do Grão

Pela microscopia eletrônica de varredura (SEM), foram observados a superfície e a secção do grão verde e torrado obtidos por torração clara, média, francesa e italiana (Figura 3), demonstrando que as fissuras na superfície do grão torrado aumentavam em número e profundidade, e com inumeráveis microvacúolos globulares formados no interior do grão, com o progresso da torração. Consequentemente, para NAKABAYASHI & SUZUKI (1986) a porosidade do tecido causada pela torração resultava na expansão e fragilidade dos grãos de café torrados.

Segundo DALLA ROSA et alii (1980), os grãos de cafés *arabica* e *robusta* comportavam-se diferentemente no processo de torração, o café *robusta* apresentava um aumento de volume de 16% a 172°C/20 minutos com uma perda de substância seca de 1,65%; o *arabica* um aumento de volume de 16% a 188°C/30 minutos com uma perda de substância seca de 4,87%; o *robusta* um aumento de volume de 32% a 210°C/10 minutos com uma perda de substância

seca de 2,32%; o *arabica* um aumento de volume de 29% a 210°C/10 minutos com uma perda de substância seca de 2,52%. Estes dados demonstraram que os *arabicas* e os *robustas* diferiam em um ou mais dos seguintes pontos: produção de vapor de CO₂, retenção de vapor de CO₂, expansão do vapor de CO₂, e resistência do complexo da parede celular à tensão de cisalhamento.

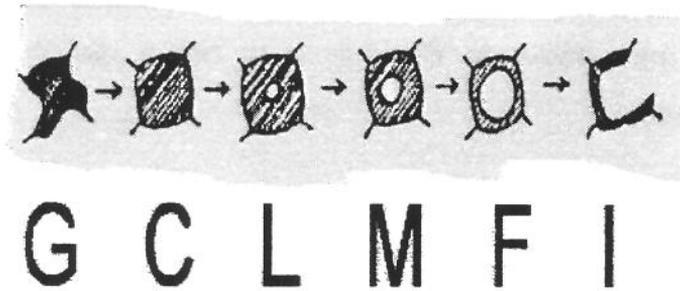


FIGURA 3: Esquema do desenvolvimento da torração no grão de café: GC (grão verde), L (torração clara), M (torração média), F (torração francesa), I (torração italiana) (NAKABAYASHI & SUZUKI, 1986)

3.7.4. Calor Específico

RAEMY & LAMBELET (1982) determinaram o calor específico de vários cafés em seu trabalho de análise térmica. Neste, o calor específico do café verde era variável dependendo do conteúdo de umidade e da temperatura. Assumindo um calor específico para a água de 1,0 e uma lei de aditividade proporcional, pode-se deduzir destes dados que o grão de café *arabica* verde dessecado (México) tinha um calor específico de 0,395 e o café *robusta* (Togo) de 0,32, ambos a 30°C. A um conteúdo de umidade normal ao redor de 12%, estes eram maiores (0,47 cal/g°C para o *arabica*). Entre 20°C e 95°C, o valor do calor específico aumentava cerca de 30%.

3.7.5. Perda de Matéria Seca

CLARKE & MACRAE (1989) estabeleceram os valores da perda de matéria seca para os diferentes graus de torração (Tabela 2). Na prática, a medida destes pode ser dificultada por requererem a medida real do conteúdo de umidade de ambos os cafés, verde e torrado (embora valores arbitrários possam ser usados). O grão torrado inteiro pode da mesma forma conter pequeno mas significativo peso de dióxido de carbono retido, o qual vai ser subsequente liberado. O conteúdo de umidade do café verde, é variável, geralmente, estando a um valor ao redor de 12%, mas podendo diminuir para cerca de 8%, dependendo das condições ambientais.

TABELA 2: Percentual aproximado da perda de matéria seca (%) para os diferentes graus de torração

| Grau de Torração | Perda de Matéria Seca* | |
|------------------|------------------------|---------------------------|
| | CLARKE & MACRAE (1989) | CLIFFORD & WILLSON (1985) |
| Clara | 1 - 5 | 3 - 5 |
| Média | 5 - 8 | 5 - 8 |
| Escura | 8 - 12 | 8 - 14 |
| Muito Escura | > 12 | |

- Em base seca do peso de café verde

3.7.6. Cor

As modificações físicas mais evidentes no grão torrado ocorrem na cor externa, modificando de marrom claro na torração clara para quase preto na torração muito escura, junto com uma progressiva exsudação do óleo para a superfície, com o aumento da severidade da torração. A uniformidade da cor de torração a um determinado grau de torração é geralmente desejado, embora isto possa ser frustrado na prática por diferenças inerentes nos grãos individualmente, especialmente no beneficiamento por método seco do grão verde (ex: grãos imaturos aumentarão os pálidos na torração) (CLARKE & MACRAE, 1989).

SEVERINI et alii (1991), observaram que a cor dos cafés movia-se da zona verde, nos grãos de café verdes, para a zona vermelha nas amostras de torração média, para então retornar a zona verde, mas em uma banda inferior ao amarelo,

considerando os parâmetros a^* e b^* . Adicionalmente, deduziram funções de cor como o índice de saturação (ou croma) e o ângulo de matiz (Tabela 3).

TABELA 3: Valores mínimos e máximos do índice de saturação e ângulo de matiz, para as amostras de café *arabica* variedade Santos em grãos inteiros e moídos, a diferentes graus de torração

| Grau Torração | Índice de Saturação | | Ângulo de Matiz | |
|---------------|---------------------|--------|-----------------|--------|
| | mínimo | máximo | mínimo | máximo |
| Verde | 19 | 20 | 81° | 90° |
| Clara | 25 | 34 | 82° | 69° |
| Média | 15 | 31 | 57° | 66° |
| Escura | 4 | 14 | 41° | 58° |

Fonte: SEVERINI et alii (1991)

LERICI et alii (1980) verificaram que a evolução da cor dependia da história térmica e do tipo de processo de torração sofrido pelo grão, onde a zona mais interna do grão de café apresenta um certo retardo na variação de cor em relação a zona mais externa, devido ao gradiente de temperatura formado pelo aquecimento convencional. Grãos de café submetidos à torração rápida tinham uma coloração mais escura na periferia e uma atenuação gradativa da cor em direção ao interior do grão. Esta atenuação da coloração era nitidamente menor no grão torrado pelo processo lento (DUPLATE et alii, 1987).

3.7.7. Conteúdo de Sólidos Solúveis

O método normal de avaliação da força de uma bebida de café é a medida do percentual de sólidos solúveis, comumente referida como os sólidos da bebida. Esta medida pode ser feita por secagem em estufa da bebida de café e pesando o seu resíduo. O percentual de sólidos solúveis ainda pode ser realizado opticamente por medida do índice de refração da bebida de café. Este índice de refração medido, pode ser correlacionado aos sólidos da bebida através da comparação com o método de secagem em estufa (PULTINAS, 1986).

Os cafés torrados de forma rápida apresentaram uma maior quantidade de sólidos solúveis na bebida de café, do que os de torração lenta; o que segundo os

autores não foi necessariamente pela extração exaustiva, mas pela maior abertura da estrutura do grão (DUPLATRE et alii, 1987).

3.7.8. Evolução e Retenção do Dióxido de Carbono

Imediatamente após a manufatura, os grãos inteiros de café torrado e moído apresentam grandes quantidades de gás, principalmente CO₂, os quais são gradativamente liberados com o tempo. Este fenômeno é de importância no acondicionamento, onde a embalagem requerida para estes produtos sofre estufamento. O conteúdo inicial de CO₂ nos grãos torrados depende do tipo de café verde (principalmente se *arabica* ou *robusta*) e do grau de torração (CLIFFORD & WILLSON, 1985).

O conteúdo de CO₂ medido por coleta a um tempo finito, foi da ordem de 2 a 6 mL CO₂ NTP/g de grão inteiro torrado. Na moagem, dependendo do grau de moagem, uma grande proporção de CO₂ pode ser imediatamente liberado, ou também permanecer em um alta concentração como na moagem grosseira. O remanescente de 1 a 3 ml de CO₂ vai ser então lentamente liberado para a atmosfera de um modo exponencial, e pode decorrer algum tempo antes da quantidade reduzir-se a 5% do original. A taxa de liberação do CO₂ da mesma forma será dependente do grau de moagem, temperatura e da pressão externa (CLIFFORD & WILLSON, 1985).

A composição real dos gases liberados do café torrado e moído, e por conseguinte dos grãos torrados inteiros, tem sido reportado como 87% de dióxido de carbono, 7,3% de monóxido de carbono e 5,3% de nitrogênio por volume (SIVETZ & DESROSIER, 1979).

Para CLARKE & MACRAE (1989), ainda existe dúvida sobre qual a proporção de compostos voláteis gerados são também perdidos como gases de

torração ou retidos no interior dos grãos torrados, embora acredita-se que a maior proporção das substâncias voláteis totais geradas sejam retidas.

3.8. Propriedades Dielétricas

O aquecimento por microondas está baseado na capacidade do alimento em absorver energia eletromagnética e convertê-la em calor (RYYNANEN, 1995). Durante o tratamento por microondas no alimento, muitas variáveis afetam o comportamento de aquecimento. Entre estas, uma das mais significativas são as propriedades dielétricas, as quais descrevem como os materiais interagem com a radiação eletromagnética.

Os perfis de tempo e temperatura no produto, pelo aquecimento por microondas, são produzidos pelo calor gerado internamente devido a absorção de energia elétrica do campo de microondas, e com a transferência de calor por condução, convecção e por evaporação. Conseqüentemente, as propriedades dielétricas são de considerável importância no desenvolvimento de novos alimentos e equipamentos de microondas (MUDGETT, 1982), assim como, na seleção de materiais de embalagens (RYYNÄNEN, 1995), porque influenciam a taxa de absorção e distribuição da energia dentro do produto.

Materiais biológicos naturais (materiais não-magnéticos) absorvem unicamente a parte elétrica do campo eletromagnético e não absorvem a energia do campo magnético (METAXAS & MEREDITH, 1988 e MUDGETT, 1986).

3.8.1. Princípios Básicos

Na transferência da energia de microondas, uma onda plana no espaço livre incide em um determinado ângulo de incidência na superfície de um material dielétrico (Figura 4), sendo parcialmente transmitida ou parcialmente refletida de volta para a fonte de energia. Isto depende dos coeficientes de transmissão e

reflexão do material dielétrico, os quais são determinados pela impedância característica da onda (Equação 9), com subsequente atenuação da energia transmitida no interior do alimento segundo a Lei de absorção de Lambert (MUDGETT, 1990):

$$P_z = P_o \cdot e^{(-2\alpha z)} \quad (1)$$

A energia transmitida para o alimento é refratada em direção ao plano normal da superfície de incidência segundo a Lei de Snell, a qual determina a trajetória no interior do alimento (MUDGETT, 1990):

$$\psi = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\eta}{\eta_o}\right) \cdot \text{sen } \phi \quad (2)$$

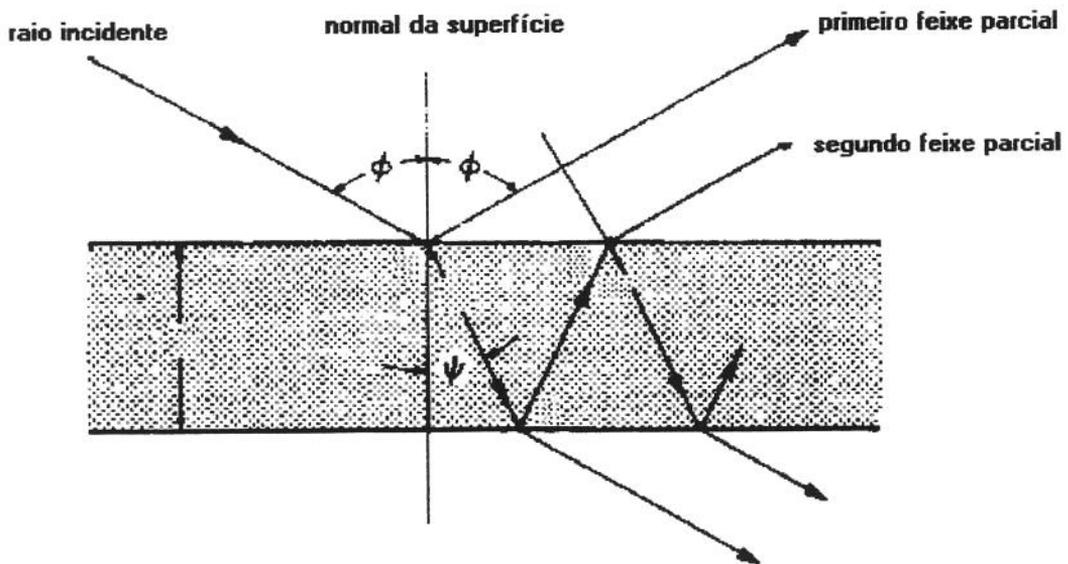


FIGURA 4: Energia de transmissão, reflexão e refração a superfície do alimento (MUDGETT, 1990)

A energia atingindo o lado oposto à superfície de incidência no alimento, é ainda parcialmente refletida dentro do produto e parcialmente transmitida para a

cavidade, onde rebate do produto em uma múltipla série de reflexões em níveis de energia sucessivamente mais baixos (MUDGETT, 1990):

As propriedades de transmissão do material podem ser definidas em termos de um coeficiente de propagação complexo (γ), envolvendo o coeficiente de atenuação (α) e o coeficiente de fase (β) (NELSON, 1996_{a,b}):

$$\gamma = \alpha + j\beta = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon^*} \quad (3)$$

onde

α : coeficiente de atenuação

β : coeficiente de fase

λ_0 : comprimento de onda do espaço livre

ϵ^* : permissividade complexa ($\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, onde j denota o operador complexo, $\sqrt{-1}$)

O componente real, ou coeficiente de atenuação (α), está relacionado com a capacidade do material em atenuar ou absorver a energia elétrica acoplada pelo material de um campo eletromagnético, e é o principal determinante da distribuição de energia em materiais dielétricos homogêneos. O coeficiente de atenuação determina a habilidade do componente elétrico do campo para penetrar no dielétrico e se constitui no inverso da profundidade de penetração do material (MUDGETT, 1995):

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)} = \text{nepers} / m \quad (4)$$

O coeficiente de fase (β) é uma medida da capacidade do material para armazenar energia elétrica de um campo aplicado e é geralmente relacionada a um período no espaço (MUDGETT, 1995):

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1)} = \text{radianos} / m \quad (5)$$

A parte imaginária do coeficiente de propagação, o coeficiente de fase, afeta a velocidade de fase (velocidade da energia de propagação) e o período no espaço (comprimento de onda da energia propagada) no interior do alimento, dado pelas equações (MUDGETT, 1990):

$$V = \frac{\omega}{\beta} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (7)$$

Enquanto que a velocidade de fase de uma onda viajante no alimento é cerca de 1/2 a 1/10 da sua velocidade no espaço livre, a energia de propagação a frequência de microondas torna-se instantânea quando comparada com a taxa de transferência do calor convencional. Assim como, os comprimentos de onda de propagação no alimento são cerca de 1/2 a 1/10 no espaço livre para alimentos de alta e baixa umidade, respectivamente (MUDGETT, 1990).

As propriedades de transmissão de interesse básico são a profundidade de penetração e a impedância característica da onda (MUDGETT, 1982). A profundidade de penetração, dp , é definida como a distância a qual a energia diminui para $1/e = 0,36791759$ deste valor na superfície do material ($1/e \approx 37\%$) (METAXAS & MEREDITH, 1988). Portanto, $dp = 1/2 \alpha$. Para dielétricos de baixa perda ($\epsilon''_{eff}/\epsilon'$) $\ll 1$, a profundidade de penetração aproximada é:

$$dp = \frac{\lambda_o \sqrt{\epsilon'}}{2\pi \epsilon''_{eff}} \quad (8)$$

onde λ_o é o comprimento de onda do espaço livre. A impedância característica da onda é definida pela seguinte equação (MUDGETT, 1982):

$$\eta = \eta_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{\epsilon'}} \quad (9)$$

onde o valor no espaço livre, η_0 , é 377 ohms, e está associada de um modo geral com a reflexão e transmissão da energia de microondas na superfície do produto, devido o descasamento de impedância entre o produto e o espaço livre, bem como pode estar relacionado com a carga da cavidade (MUDGETT, 1982). Este descasamento de impedância provoca interações entre as ondas incidente e refletida no interior da cavidade de microondas, podendo resultar na relação de onda de voltagem estacionária (VSWR) que afeta a distribuição de energia na superfície do produto, originando regiões quentes e frias no alimento, pelas variações da densidade de potência por unidade de área na superfície do material (MUDGETT, 1990).

Os modelos de onda estacionários, quando internamente, são mais prováveis de serem gerados em produtos de baixa umidade, com baixos coeficientes de atenuação e pequena espessura. Contudo, comprimentos de onda em produtos de baixa umidade são menores do que a metade daqueles no espaço livre, e as diferenças de temperatura pelo aquecimento por microondas são reduzidas pelo equilíbrio térmico (MUDGETT, 1990).

Os efeitos de aquecimento central, de acordo MUDGETT (1990), são devido provavelmente a baixos coeficientes de atenuação, resultantes de altas profundidades de penetração, os quais levam a uma densidade de potência, maior no centro que na superfície. Uma vez que no centro, o decaimento da densidade de potência ocorre mais lentamente, que naqueles elementos de volume próximos ao centro em baixos coeficientes de atenuação.

As propriedades dielétricas elementares no processamento de microondas são o *coeficiente dielétrico* (ϵ'), a *perda dielétrica* (ϵ''), e a *taxa do fator de perda ou tangente de perda* ($\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$), relacionadas ao espaço livre. O *coeficiente*

dielétrico e a *perda dielétrica*, são as propriedades que refletem a capacidade de um material para armazenar e dissipar energia elétrica de um campo eletromagnético, respectivamente (MUDGETT, 1982 e 1990).

A relação entre a *perda dielétrica* e o *coeficiente dielétrico* de um material é definido como *fator de dissipação ou tangente de perda* (MUDGETT, 1995), e representa a medida de quanto da energia elétrica pode ser convertida em calor (SCHIFFMANN, 1987 e TOLEDO, 1999).

A permissividade de um material pode ser expressa como uma quantidade complexa, $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, onde a parte real (ϵ') está associada com a capacidade de um material para armazenar energia elétrica, a parte imaginária (ϵ'') com a dissipação de energia elétrica no material através da conversão da energia elétrica em calorífica no material, e o j denota a operação complexa, $\sqrt{-1}$ (NELSON, 1996_{a,b}).

Muitos alimentos não são bons isolantes, uma vez que possuem altas concentrações de íons aquosos que seletivamente absorvem a energia de microondas e a dissipam em calor devido a interação resultante da "fricção molecular", como por exemplo, a liberação de energia pela ruptura das pontes de hidrogênio entre as moléculas de água. O *coeficiente dielétrico* e a *perda dielétrica* de muitos alimentos dependem fundamentalmente do seu conteúdo de umidade e sais; e são preditas com razoável exatidão por modelos eletroquímicos, que tratam a parte líquida do alimento como uma mistura binária de uma solução aquosa iônica e a parte sólida com propriedades de fase calculadas a partir da composição química, da temperatura do produto e da frequência de processamento (MUDGETT, 1990).

A condutividade dielétrica relacionada com a *perda dielétrica* no material é $\sigma = \omega\epsilon_0\epsilon''$ siemens/m (S/m), onde ω é frequência angular, $2\pi f$; onde f é a frequência do campo elétrico aplicado; e ϵ_0 é a permissividade do espaço livre,

$8,854 \times 10^{-12}$ Farads/m (F/m). Para o propósito desta discussão, ϵ'' incluiu ambas as perdas resultantes da relaxação dielétrica e da condução iônica (NELSON, 1996_{a,b}).

Segundo METAXAS & MEREDITH (1988), no aquecimento volumétrico por microondas, a energia dissipada por unidade de volume (P), em um material uniforme não-magnético, pode ser expressa como:

$$P = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon''_{\text{eff}} \cdot E^2_{\text{rms}} \quad (10)$$

onde P está em Watts por metros cúbicos (W/m^3) quando f está em Hertz (Hz) e E é a raiz quadrada média (rms) da intensidade do campo elétrico em volts/m (V/m). Onde o produto ($f \cdot \epsilon''_{\text{eff}}$) é crucial para a determinação do campo elétrico requerido no estabelecimento de uma dada densidade de potência no interior de um material. Assim como, a temperatura ou a densidade de empacotamento, porque controlam a forma de resposta do fator de perda efetivo (ϵ''_{eff}) versus a frequência, e por conseguinte, valores absolutos do ϵ''_{eff} a frequências específicas (METAXAS & MEREDITH, 1988).

A uma dada energia dissipada, o campo elétrico depende fortemente do coeficiente de atenuação, e particularmente do fator de perda efetivo do material (METAXAS & MEREDITH, 1988). Onde o fator de perda efetivo ($\epsilon''_{\text{eff}} = \epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon_0}$) se constitui das perdas capacitivas (efeito dipolar) e das perdas condutivas, e a 2450 MHz as perdas capacitivas são mais pronunciadas (GOYETTE et alii, 1990).

A *perda dielétrica* de uma solução aquosa iônica tendo uma perda dipolar, em virtude da rotação das moléculas de água, apresenta uma dependência negativa para a temperatura; e uma perda condutiva, devido a migração dos íons, com uma dependência positiva para a temperatura. O efeito líquido na *perda dielétrica* total da fase aquosa iônica a uma dada temperatura, depende da

concentração dos sais dissolvidos (MUDGETT (1990)).

O campo elétrico é o principal parâmetro no aquecimento por microondas, por traduzir uma ligação entre a energia eletromagnética e o material a ser tratado. A introdução de um material na cavidade ou aplicador de microondas altera o valor absoluto do campo, dificultando a predição da força do campo elétrico desenvolvido no material. Técnicas de perturbação são freqüentemente usadas na determinação da distribuição do campo, entretanto, a perturbação, deve ser pequena para a teoria ser válida. Por isto, as propriedades dielétricas tomam um papel muito importante no cálculo do campo, e um caminho para a determinação do valor absoluto do campo elétrico efetivo é através da calorimetria, usando a equação (METAXAS & MEREDITH, 1988):

$$E_{\text{rms}} = \left(\frac{\rho \cdot Cp \cdot (T - T_0) / t}{0,556 \times 10^{-10} \cdot f \cdot \epsilon''_{\text{eff}}} \right)^{1/2} = \text{Volts / m} \quad (11)$$

onde

ρ (densidade): kg/m³
 C_p (calor específico): J/kg°C
 T : °C
 t : tempo: segundos
 $2\pi \cdot \epsilon_0$: $0,55631323 \times 10^{-10}$
 f : Hertz
 ϵ''_{eff} : fator de perda efetivo

A energia de microondas sendo absorvida no material aumenta a sua temperatura, a uma taxa dependente de um número de diferentes parâmetros. A energia requerida para o aumento da temperatura de uma massa M (kg) de material de uma T_0 °C para a T_f °C em t (segundos) é dada pela equação (METAXAS & MEREDITH, 1988):

$$P = \frac{Q_h}{t} = \frac{MaCp(T - T_0)}{t} \quad (12)$$

Substituindo P usando a equação (10), a equação acima torna-se:

$$(T - T_0) / t :: \frac{0,556 \times 10^{-10} \varepsilon''_{\text{eff}} f E_{\text{rms}}^2}{\rho \cdot C_p} = \text{°C/s} \quad (13)$$

Onde para um dado material aquecido a alta frequência, a uma dada frequência, a taxa de aumento da temperatura (T) depende do ($\varepsilon''_{\text{eff}} \cdot E_{\text{rms}}^2$), a qual é uma função da temperatura (devido a variação do $\varepsilon''_{\text{eff}}$ com a T°C) (METAXAS & MEREDITH, 1988). Se a água for evaporada no processo de aquecimento, a energia requerida para a vaporização (calor latente de vaporização) e a liberação de água deve ainda ser levada em consideração, por acarretar um menor aumento de temperatura (NELSON, 1996_{a,b}).

3.8.2. Fatores que Afetam as Propriedades Dielétricas

As propriedades dielétricas dos alimentos dependem da composição química, estrutura física, geometria do produto, mecanismo ou modo dominante de transferência de energia do campo eletromagnético para o produto e são conhecidas por variar significativamente com a frequência, temperatura, umidade, densidade e tamanho da partícula (NELSON, 1978 e 1994; MUDGETT, 1995; NELSON & KRASZEWSKI, 1990).

3.8.2.1. Composição Química

As propriedades dielétricas dos alimentos são determinadas principalmente pela sua composição química, e em menor extensão, pela estrutura física. A influência do teor de água e dos sais, depende da maneira com a qual estes encontram-se combinados ou limitados no seu movimento por outros componentes alimentares. Isto justifica a dificuldade para a compreensão e predição do comportamento dielétrico destes materiais a diferentes frequências, temperaturas, ou graus de hidratação. Assim como, as características de

aquecimento variam com o tamanho das partículas, homogeneidade e distribuição. Como exemplo, estruturas fibrosas ou laminadas tem maior ϵ' do que as granulares (OHLSSON et alii, 1974; MUDGETT, 1986; NYFORS & VAINIKAINEN, 1989; NELSON, 1991 e 1994).

Os principais mecanismos da interação em regiões capilares e de multicamadas de alimentos úmidos são: (1) rotação das moléculas de água, pelo dipolo, com centros de carga positiva nos átomos de hidrogênio e carga negativa no átomo de oxigênio, e (2) migração condutiva dos íons, pelos sais dissolvidos em um campo elétrico que reverte nesta direção bilhões de vezes em cada segundo (ex: 2,45 bilhões de ciclos/segundo a 2450 MHz), para a dissipação de energia. Os dipolos de água ligada na região da monocamada não sofrem rotação pelo impedimento estérico (MUDGETT, 1990).

O deslocamento volumétrico de fluídos, e as ligações iônica da água e dos íons dos sólidos coloidais, diminuem os valores do *coeficiente dielétrico* e da *perda dielétrica* dos alimentos (sólidos e líquidos), comparado as mesmas propriedades dielétricas em soluções aquosas iônicas puras de mesma atividade e volume (MUDGETT, 1982).

As microondas interagem fortemente com lipídios e sólidos coloidais na ausência de umidade, e não o fazem em alimentos de umidade intermediária e alta. Esta interação foi evidenciada pelas medidas calorimétricas de óleos de oliva e farinha de osso, e ainda pela ignição e/ou carbonização dos alimentos sólidos quando submetidos a ação da microondas, após a remoção da umidade. Pois as medidas calorimétricas do óleo de oliva e dos alimentos sólidos dessecados apresentavam níveis de absorção de energia que não poderiam estar correlacionados somente com a água livre ou a atividade iônica. O mecanismo básico da absorção de energia nestes materiais ainda não foi esclarecido, onde as interações de microondas são conhecidas como resultantes do modo de interação orientacional, preferencialmente, ao vibracional, eletrônico, ou nuclear

característico a baixa e alta frequência, e estão relacionados aos momentos dipolar induzido e permanente (POMERANZ & MELOAN, 1987).

MUDGETT (1990), questiona a razão pela qual óleos e gorduras absorvem maior quantidade de energia de microondas nos alimentos com uma umidade significativa, ainda que, a *perda dielétrica* fosse muito menor que a da água e a de íons aquosos. O conceito de impedância característica da onda, sugere que a fase aquosa dos alimentos absorva seletivamente a maior quantidade de energia, e que as gorduras e óleos sejam praticamente "transparente" ao campo elétrico, nestes produtos. Todavia, as gorduras e óleos puros sob a ação da energia de microondas aquecem muito rapidamente, em vistas das suas densidades relativas e capacidades caloríferas, a temperatura superiores a da água no aquecimento por microondas, devido aos seus altos pontos de ebulição.

SHUKLA (1989) observou que os efeitos da interação dos hidrocolóides com a energia de microondas não estão ainda completamente esclarecidos. Assim como, ainda existe pouca informação na literatura sobre os efeitos da viscosidade em alimentos que sofrem ação das microondas ou no efeito da interação dos hidrocolóides, a nível molecular, em alimentos (MUDGETT, 1990).

3.8.2.2. Frequência

As propriedades dielétricas de muitos materiais variam consideravelmente com a frequência dos campos elétricos aplicados, com exceção de alguns materiais de perda extremamente baixa (que praticamente não absorvem nenhuma energia dos campos de microondas) (NELSON, 1991 e NELSON, 1994).

A escolha da frequência de processamento para uma operação unitária em particular pode ser crítica porque, o comportamento dielétrico e as características de aquecimento dos alimentos variam com a frequência e a temperatura em padrões, os quais são significativamente afetados pelos conteúdos de sais e

umidade. Como por exemplo, a 915 MHz a perda iônica é muito maior e a dipolar muito menor que a 2450 MHz, e vice e versa (MUDGETT, 1995).

3.8.2.3. Temperatura

As propriedades dielétricas de alimentos e de seus constituintes químicos a temperaturas acima do ponto de ebulição da água, não encontram-se disponíveis na literatura, geralmente. Todavia, medidas dielétricas tem sido reportadas para um número de líquidos não polares e sólidos, as quais acredita-se serem similares àqueles de gorduras, óleos e alimentos sólidos a altas temperaturas (von HIPPEL, 1954; IGLESIAS & WESTPHALL, 1967 e MUDGETT, 1995). Tais medidas, de acordo com MUDGETT (1995), sugerem que as propriedades dielétricas destes constituintes do alimento sejam essencialmente constantes sob uma ampla faixa de temperatura do produto, e dielétricamente inertes comparadas as propriedades de fluidos aquosos iônicos a temperaturas entre os pontos de ebulição e de congelamento da água.

A 2450 MHz, o aumento de temperatura diminui inicialmente a *perda dielétrica*, devido a dependência negativa da temperatura para a perda dipolar, para depois aumentar com a temperatura, devido a dependência positiva da temperatura para a perda condutiva. Pois, as perdas dipolares são dominantes a baixas temperaturas e as perdas condutivas a altas temperaturas, e com pontos de cruzamento dependendo do seu conteúdo de sais livres (MUDGETT, 1990).

3.8.2.4. Umidade

Os efeitos do conteúdo de umidade são particularmente importantes na região de microondas. MUDGETT (1995) verificou que a falta de polarização a um baixo teor de umidade, resultava da não rotação da água ligada a proteína e a um pequeno acoplamento do campo eletromagnético, à frequência de microondas. A medida dielétrica dos alimentos com alta umidade, por exemplo batata, amido de

batata e leite, na frequência de 1 a 10 GHz (de LOOR & MEIJBOOM, 1966) determinaram que o comportamento da água era linear, envolvendo um tempo de relaxação único ou dominante; e que os efeitos de relaxação da água livre e da condutividade, eram os principais responsáveis pelo seu comportamento dielétrico na região de microondas. Similarmente, as medidas dielétricas para outros alimentos de origem vegetal ou animal sugeriram que as suas propriedades dielétricas na frequência de microondas dependiam fundamentalmente da água e da atividade iônica dos fluidos extra e intracelulares (de LOOR, 1968; MUDGETT, 1974 e MUDGETT, 1995)

3.8.2.5. Densidade

Uma vez que a influência de um dielétrico depende da quantidade de massa interagindo com o campo eletromagnético, a massa por unidade de volume ou densidade, terá um efeito nas propriedades dielétricas. Isto é observado principalmente em dielétricos particulados, como materiais pulverizados ou granulados. As relações entre as propriedades dielétricas de materiais sólidos e aquelas da mistura ar - partículas, em amostras granulares ou pulverizadas, podem ser utilizados para a compreensão da natureza da dependência da densidade nas propriedades dielétricas de materiais particulados (NELSON, 1991 e NELSON, 1994).

8.2.6. Geometria do Produto

De acordo com OHLSSON & RISMAN (1978), o efeito da concentração de aquecimento no centro ocorria em esferas a uma faixa de diâmetro de 20 a 60 mm (máximo de 20 a 35 mm) e em cilindros a uma faixa de 18 a 35 mm (máximo a 25 mm), a frequência de 2450 MHz. Este efeito era mais pronunciado na esfera, devido a ressonância do campo eletromagnético, que no cilindro. Para esferas com diâmetro de 75 mm, o aquecimento de superfície era mais pronunciado que o central, compatível com o conceito de profundidade de penetração. Em cilindros

de 40 a 50 mm de diâmetros, o aquecimento de superfície tendia a se tornar mais pronunciado do que o central, e para os de grande diâmetro (75 mm) o aquecimento de superfície era dominante. O efeito da concentração de aquecimento, determinava efeitos nocivos sempre que um conjunto de influências no aquecimento central excedesse a capacidade do material para suportar o estresse mecânico e térmico criado. De modo que, esta focalização do aquecimento poderia ser diminuída ou eliminada por alteração da geometria do alimento ou pelo envolvimento de embalagem.

BUFFLER & STANFORD (1991) chegaram as seguintes conclusões: 1. para muitos produtos, a profundidade de penetração e os efeitos nas extremidades são os parâmetros mais importantes na determinação dos padrões de aquecimento; 2. em cilindros e esferas, a focalização ocorre quando a profundidade de penetração torna-se menor do que aproximadamente 1,5 x do diâmetro do alimento que está sendo aquecido.; 3. para produtos multi-componentes com diferentes taxas de aquecimento e propriedades térmicas e dielétricas, o ajuste do calor específico deve ser considerado preliminarmente ao ajuste das propriedades dielétricas. Sabendo-se que a taxa de aquecimento é inversamente proporcional ao calor específico.

VAN REMMEN et alii (1996) desenvolveram modelos matemáticos relativamente simples para a penetração da energia de microondas em produtos alimentícios (geometria básica e composição homogênea), medindo e calculando os perfis de temperatura para um cilindro (42 mm de diâmetro e 80 mm de altura), e por razões de simetria, as temperaturas foram apresentadas em duas localizações ao longo do comprimento do eixo do cilindro (a $\frac{1}{4}$ de altura e $\frac{1}{2}$ de altura), onde os efeitos da modificação na composição e tamanho do produto com relação as propriedades dielétricas puderam ser preditos (Tabela 4).

TABELA 4: Efeitos da modificação dos parâmetros [intensidade do campo elétrico (E), coeficiente dielétrico (ϵ'), fator de perda dielétrica (ϵ''), espessura/diâmetro, coeficiente de transferência de calor e condutividade térmica] em modelos matemáticos de perfis de temperatura, após o aquecimento por microondas a 2450 MHz

| Parâmetro | Efeito Parâmetro aumentado | Efeito Parâmetro diminuído |
|---------------------------------------|--|---|
| E | <ul style="list-style-type: none"> ★ ↑ nível total do perfil de temperatura ★ diferença de temperatura + pronunciada | <ul style="list-style-type: none"> ★ diminuição do nível total do perfil de temperatura ★ menos pronunciada diferenças de temperatura |
| ϵ' | <ul style="list-style-type: none"> ★ < penetração causando aquecimento da superfície/periferia | <ul style="list-style-type: none"> ★ > profundidade de penetração causando nivelamento do perfil (placa) ou aquecimento central (esfera e cilindro) |
| ϵ'' | <ul style="list-style-type: none"> ★ alta absorção na camada externa do produto causando aquecimento da superfície/periferia | <ul style="list-style-type: none"> ★ < absorção nas camadas externas ★ > profundidade de penetração causando nivelamento do perfil (placa) ou aquecimento central (esfera e cilindro) |
| espessura/diâmetro | <ul style="list-style-type: none"> ★ < profundidade de penetração causando aquecimento da superfície/periférico | <ul style="list-style-type: none"> ★ > profundidade de penetração causando nivelamento do perfil (placa) ou aquecimento central (esfera e cilindro) |
| Coeficiente de Transferência de Calor | <ul style="list-style-type: none"> ★ ↓ temperatura na camada externa do produto | <ul style="list-style-type: none"> ★ ↑ temperatura na camada + externa do produto |
| Condutividade Térmica | <ul style="list-style-type: none"> ★ nivelamento do perfil de temperatura | <ul style="list-style-type: none"> ★ diferenças de temperatura mais pronunciadas |

Fonte: VAN REMMEN et alii (1996)

3.8.3. Aplicação

KRESS-ROGERS & KENT (1987) aplicaram as propriedades dielétricas em amostras de café solúvel (atomizado e liofilizado) e leite em pó, para a determinação 'on line' simultânea de umidade e densidade aparente, sem problema de interferência cruzada, usando o método da linha de transmissão com guia de microondas (células de secção retangular de modo TE₁₀), em conjunto com a técnica de interação. Esta técnica, permitiu o controle da densidade e das variações de volume durante o empacotamento dos produtos granulares ou em pó, assim como, auxiliou no controle da aeração em certos produtos alimentícios. Possibilitando ainda, ser usada para a medida de altos conteúdos de umidade em produtos mais aerados do que para produtos densos, e com aplicação direta na faixa de umidade intermediária e de baixo conteúdo de umidade.

3.8.4. Métodos de medida

Em frequências maiores que 200 MHz e na região de microondas (geralmente a partir de 1 GHz), o método da cavidade ressonante e da linha de transmissão tem sido utilizados para a medida das propriedades dielétricas (NELSON, 1991 e NELSON, 1994).

TABELA 5: Propriedades dielétricas [fator de perda dielétrica (ϵ''), coeficiente dielétrico (ϵ') e profundidade de penetração (dp)(cm)] de materiais de baixa perda a 2450 MHz e a 20°C

| Material | ϵ'' | ϵ' | dp |
|----------------------------|--------------|-------------|------|
| Óleo de oliva | 0,15 | 2,46 | 20,4 |
| Óleo semente de algodão | 0,18 | 2,64 | 17,6 |
| Manteiga (com sal) | 0,6 | 4,6 | 7,0 |
| Manteiga (sem sal) | 0,45 | 2,9 | 7,4 |
| Madeira | 0,02 - 0,5 | 1,2 - 5 | 113 |
| Café solúvel liofilizado • | 0,096 | 5,8 | - |
| Café verde em pó* | 0,3 | 2,5 | - |

Fonte: ENGELDER & BUFFLER (1991); KRESS-ROGERS & KENT (1987)*; PEZOA GARCIA (1989)*

O emprego da cavidade ressonante, conhecida como técnica de perturbação da cavidade, foi utilizado por KRESS-ROGERS & KENT (1987) e RYYNÄNEN (1995), para substâncias com tangente de perda dielétrica baixa, como o **café**, óleos, vidros, e plásticos (Tabela 5).

3.9. Cafeína, Ácidos Clorogênico e Caféico

3.9.1. Cafeína

A purina é um composto heterocíclico pertencente ao grupo das metilxantinas, as quais são referidas freqüentemente como alcalóides purina (TARKA & HURST, 1998). As metilxantinas de interesse são cafeína (1,3,7 trimetilxantina) (Figura 5) ($C_8H_{10}N_4O_2$), teofilina (1,3 dimetilxantina), e teobromina

(3,7 dimetilxantina), e ocorrem no café, chá, mate, produtos de chocolate, e bebidas de cola (TARKA & HURST, 1998).

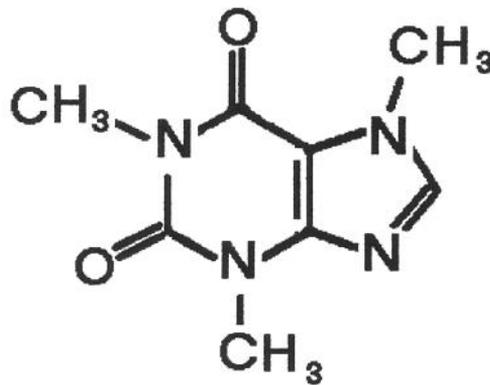


FIGURA 5: Estrutura química da cafeína (SPILLER, 1998)

3.9.1.1. Em Alimentos

De acordo com o tipo de alimento a concentração de cafeína pode variar de: 1,5 a 3,5% em folhas de chá, 2% em guaraná, 0,75 a 1,8% em grãos de café torrado (BIANCHINE, 1996), e de 2,2 a 3,0% nos cafés solúveis brasileiros (BERG et alii, 1984). No café verde, dependendo da espécie, a variação era de 0,5% a 2,0% (MELLO et alii, 1992). A presença de cafeína no café pode variar com um número de fatores, entre eles: a. espécie de café; b. tipo de beneficiamento e processamento; c. método de preparo da bebida; d. tamanho da xícara de café; e. volume de ingredientes adicionados (como leite, creme adoçados e xaropes) (WOLMAN, 1955).

A cafeína tem sido utilizada como um parâmetro de qualidade, tanto para o café verde em grão, quanto para o café torrado e solúvel. A legislação brasileira de 1978, exige um teor mínimo de 1% p/p de cafeína para o café verde, 0,7% p/p para o café torrado e de 2,0% p/p para o café solúvel (MELLO et alii, 1992).

3.9.1.2. Propriedades

3.9.1.2.1. Solubilidade

As metilxantinas, cafeína, teobromina, e teofilina apresentam valores de solubilidade diferentes; a cafeína, se dissolve bem em água fervente, mas a temperatura ambiente, o clorofórmio é um dos melhores solventes. HOCKFIELD et alii (1982) e GILKEY et alii (1984), comparando a taxa de solubilidade dos alcalóides xantinas, observaram, que quando os dois átomos de nitrogênio heterocíclicos estavam metilados no anel, como na cafeína e teofilina, a solubilidade era maior nos solventes polares do que naqueles, com apenas um átomo de nitrogênio metilado, como na teobromina.

3.9.1.2.2. Temperatura de Ebulição e Sublimação

TABELA 6: Temperaturas de sublimação e de ebulição (°C) para as metilxantinas

| Composto | Sublimação | Ebulição |
|------------|------------------|-------------------------------|
| Cafeína | 180 ⁺ | 236,5 (pressão ⁺) |
| | 178* | 238* 235 (anidro*) |
| Teobromina | 290 - 295* | 357* 330 (tubo selado*) |
| Teofilina | 269 - 272* | 270 - 274* |

Fonte: ⁺VITZTHUM (1976), *WINDHOLZ et alii (1976) e TARKA (1982)

3.9.1.2.3. Absorção em Infravermelho e Ultravioleta

As metilxantinas apresentam uma forte absorção no ultravioleta (UV) entre 250 e 280 nm (TU & REINOSA, 1966), e a cafeína uma absorção máxima a 273 nm (SPILLER, 1998). Os espectros para as metilxantinas são muito similares e apenas quando se utiliza de técnicas como a espectroscopia derivativa pode-se diferenciá-las. As metilxantinas também exibem um pronunciado espectro infravermelho, o que permite informações significativas a cerca destes compostos (SPILLER, 1998).

3.9.1.2.4. Formação de Complexos

A cafeína, em soluções aquosas, associa-se para formar pelo menos um dímero e provavelmente um polímero (TS'O et alii, 1963). Pode da mesma forma se associar a purinas e pirimidinas, como uma base livre ou com seus nucleosídeos (THAKKAR, 1970). Se cristaliza em água, como um monohidrato (WINDHOLZ et alii, 1976). A formação do complexo também aumenta a solubilidade aparente da cafeína, em meio aquoso, e na presença de benzoatos, alcalis, cinamatos, citratos e salicilatos (WINDHOLZ et alii, 1976).

3.9.1.2.5. Equilíbrio Ácido-Base

A cafeína comporta-se como uma base muito fraca e reage com ácidos, e os sais produzidos são facilmente hidrolisados (Tabela 7) (WINDHOLZ et alii, 1976). Evidências da formação de cafeína protonada podem ser vistas no espectro de ultravioleta a pH zero (SONDHEIMER et alii, 1961).

Os principais ácidos contribuidores da acidez total na bebida de café e no café solúvel são o ácido cítrico e o acético, e em menores proporções os ácidos clorogênicos, quínicos, fórmico, málico e fosfórico (H_3PO_4). Diferenças inclusive foram detectadas entre os conteúdos de ácidos dos cafés *arabica* e *robusta* (ENGELHARDT & MAIER, 1985).

TABELA 7: Constantes de equilíbrio ácido (pk_a) e básico (pk_b) a uma determinada temperatura ($^{\circ}C$) para as metilxantinas

| Composto | $T^{\circ}C$ | pk_a | pk_b |
|------------|--------------|------------|--------|
| Cafeína | 19 | 14,2 | - |
| | 250 | $\cong 14$ | - |
| Teobromina | 180 | 10 | 13,9 |
| Teofilina | 25 | 8,8 | 13,7 |

Fonte: SPILLER (1998)

3.9.1.2.6. Antioxidante

Existem evidências que a cafeína contribua para a atividade antioxidante, devido a detecção de produtos de cafeína oxidados, 8-oxocafeína (ácido 1,3,7-trimetilúrico - alcalóide purina hidroxilado na posição C-8) em cafés solúveis, torrados e moídos, na faixa de 4 a 35 ppm, onde sua formação foi dependente da tensão de oxigênio, peróxido de oxigênio e da disponibilidade de metais de transição (STADLER & FAY, 1995). A 8-oxocafeína tem sido classificada como um bom radical seqüestrante e potente antioxidante em sistemas modelos (NISHIDA, 1991). Além disto, pode ser utilizada como um marcador químico para a determinação da vida-de-prateleira de cafés e de alimentos e bebidas ricos em cafeína.

3.9.1.3. Métodos de Detecção

Inicialmente, os métodos para a determinação de cafeína em café e em produtos de café eram baseados fundamentalmente na espectrometria de UV, atualmente, a separação cromatográfica evita as interferências, particularmente na análise de café torrado e pó de café solúvel. E uma forma de garantir que a cafeína ligada seja determinada, a amostra deve ser aquecida em água por 30 minutos (CLIFFORD & WILLSON, 1985).

A cafeína, em CLAE com detecção em ultravioleta, pode ser determinada simultaneamente com outras substâncias, como a trigonelina (TRUGO et alii, 1983, NAKABAYASHI & MASANO, 1986, TRUGO & MACRAE, 1989), ácido nicotínico e sacarose em café *arabica* e *robusta* (TRUGO & MACRAE, 1989); e com a teobromina em amostras de cacau, bebida de chocolate, chá e cola (TRUGO et alii, 1983). Para SPILLER (1998), CLAE-UV é uma técnica adequada para o controle de qualidade na indústria do café, devido a sua precisão, exatidão e rapidez, e desta forma essencial para a investigação do mecanismo envolvido no processo de torração do café.

3.9.1.4. Função na Planta

A cafeína, por fazer parte do sistema de defesa da semente do café, tem sido reconhecida como um antifúngico (RIZVI et alii, 1980_a) com fitotoxicidade seletiva (RIZVI et alii, 1981), e um quimioesterilizante para certos insetos (RIZVI et alii, 1980_b).

3.9.1.5. Café Verde

A cafeína ocorre na polpa do café, na semente (presente na forma livre dentro do citoplasma) e na parede celular (na forma ligada). A cafeína ligada pode estar associada aos ácidos clorogênicos, com os quais formam um complexo elétron- π , segundo estudo microscópico (CLIFFORD & WILLSON, 1985).

A ampla variação no conteúdo de cafeína dos cafés verdes é devido fundamentalmente a diferença entre as espécies, de acordo com CLARKE & MACRAE (1985), pois mesmo dentro de uma mesma espécie existe uma faixa muito ampla de valores (Tabela 8). Para SPILLER (1998), uma das mais significati

TABELA 8: Conteúdo de cafeína (%) de cafés verdes *arabica* e *robusta*

| Referência | Origem | Espécie | Faixa | Média \pm dp |
|--------------------------|--|----------------|-------------|-----------------|
| Merrit & Proctor (1959) | América Sul | <i>arabica</i> | 1,07 - 1,29 | 1,17 \pm 0,08 |
| Menchu & Ibarra (1967) | Guatemala | <i>arabica</i> | 0,53 - 0,79 | 0,63 \pm 0,06 |
| Roffi et alii (1971) | Angola | <i>arabica</i> | 1,21 - 1,45 | 1,32 \pm 0,07 |
| | Angola | <i>robusta</i> | 2,18 - 2,72 | 2,42 \pm 0,13 |
| Charrier (1975) | África | <i>arabica</i> | 0,58 - 1,69 | - |
| | África | <i>robusta</i> | 1,16 - 3,27 | - |
| Clarke & Macrae (1985) | diferentes origens | <i>arabica</i> | 0,60 - 1,50 | 1,20 |
| | diferentes origens | <i>robusta</i> | 2,20 - 2,70 | 2,20 |
| Purdon & McCamey (1987)* | América Central, Brasil, Tanzânia, e Etiópia | <i>arabica</i> | 0,60 - 0,78 | 0,69 \pm 0,07 |
| | África | <i>robusta</i> | 1,38 - 1,48 | 1,41 \pm 0,06 |

dp: desvio padrão

* dados não corrigidos para umidade

vas diferenças entre os cafés *arabica* e *robusta* está no conteúdo de cafeína, onde no café *robusta* o conteúdo foi quase duas vezes maior que o estabelecido no *arabica*.

3.9.1.6. Café Torrado

A temperatura do grão de café durante o processo de torração pode atingir valores superiores a 200°C, por uma combinação de aquecimento externo e reações químicas exotérmicas. Por esta temperatura ser superior ao ponto de sublimação da cafeína, poderia se esperar uma perda considerável. Todavia, na prática, estas perdas são relativamente modestas, a menos que, condições de torração mais severas sejam empregadas. Na verdade, como o peso do grão verde pode ser reduzido por cerca de 20% ou mais (10% água e 10% em matéria seca) durante a torração, o percentual real de cafeína pode aumentar em cerca de 10%, em base seca torrada (MERRIT & PROCTOR, 1959 e SPILLER, 1998).

As razões desta modesta perda de cafeína são complexas, mas os dois principais fatores contribuintes são provavelmente, um aumento do ponto de sublimação (volatilização) da cafeína como resultado da pressão originada dentro do grão, e uma baixa taxa de difusão do vapor formado pela torração para as camadas mais externas do grão. A cafeína, ainda, pode formar sais como resultado das condições moderadamente ácidas prevaletes dentro do grão, as quais, aumentam durante a torração; mas como estes sais são relativamente fracos, eles irão se decompor, produzindo um pequeno efeito no processo de sublimação (CLARKE & MACRAE, 1985).

De acordo com STENNERT & MAIER (1994), o conteúdo de cafeína parece depender unicamente da perda de torração e não do tempo de torração, pois apresentou um mesmo comportamento frente ao processo de torração convencional lento e rápido; em contrapartida, o conteúdo de trigonelina sofreu

uma diminuição pela torração rápida, não somente devido a perda de peso, mas também pelo tempo de torração.

No trabalho desenvolvido por NAKABAYASHI & MASANO (1986), o conteúdo de cafeína no grão de café torrado aumentou de forma gradual e proporcional a diminuição de peso dos grãos. Na torração média, o conteúdo de trigonelina diminuiu rapidamente em virtude da decomposição térmica. O valor da relação entre o conteúdo de trigonelina (T) e o de cafeína (C) (T/C), indicava o grau de torração dos grãos, porque o mesmo tornava-se proporcionalmente menor com o decorrer da torração. Os valores médios para esta relação foram: 0,86 para os grãos verdes, 0,73 na torração média, 0,55 na torração francesa e 0,15 na torração italiana.

TRUGO & MACRAE (1989) verificaram que a cafeína apenas sofreu degradação significativa a partir da torração escura, com uma perda de 5,4%, no café *arabica* e *robusta* (Tabela 9). A sacarose foi degradada rapidamente durante o processo de torração, sofrendo uma perda de 97% na torração clara e de 100%

TABELA 9: Conteúdo de cafeína (%) e o respectivo percentual de perda (%) a diferentes tempos (minutos) de torração dos cafés *arabica* e *robusta*

| Café | Tempo | Cafeína | | Perda Cafeína ^c |
|----------------|-------|---------|------|----------------------------|
| | | a | b | |
| <i>arabica</i> | 7 | 1,18 | 1,14 | 5,0 |
| Guatemala | 10 | 1,28 | 1,23 | - 2,5 ^d |
| | 13 | 1,32 | 1,19 | 0,8 |
| | 19 | 1,27 | 1,15 | 4,2 |
| <i>robusta</i> | 5 | 2,45 | 2,39 | 0,4 |
| Uganda | 7 | 2,49 | 2,39 | 0,4 |
| | 14 | 2,48 | 2,27 | 5,4 |
| | 16 | 2,46 | 2,27 | 5,4 |

^a Resultados expressos em gramas % (base seca) uma média das determinações em duplicatas

^b Resultados expressos em base seca de grão verde (g% cafeína x % recuperação dos grãos de café após torração / 100)

^c Conteúdo de cafeína em grão verde: *arabica* 1,20; *robusta* 2,40 g% de base seca

^d Conteúdo de cafeína foi 2,5% maior do que no grão verde original

Fonte: TRUGO & MACRAE (1989)

na torração escura. A perda de trigonelina foi muito dependente do grau de torração, sendo maior no café *robusta*. A degradação da trigonelina foi associada com a formação de ácido nicotínico em ambos, cafés *arabica* e *robusta*, como uma consequência do processo de torração.

3.9.1.7. Bebida e a Característica Sensorial

O conteúdo de cafeína de uma xícara de café pode variar de 40 a 160 mg, dependendo do teor de cafeína no grão verde, do método e tempo de preparo da bebida (Tabela 10) (BUNKER & McWILLIAMS, 1979), mas principalmente do tamanho da xícara e da força da bebida (BURG, 1975; NDJOUENKEU et alii, 1981 e BLAUCH & TARKA, 1983). NDJOUENKEU et alii (1981) observaram que cerca de 90% da cafeína era extraída no primeiro minuto de preparo da bebida de café.

A cafeína não tem odor, mas um marcante gosto amargo. Várias tentativas tem sido feitas para correlacionar as características de amargor da bebida de café com seu conteúdo de cafeína, mas com pouco sucesso. De fato, tem sido apresentado que a cafeína contribui unicamente com uma pequena proporção (cerca de 10 a 30%) do amargor percebido (CLARKE & MACRAE, 1985 e VIANI, 1988). A cafeína em solução aquosa é neutra, e seu limite de percepção sensorial molar é de $7,0 \times 10^{-4}$ (PFAFFMANN et alii, 1971).

TABELA 10: Conteúdo de cafeína (% e mg/xícara) em cafés verde e torrado (*arabica* e *robusta*)

| Café | <i>arabica</i> | <i>robusta</i> |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Grãos verdes dessecados | 0,58 - 1,7 % (média 1,16) | 1,16 - 3,27 % (média 2,15) |
| Grãos torrados | 1 % | 2 % |
| Bebida | 29 - 176 mg/xícara | média 74 mg/xícara |

Fonte: SPILLER (1998)

Para CLIFFORD & WILLSON (1985), existe uma evidente diferença no conteúdo de cafeína entre os *arabicas* e os *robustas*, entretanto, em vista da

pequena contribuição relativa ao amargor é improvável que a cafeína possa ter uma importante contribuição para as suas diferenças organolépticas.

3.9.2. Ácidos Clorogênico e Caféico

Os esteres do ácido quínico, conhecidos como ácidos clorogênicos (CGA) formam uma fração quantitativamente importante em grãos de café verdes e torrados, em bebida de café e em café solúvel. Os CGA podem ser subdivididos em grupos de geralmente 3 isômeros cada, com base no número e identidade dos resíduos acilados: (a) ácidos cafeoilquínicos (CQA); (b) ácidos dicafeoilquínicos (diCQA); (c) ácidos feruloilquínico (FQA); (d) ácidos *p*-cumaroilquínicos; e (e) vários ácidos cafeoilferuloilquínicos (CFQA) (CLARKE & MACRAE, 1985 e CLIFFORD & WILLSON, 1985).

O ácido quínico e os ácidos clorogênicos são tratados como ciclitóis, para propósitos de nomenclatura. Neste sistema, os isômeros de ácido quínico que ocorrem naturalmente são 1L-1(OH), ácido carboxílico 3,4,5 tetrahidroxíciclohexano (Figura 6) (CLARKE & MACRAE, 1985).

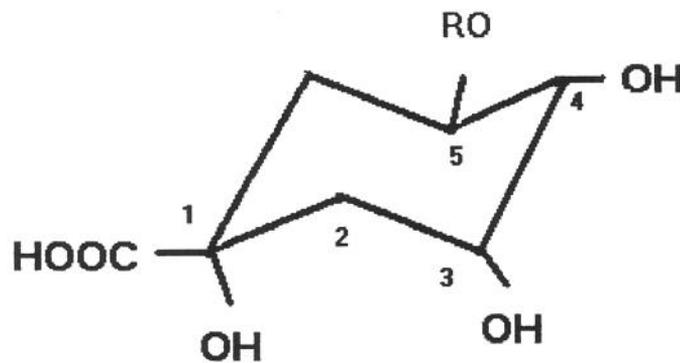


FIGURA 6: Estrutura química dos ácidos clorogênicos do grão de café: R = H (ácido quínico livre), R = cafeoil (5-CQA), R = feruloil (5-FQA), R = *p*-cumaroil (5-CQA) (CLIFFORD & WILLSON, 1985)

Os monoesters acilados a posição 5, 5-CQA, são dominantes nos grãos de café verdes, todavia, existem espécies conhecidas onde o 3-ester, 4-ester ou diester são dominantes (MÖLLER & HERRMANN, 1983). Os monoesteres 3 e 4 (mas não os diesters) podem se formar pela migração do radical acila do 5-ester dominante, tais migrações são mais prováveis em solventes aquosos do que em alcoólicos (NICHIFORESCO, 1979).

3.9.2.1. Propriedades

3.9.2.1.1. Solubilidade e Polaridade

De um modo geral, os CGA e os menos polares diCGA, são mais solúveis em baixos teores alcoólicos ou misturas álcool-água. A grande polaridade, e por consequência solubilidade em água, está preferencialmente associada aos grupos OH equatoriais livres mais facilmente solvatáveis do que aos grupos OH axiais livres impedidos estericamente (CLARKE & MACRAE, 1985).

A solubilidade em água dos isômeros de CGA diminuem na seguinte ordem: 1-acil > 3-acil > 4-acil > 5 acil, onde os primeiros são mais polares do que os últimos. A polaridade no resíduo acila aumenta pela presença de um grupo OH aromático e diminui com o grupo OCH₃ (metoxi). A solubilidade em água dos 5-isômeros diminui da seguinte forma: 5-GQA > 5 CQA > 5-CoQA > 5FQA. Os diCQA são menos solúveis em água do que os CQA, mas mais solúveis em etil acetato e acetona (CLARKE & MACRAE, 1985).

3.9.2.1.2. Acidez

As constantes de dissociação publicadas para o grupo carboxila do ácido quínico, 4-CQA e 5-CQA caem na faixa de 3,4 a 3,6, e em 50% de álcool para o diCQA e 5-CQA, na faixa de 4,2 a 4,5. Estes dados são consistentes com a conformação equatorial da carboxila do ácido quínico. Em água, o grupo OH

aromático mais ácido no CQA tem um valor de pka de 8,45 (CLARKE & MACRAE, 1985).

3.9.2.1.3. Antioxidante

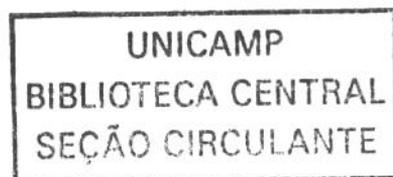
Os ácidos clorogênicos são bem conhecidos como antioxidantes, os quais em algumas circunstâncias, tornam-se mais poderosos do que o α -tocoferol ou ácido ascórbico (MORISHITA & KIDO, 1995), e possuem ação seqüestrantes *in vivo* (NAKAYAMA, 1995). Uma mistura de antioxidante solúvel em água contendo ácido clorogênico e caféico foi desenvolvida como uma alternativa aos antioxidantes sintéticos (ZENG et alii, 1993).

STADLER et alii (1996) observaram que a elucidação das rotas de degradação térmica dos ácidos clorogênicos e a interação destes produtos de pirólise com os outros constituintes do alimento, bem como, o benefício dos efeitos antioxidativos das reações secundárias e os seus produtos, deveriam ser esclarecidos.

3.9.2.1.4. Antibacteriana

DAGLIA et alii (1994_a) demonstraram que o café torrado (*Coffea arabica* e *robusta*) possuía propriedades antibacterianas contra uma ampla faixa de bactérias. Esta atividade dependia principalmente do grau de torração, pelo tipo de substância formada, como dos produtos da reação de Maillard, da caramelização dos carboidratos e dos produtos de decomposição térmica, e estava ausente no café verde. Os mesmo autores em um segundo trabalho (1994_b), estabeleceram que os marcadores químicos para esta atividade eram a soma do conteúdo de trigonelina e ácido nicotínico e a relação 5-CQA/Cafeína.

3.9.2.2. Métodos de Detecção



A literatura recomenda o uso de água fria, água quente, álcool-aquoso frio, álcool-aquoso quente e etil acetato. Porém para grãos de café verde contendo polifenoloxidase ativa a água fria não é recomendado, e a água quente tem sido desaprovada por facilitar a migração acila. TRUGO & MACRAE (1984) consideraram álcool-aquoso, o melhor extrator, quando aplicado a amostra de baixo teor de umidade. Metanol, etanol, ou 2-propanol são ainda amplamente usados, com ou sem refluxo, nas concentrações de 25% a 70 ou 80% (geralmente). A água quente, mesmo apresentando desvantagens como solvente extrator do grão de café verde, é obviamente o solvente de escolha para os grãos torrados, se o analista deseja reproduzir o preparo da bebida de café a nível doméstico ou comercial (CLARKE & MACRAE, 1985).

A cromatografia líquida de alta resolução (CLAE) é a preferida para a separação dos diferentes isômeros de ácido clorogênico, por necessitar de um mínimo preparo de amostra e curto tempo de análise (REES & THEAKER, 1977 e VAN der STEGEN & VAN DUJIN, 1980).

De acordo CLIFFORD (1979), quando o 3-CQA era usado como padrão, o diCQA por possuir propriedades significativamente diferentes era superestimado em cerca de 15% (calculando os coeficientes de extinção molar reportados por RUBACH (1969)) quando medido por espectrometria de UV, e por cerca de 37% por reagentes colorimétricos que ligavam-se a parte fenólica da molécula.

3.9.2.3. Função na Planta

CLIFFORD & WILLSON (1985) sugeriram as seguintes funções para o ácido clorogênico na planta de café:

- * Desencorajar insetos, pássaros e mamíferos predatórios
- * Proteger contra a invasão de micróbios
- * Precursor da camada inicial protetora, sintetizada no local dos danos físicos sofridos pela planta

- ★ Precursor na biossíntese da lignina
- ★ Possível função na formação dos pigmentos verdes do grão verde

3.9.2.4. Café Verde

De acordo com DENTAN (1985), os ácidos clorogênicos estão localizados na superfície do grão em associação com a membrana (cera cuticular) e no citoplasma, adjacente as paredes celulares do endosperma do parênquima. O ácido clorogênico na parede celular pode estar associado com a cafeína possivelmente em um complexo molar 1:1 ou 2:1 do tipo estudado por HORMAN & VIANI (1971). Existem algumas evidências que o CQA possa ocorrer na forma de polímero ou de complexo, possivelmente com proteína, ambos na polpa (massa próxima a 1000 daltons) e no grão (massa próxima a 5000 daltons).

No grão verde, os 5-isômeros respondem por 70 a 85% do CQA e 80 a 85% do FQA, e os isômeros-4 equivalem ou excedem ligeiramente os isômeros-3 (MAIER & GRIMSEHL, 1982). Os conteúdos 4-CQA e 5-CQA respondem por cerca de 10 a 15%, em relação ao total de ácidos clorogênicos. No café arábica, os conteúdos de diCQA e FQA encontram-se na faixa entre 5 a 25% do total, e nos grãos de café robusta são substancialmente maiores (cerca de 2 vezes) (Tabela 11) (RUBACH, 1969 e CLIFFORD & WIGHT, 1976).

A relação entre o ácido monocateoilquínico (%) e o ácido dicafeoilquínico (%) (CQA/diCQA) e o nível de maturação em amostras de *Coffea arabica* cv - Catuai vermelho beneficiado por ambos os métodos, via úmida e seca, apresentaram um alto nível de significância estatística. A distribuição entre os três monoisômeros (5-CQA: 75%, 4-CQA: 16%, 3-CQA: 9%) foi constante em todas as amostras e com valores similares a aqueles relatados por CLIFFORD & WILSON (1985). Os resultados obtidos por MENEZES (1994) indicaram que a inclusão parcial de grãos verdes afetava negativamente o sabor e aroma da bebida de café, bem como, que o método de beneficiamento do grão verde interferia

significativamente na proporção de CQA/di-CQA, onde o método úmido sempre determinou maiores valores que o método seco.

3.9.2.5. Café Torrado

As reações de Maillard e Strecker, caramelização dos açúcares e a degradação dos ácidos clorogênicos (CGA), segundo CLIFFORD & WILLSON (1985) eram importantes para a formação de atributos do café torrado. E que o ácido clorogênico, a sacarose, as proteínas, e a trigonelina eram os componentes que sofriam as mais significativas modificações durante a torração, e conseqüentemente adequados para o uso como indicadores das transformações que ocorriam no grão durante o processo de torração (FELDMAN et alii, 1969).

Os ácidos clorogênicos tem sido usados em conjunto com a cafeína na caracterização de espécies comerciais e não comerciais de café, na prevenção de possíveis fraudes (CLIFFORD, 1986; CLIFFORD & JARVIS, 1988; CLIFFORD et alii, 1989) e na medida do grau de torração e seus efeitos no café (FELDMAN et alii, 1969; SIVETZ, 1972; TRUGO & MACRAE, 1984_a; PURDON & McCAMEY, 1987). Pois o processo e as condições de torração influenciam fortemente a composição quali e quantitativa da fração de CGA. Contudo, na predição do grau de torração de grãos desconhecidos, foi de valor limitado (CLIFFORD, 1979)

A determinação da concentração individual dos ácidos clorogênicos no café, e o estudo de sua transformação durante o processamento do café foram importantes para o estabelecimento de correlações entre a composição química e os atributos sensoriais dos produtos de café, e também para propósitos de controle de qualidade (TRUGO & MACRAE, 1984).

Os ácidos clorogênicos podem ser perdidos por um número de rotas: a. migração acila; b. hidrólise; c. oxidação (particularmente CQA e diCQA); d. frag-

TABELA 11: O conteúdo de ácidos clorogênicos (CQA: 3,4 e 5; diCQA: 3,4, 3,5 e 4,5; FQA: 3,4 e 5) (%) em grãos de café verde (arabica e robusta)

| Referências | CQA | | | | | diCQA | | | FQA | | |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------|------|---------|--|--|
| | 3 | 4 | 5 | 3,4 | 3,5 | 4,5 | 3 | 4 | 5 | | |
| arabicas | | | | | | | | | | | |
| Van der Stegen & Van Duijn (1980) | 0,3-0,5 | 0,5-0,7 | 3,4-4,1 | 0,2-0,4 | 0,3-0,4 | 0,3-0,4 | 0,01 | 0,04 | 0,2-0,3 | | |
| Maier & Grimsehl (1982) | 0,4-0,8 | - | 4,6-5,6 | 0,1-0,3 | 0,3-0,6 | 0,2-0,3 | - | - | - | | |
| Purdon & McCamey (1987) | 0,3-0,5 | 0,4-0,6 | 2,0-3,2 | - | - | - | - | - | - | | |
| robustas | | | | | | | | | | | |
| Van der Stegen & Van Duijn (1980) | 0,6-0,7 | 0,9 | 4,4-5,0 | 0,5-0,6 | 0,4-0,6 | 0,6-0,8 | 0,07 | 0,1 | 0,9-1,0 | | |
| Maier & Grimsehl (1982) | 0,7-1,1 | - | 5,9-6,5 | 0,5-0,7 | 0,4-0,8 | 0,6-1,0 | - | - | - | | |
| Purdon & McCamey (1987) | 0,4-0,6 | 0,5-0,7 | 2,0-3,3 | - | - | - | - | - | - | | |

TABELA 12: Conteúdo de ácidos clorogênicos (CQA, diCQA e FQA) (%) em grãos de café torrado (arabica e robusta) a uma determinada perda de peso (%)

| Referência | Origem | Perda Peso | CQA | diCQA | FQA | Total |
|-----------------------------------|----------|------------|------|-------|------|-------|
| arabicas | | | | | | |
| Rees & Theaker (1977) | Kenya | 6,6 | 2,0 | 0,2 | 0,4 | 2,6 |
| | | 8,4 | 1,0 | - | 0,2 | 1,2 |
| Van der Stegen & Van Duijn (1980) | Colômbia | - | 1,89 | 0,25 | 0,5 | 2,64 |
| | | 7 | 2,11 | 0,59 | 0,18 | 2,88 |
| Ohiokpehai (1982) | Tanzânia | 10 | 1,37 | 0,48 | 0,18 | 2,03 |
| | | 11 | 1,19 | 0,46 | 0,18 | 1,83 |
| Purdon & McCamey (1987) | - | L ± 21,7 | 2,20 | - | - | - |
| robustas | | | | | | |
| Rees & Theaker (1977) | Zaire | 4,9 | 1,6 | 0,4 | 0,6 | 2,6 |
| | | 8,9 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,6 |
| Purdon & McCamey (1987) | - | L ± 21,7 | 2,31 | - | - | - |

mentação, com alguns fragmentos sendo perdidos nos gases do torrador; e. polimerização; f. associação com proteínas desnaturadas / degradadas. E de acordo com CLARKE & MACRAE (1985), embora tenham sido extensivamente medidos, ainda não foram estudados em profundidade em razão de sua complexidade.

Durante o processo de torração, modificações ocorrem na composição do CGA em ambos os cafés, *arabica* e *robusta*. No café *arabica* sob condições de torração clara, a concentração do 5-CQA diminuiu significativamente, enquanto a do 4-CQA diminuiu apenas levemente e a do 3-CQA aumentou (Tabela 12). Este aumento do 3-isômero após a torração foi observado por MAIER & GRIMSEHL (1982). A formação do 3-CQA na torração, pode surgir da isomerização do 5-isômero (presente em maior concentração) ou da decomposição parcial dos ácidos dicafeoilquínico.

3.9.2.5.1. Perda Relativa de Matéria Seca

Acredita-se que a perda dos ácidos clorogênicos totais tenha uma função aproximadamente linear com a perda da matéria seca total. CLARKE & MACRAE (1985) substanciando este ponto de vista sugeriram que, 8 a 10% do teor de CGA original foi perdido para cada 1% de redução da matéria seca. O café *robusta* quando submetido a uma torração escura perdeu de 8 a 9 gramas de CGA por 100 g de grãos verdes, enquanto que no café *arabica* a perda foi de 5 a 6 gramas. O *robusta* perdeu ligeiramente mais 5-CQA, e aproximadamente 2x mais FQA e diCQA comparado ao *arabica* (CLARKE & MACRAE, 1985).

Os ácidos clorogênicos sob condições de torração média e severa, foram perdidos em torno de 60% e quase 100%, respectivamente, e com consideráveis diferenças nas taxas de degradação dos isômeros individualmente (TRUGO & MACRAE, 1984). Para CLIFFORD (1972) e TRESSL et alii (1976), a um grau de torração média, aproximadamente metade do ácido clorogênico perdido, poderia

estar presente na fração dos pigmentos não-dialisáveis, como ácido quínico livre e fenóis livres de baixo peso molecular.

CLARKE & MACRAE (1985) observaram que os coeficientes de perda relativa de ácidos clorogênicos por segundo (Tabela 13), durante o processo de torração eram maiores no início, quando os grãos continham um alto conteúdo de água livre, o que indicava que a água propiciava as reações que estavam ocorrendo. O que poderia esclarecer muito das diferenças entre os subgrupos através da migração acila e da hidrólise, facilitados pelo alto teor de água livre. Assim como, que estes coeficientes eram idênticos na torração escura, mas distintamente diferentes nas torrações de menor grau de destruição térmica. Onde o 5-CQA foi rapidamente destruído ao passo que o 3-CQA era aparentemente produzido no *arabica*, e o subgrupo diCQA era destruído mais rapidamente do que o subgrupo CQA.

Investigando cineticamente o ácido clorogênico durante um processo de torração lento a um grau de torração médio (240°C / 0-10 minutos), em um café *arabica* colombiano, LELOUP et alii (1995) verificaram que a um tempo de torração pequeno (< que 2 minutos), os diCQA eram hidrolisados aos ácidos cafeoil quínico e ácido caféico. Concomitantemente, os isômeros do 5-CQA sofriam rápida esterificação, conduzindo a formação de ácido 5-cafeoil quínico ligado a carboidratos ou proteínas. A um tempo de torração longo, o ácido caféico e os isômeros do ácido quínico em qualquer uma das suas formas de ocorrência, começavam a se degradar gerando compostos fenólicos diversos (Figura 7).

3.9.2.5.2. Destino

O ácido quínico é um dos produtos formados do CGA durante a torração, mas o produzido não era suficiente para justificar todo o CGA extratável que tinha sido destruído, o que de acordo com BLANC (1977), MAIER & GRIMSEHL (1982)

TABELA 13: Perda de ácidos clorogênicos (CQA: 3, 4 e 5; diCQA: 3,4, 3,5 e 4,5; FQA: 5) (%)/segundo durante a torração de café (*arabica* e *robusta*) (dados recalculados de Trugo, 1984)

| Ácidos Clorogênicos | Perda (%) / segundos | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|------|------|------|------|---------|------|------|--|--|
| | arabica | | | | | robusta | | | | |
| | 210 | 300 | 390 | 570 | 150 | 210 | 420 | 480 | | |
| 3-CQA | 0,01 | 0,02 | 0,08 | 0,08 | 0,02 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | | |
| 4-CQA | 0,03 | 0,03 | 0,09 | 0,08 | 0,05 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | | |
| 5-CQA | 0,17 | 0,13 | 0,12 | 0,09 | 0,24 | 0,20 | 0,11 | 0,10 | | |
| Subgrupo | 0,14 | 0,11 | 0,11 | 0,09 | 0,19 | 0,18 | 0,11 | 0,10 | | |
| 3,4 diCQA | 0,15 | 0,13 | 0,12 | - | 0,27 | 0,22 | 0,12 | - | | |
| 3,5 diCQA | 0,21 | 0,15 | 0,13 | 0,09 | 0,27 | 0,22 | 0,12 | - | | |
| 4,5 diCQA | 0,15 | 0,11 | 0,12 | 0,08 | 0,25 | 0,20 | 0,11 | 0,10 | | |
| Subgrupo | 0,18 | 0,14 | 0,12 | 0,08 | 0,26 | 0,21 | 0,12 | 0,10 | | |
| 5-FQA | 0,16 | 0,11 | 0,11 | 0,08 | 0,20 | 0,18 | 0,11 | 0,10 | | |
| Total | 0,17 | 0,11 | 0,11 | 0,08 | 0,20 | 0,18 | 0,11 | 0,10 | | |

Fonte: CLARKE & MACRAE (1985)

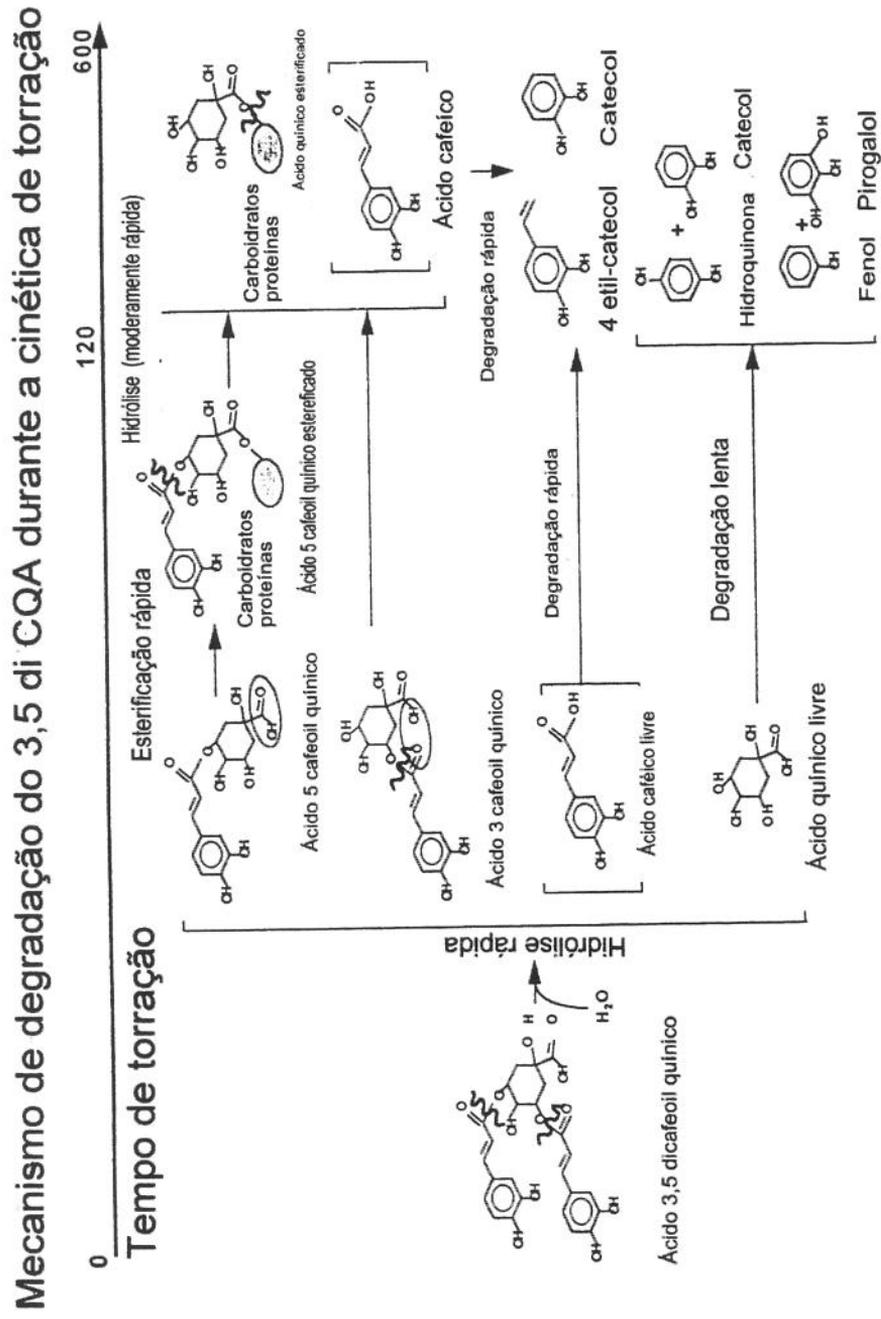


FIGURA 7: Sugestão para o mecanismo de degradação do 3,5 diCQA durante o processo de torração (tempo em segundos) (LELOUP et alii, 1995)

e OHIOKPEHAI (1982) sugeriu que os açúcares poderiam ter reagido com o ácido clorogênico e liberado o ácido quínico (NAKABAYASHI & KOJIMA, 1980). A reação térmica durante a torração, entre o ácido clorogênico e a sacarose com a formação de três pigmentos escuros foi confirmada por NAKABAYASHI & YAMADA (1987).

O ácido quínico pode epimerizar e/ou lactonizar sob condições de torração. A epimerização, particularmente na posição 4 era favorecida quando a hidroxila estava esterificada. Pelo menos uma quinida (ácido quínico lactona) e uma CGA lactona foram detectadas em extratos de café torrado (KÖNIG & STÜRM, 1982). As lactonas do ácido clorogênico foram produzidas no café torrado na faixa de 1,5 a 3,5 g/kg de amostra de café torrado comercial. As duas lactonas identificadas no café torrado eram 3-cafeoil- e 4-cafeoilquínico ácido- γ -lactona (BENNAT et alii, 1994).

Estudo de sistemas modelos com base em análises do café torrado sugeriu que os principais produtos do ácido quínico eram os catecóis (embora este também poderia formar-se do resíduo de ácido caféico), quinol, pirogalol e 1,2,4 trihidroxibenzeno. O ácido caféico se originava principalmente do 4 metil, 4 etil e 4 vinil catecóis e do 3,4 dihidroxicinalmaldeído. Os outros ácidos cinâmicos produziam produtos correspondentes em percentuais de rendimentos similares, exceto os benzaldeídos substituídos do cinalmaldeído (TRESSL et alii, 1976).

A quantidade destes fenóis encontrados nos cafés torrados geralmente refletiam os níveis de seus precursores em grãos de café verde (ex: os catecóis excediam os guaiacóis nos *arabicas* e *robustas*). De acordo com TRESSL et alii (1976), durante a extração comercial ou preparo doméstico da bebida de café, alguma migração ou degradação acila poderia ocorrer.

Durante a torração, os difenóis, 4-etilpirocatecol e pirocatecol foram formados da metade dos isômeros do ácido caféico e metade do ácido quínico, produzindo fenol e ácido benzóico, bem como todos os di- e trihidroxibenzenos. A quantidade e o tipo de fenóis dependiam da variedade e das condições de torração (TRESSL et alii, 1978).

O alto conteúdo de guaiacóis em *robusta* torrados, comparados aos *arabicas*, segundo MAGA (1978) poderia estar associado com a grande destruição do FQA durante a torração. Similarmente, os altos conteúdos de catecol e 4 metilcatecol em *robustas* torrados, poderiam estar ligados a grande destruição de ácido caféico e resíduos do ácido quínico. Porém, a simples relação produto-precursor, não pode explicar os altos conteúdos de vários outros compostos estruturalmente relacionados aos fenóis em *arabicas*.

IWAHASHI et alii (1990) verificaram que o ácido caféico exercia um efeito aparentemente conflitante na formação de radicais hidroxila. Dependendo sobretudo das condições, o ácido caféico intensificava ou inibia a formação de radicais hidroxila. Onde o efeito inibitório da formação dos radicais hidroxila, parecia ser devido a quelação dos íons ferro pelo catecóis.

Componentes dos grãos de café, como ácidos caféico, quínico e clorogênico, cafeína, sacarose e glicina que não contém H_2O_2 em sua estrutura, quando torrados da mesma maneira de que os grãos de café e preparados em uma infusão, formavam H_2O_2 . A formação de H_2O_2 a partir do ácido caféico torrado era significativa. Pois quanto maior o grau de torração, maior era a formação de H_2O_2 nos grãos de café (TSUJI et alii, 1991). Assim como, que a taxa de formação do peróxido de hidrogênio no café era dependente de um número de fatores como: tensão de oxigênio, pH, temperatura da água durante o preparo da bebida, e disponibilidade de metais de transição. O que poderia explicar as grandes flutuações nos níveis de peróxido de hidrogênio reportados na literatura (STADLER et alii, 1996).

3.9.2.5.3. Relação entre 5-CQA e a Cafeína

PICTET & REHACEK (1982) estabeleceram que a perda progressiva de ácido clorogênico, acompanhada de um constituinte estável a torração, como a cafeína, poderia ser usado para monitorar a severidade da torração.

PURDON & McCAMEY (1987) usaram a relação entre o ácido 5-cafeoilquínico (5-CQA) e cafeína para monitorar o processo de torração. Onde verificaram, que o 5-CQA foi o mais proeminente isômero em todos os tipos de cafés verde e torrados, e era degradado a uma extensão maior que cada um dos outros dois isômeros, durante a torração. A concentração de 5-CQA era aproximadamente a mesma para as diferentes espécies de grãos, enquanto que a cafeína era estabelecida em uma concentração significativamente maior no *robusta* que no *arabica* (Tabela 14), o que resultava em uma relação significativamente menor para o *robusta*.

O 5-CQA degrada-se a ácido quínico e a muitos compostos fenólicos durante o processo de torração (Figura 8), ao passo que, a cafeína permanece inalterada. Através da utilização de cafeína como um “padrão interno”, a concentração de ácido clorogênico pode ser monitorada independente da perda de peso, devido a perda de voláteis durante a torração (ex: perda de água). Assim, para uma mesma mistura de grãos, a relação 5-CQA/Cafeína se constituiu

TABELA 14: Concentração do ácido 5-cafeoil quínico (5-CQA) (%), cafeína (CF) (%), e da relação 5-CQA/CF, nos grãos de café verde e torrado (*arabica* e *robusta*)

| Espécie | Beneficiamento | Antes Torração | | | Após Torração | | |
|----------------|----------------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|
| | | 5-CQA | Cafeína | 5-CQA/CF | 5-CQA | Cafeína | 5-CQA/CF |
| <i>arabica</i> | úmida | 3,08 | 0,71 | 4,34 | 1,19 | 0,91 | 1,31 |
| | úmida | 2,56 | 0,64 | 4,00 | 0,95 | 0,88 | 1,08 |
| | úmida | 2,58 | 0,60 | 4,30 | 1,15 | 0,78 | 1,22 |
| | úmida | 3,10 | 0,78 | 3,97 | 0,99 | 0,88 | 1,12 |
| | seca | 2,55 | 0,71 | 3,59 | 1,13 | 0,85 | 1,32 |
| <i>robusta</i> | seca | 2,87 | 1,38 | 2,08 | 1,23 | 1,23 | 1,00 |
| | seca | 3,21 | 1,48 | 2,17 | 0,92 | 1,65 | 0,56 |
| | seca | 2,78 | 1,38 | 2,01 | 1,13 | 1,60 | 0,71 |

Fonte: PURDON & McCAMEY (1987)

em uma rápida e eficiente medida do grau de torração (PURDON & McCAMEY, 1987).

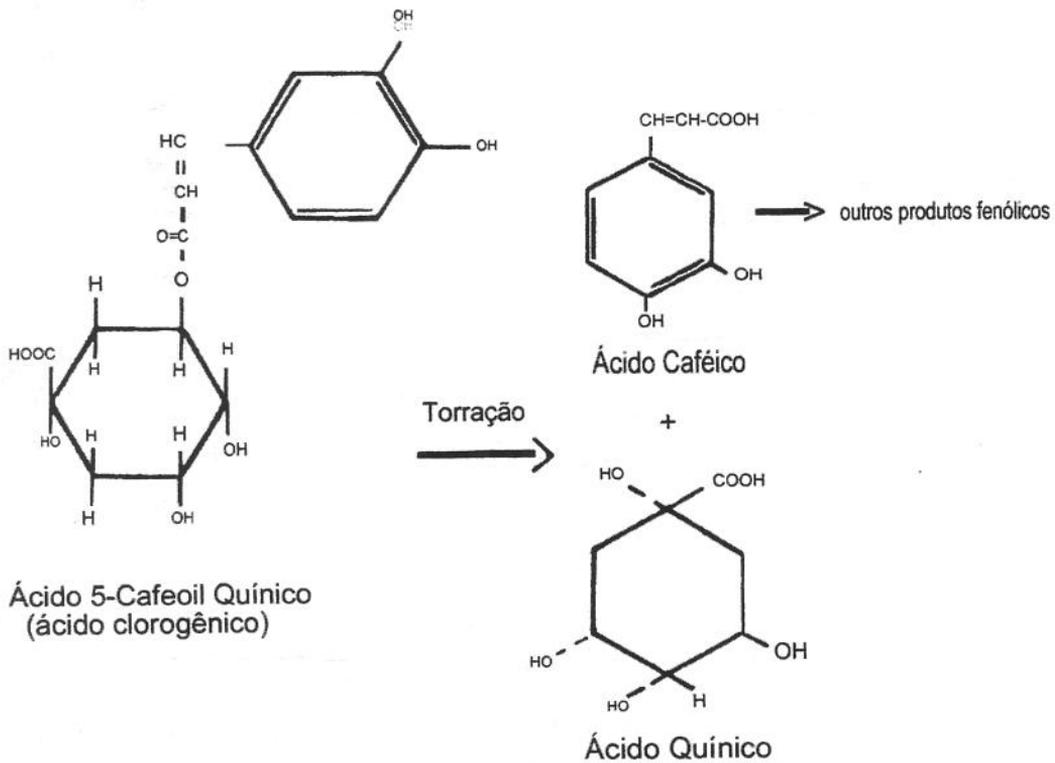


FIGURA 8: Reação do ácido clorogênico (5-CQA) durante a torração do café (HUGHES & THORPE, 1987)

3.9.2.6. Bebida e a Característica Sensorial

Os ácidos clorogênicos encontram-se ionizados aos valores de pH da bebida e palato, entretanto, unicamente o ácido fosfórico ($pK = 1,96$) produz uma significativa contribuição para a acidez, mesmo em uma torração clara. Todavia, pode-se esperar uma contribuição organoléptica de alguns dos ânions clorogenados, como o 5-CQA, pois sua concentração frequentemente excede o

limiar de percepção sensorial, mesmo em bebidas fracas (0,5% p/v de sólidos) (OHIOKPEHAI et alii, 1982)

A acidez da bebida é maior nos *arabica* torrados do que nos *robustas* torrados, maior para o café preparado por via úmida do que por via seca, maior na torração média do que na torração forte, e maior nos torradores com pressão do que nos torradores comuns (SIVETZ, 1972). Onde a menor acidez da bebida de uma torração forte, tem sido atribuída à destruição dos ácidos clorogênicos (LENTNER & DEATHERAGE, 1959; KUNG et alii, 1967; FELDMAN et alii, 1969) e a ligação dos ácidos a matriz do grão (NAKABAYASHI, 1978). Os ácidos clorogênicos a uma perda de pirólise acima de 5%, foram destruídos em uma grande extensão, resultando na elevação do valor de pH do grão torrado. Esta elevação do pH foi cerca de 0,2 unidades no valor de pH da bebida (SIVETZ, 1972).

BIRCH & LINDLEY (1973) estudando os ciclitóis em suas diferentes notas de amargor, verificaram que os mesmos eram produzidos de acordo com a introdução de sítios deoxi e/ou a acilação de grupos hidroxilas. O aumento de amargor na sequência: ácido quínico (nenhum amargor) < 5-CQA (pouco) < diCQA estava de acordo com estas observações. Os limites mínimos de detecção sensorial em água e na bebida de café para 5-CQA e os diCQA ficaram na faixa de 0,05 - 0,1 mg/mL. CLIFFORD & OHIOKPEHAI (1983) observaram que a presença do 5-CQA reduzia a adstringência dos diCQA, julgada objetiva e subjetivamente, e propuseram um mecanismo competitivo para este fenômeno (CLIFFORD & WILLSON, 1985).

Se os ácidos clorogênicos realmente proporcionam alguma contribuição sensorial significativa para a bebida, parece que os diCQA e também os ácidos feruloilquínico (no caso ácido 5-feruloilquínico) sejam os principais ácidos clorogênicos responsáveis por esta propriedade. Onde o 4,5-diCQA pode tomar

um importante papel no efeito sensorial negativo da bebida de café, uma vez que a sua concentração foi sempre maior no café *robusta* (TRUGO & MACRAE, 1984).

O café *robusta* possuindo um alto conteúdo de CGA, particularmente FQA e diCQA, talvez sejam os responsáveis pelo aroma de fumaça e pelo gosto mais adstringente, respectivamente (CLIFFORD & WILLSON, 1985). Esta maior concentração de FQA, no café *robusta* verde em comparação ao *arabica*, originava uma maior concentração de guaiacóis no café torrado, pela sua maior decomposição térmica no processo de torração (MAGA, 1978). E segundo TRESSL et alii (1979), altos níveis de guaiacol também eram responsáveis pela produção de notas de fumaça adocicada no café torrado.

É de conhecimento que os cafés *robusta* sejam inferiores em qualidade em comparação ao *arabica*, uma tentativa para correlacionar a qualidade da bebida foi relacioná-la inversamente com a concentração dos ácidos clorogênicos (CLIFFORD, 1979). Contudo, AMORIM et alii (1973) observaram que os melhores cafés *arabicas* brasileiros moles possuíam um baixo teor de ácidos clorogênicos em relação aos de pior qualidade, os quais tinham um gosto Rio. Todavia, estes dados ainda indicavam que da mesma forma que os de pior qualidade não necessariamente tinham um maior conteúdo de ácidos clorogênicos que os de qualidade intermediária.

Para CLARKE & MACRAE (1985), a suposição de que o baixo conteúdo de ácidos clorogênicos do café *arabica* esteja originalmente associado com a qualidade superior de sua bebida. Necessita ainda de um maior aprendizado a cerca do destino dos ácidos clorogênicos, antes desta suposição ser devidamente avaliada.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

4.1.1. Seleção da Matéria-Prima

Os grãos de café (cereja descascados) verde usados neste estudo foram *Coffea arabica* cvs Catuai amarelo e vermelho e Mundo Novo, oriundos da Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé Ltda, Guaxupé, Minas Gerais, misturados de modo a obter as qualidades da bebida de café (classificação realizada por análise sensorial denominada como prova da xícara) comercialmente disponíveis no mercado interno e internacional, como café duro para melhor, café mole e estritamente mole. Foram colhidos na safra 96/97 os cafés, mole e estritamente mole, e na safra 97/98 o café duro para melhor, beneficiados e classificados para a obtenção de um tamanho uniforme, na faixa de 6 a 7 mm, correspondente a peneira nº 16. Os 180 kg de cada tipo de qualidade de café foram separados em sacas de 4 kg e dentre estas, sete, escolhidas ao acaso, foram usadas neste estudo.

O objetivo de se realizar um trabalho com a mistura de variedades da espécie *arabica* foi o de conhecer as características dos diferentes níveis de classificação da bebida de café em relação ao seu respectivo produto torrado, porque é desta forma que o café é comercializado no mercado interno e externo.

4.1.2. Equipamentos

4.1.2.1. Processo de Torração do Café

- Torrador de Provas de Café PROBAT WERK®, modelo PRE 1 Z (simulador do processo de torração convencional), com controle digital de programação de

temperatura WEST[®], modelo 6100 (Figura 9)

- Secador rotativo combinado a ar quente e microondas de operação contínua, desenvolvido no Laboratório de Microondas do DEA/FEA/UNICAMP (MARSAIOLI, 1991) e dotado de um sistema de alimentação e transporte dos grãos de café (Figura 10)
- Sistema para avaliação contínua da potência de microondas
- Termômetro de infravermelho RAYTEK[®], modelo RAYNGER PM PLUS, para uma faixa de leitura de -18 a 870°C (exatidão de $\pm 1^\circ\text{C}$ e precisão de $0,5^\circ\text{C}$), para medição da temperatura de torração no interior da cavidade de microondas
- Moinho de disco para moagem de café CAGGIA ESPAÑOLA S.A.[®], modelo ITALCREM (comercialmente usado para café)
- Seladora a vácuo SELOVAC[®], modelo Jumbo

4.1.2.2. Análises Físicas e Químicas

- Paquímetro digital MITUTOYO[®], modelo CD-6 BS
- Determinador de atividade de água DECAGON[®], AQUA-LAB CX-2, com banho termostático BROOKFIELD[®], modelo TC 500
- Determinador de umidade por infravermelho OHAUS[®], modelo MB 200
- Estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ FANNEN[®]
- pHgâmetro ACCUMET FISHER SCIENTIFIC[®], modelo 150, com PROBE ATC (compensação automática de temperatura) para a determinação do pH (resolução: 0,1/0,001) e da concentração de íons (mV: 1/0,1)
- Espectrofotômetro COLORQUEST[®] II, HUNTERLAB[®], com sistema de reflectância e transmitância
- Sistemas para determinação das propriedades dielétricas HEWLETT PACKARD[®], modelo HP 85070 A
- Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiência (CLAE) WATERS ASSOCIATES[®], modelo 440, equipado com um detector de UV/VIS operando a 313 nm, um

módulo coletor de dados, um sistema isocrático, e uma coluna de fase reversa LICHROSORB RP 18 (MERCK®)

- Um padrão externo de cafeína (ALDRICH®), ácido 5-cafeoil quínico (5-CQA) (Sigma®) e ácido caféico (ALDRICH®). A quantificação foi realizada por padronização externa. As curvas de calibração foram construídas com 6 partes, que variavam de: 8 a 40 para cafeína; 0,2 a 70 para ácido 5-cafeoil quínico; e 4 a 50 µg/mL para o ácido caféico.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Processo de Torração

4.2.1.1. Sistema Convencional

As diferentes qualidades de café verde *arabica* (estritamente mole, mole e duro para melhor) foram torradas em um Torrador de Prova de Café, marca PROBAT WERK®, modelo PRE 1Z, tipo tambor rotativo horizontal, elétrico, dotado de controle digital para o controle de temperatura, marca WEST®, modelo 6100, (Figura 9) a uma quantidade de no máximo 100 g por batelada. O sistema convencional de torração foi realizado nas temperaturas de 210°C e 220°C de modo doméstico e rápido (industrial).

No modo doméstico, os grãos de café foram colocados no torrador, quando este encontrava-se a temperatura ambiente, ali permanecendo até atingirem as temperaturas de 210°C e 220°C, respectivamente. O tempo de residência no torrador foi dependente da qualidade de café *arabica*.

No modo rápido (industrial), primeiramente o torrador foi aquecido até a temperatura desejada, 210°C ou 220°C, para daí serem adicionados os grãos de café, causando com isto uma queda na temperatura do torrador. Com a elevação da temperatura novamente até o valor desejado, os grãos de café ali

permaneceram por um tempo suficiente, dependente da qualidade do café.

O resfriamento dos grãos após o processo de torra foi feito em duas etapas: a primeira com ar forçado ainda no torrador e a segunda com ar comprimido a temperatura ambiente, e a uma velocidade tal, combatível com o não arraste do produto. Posteriormente, os grãos permaneceram em repouso a temperatura ambiente por aproximadamente 2 horas, para logo em seguida, serem embalados a vácuo. Os cafés torrados foram adicionados a uma quantidade de cerca de 250g na embalagem, correspondente a três repetições do processo de torração.

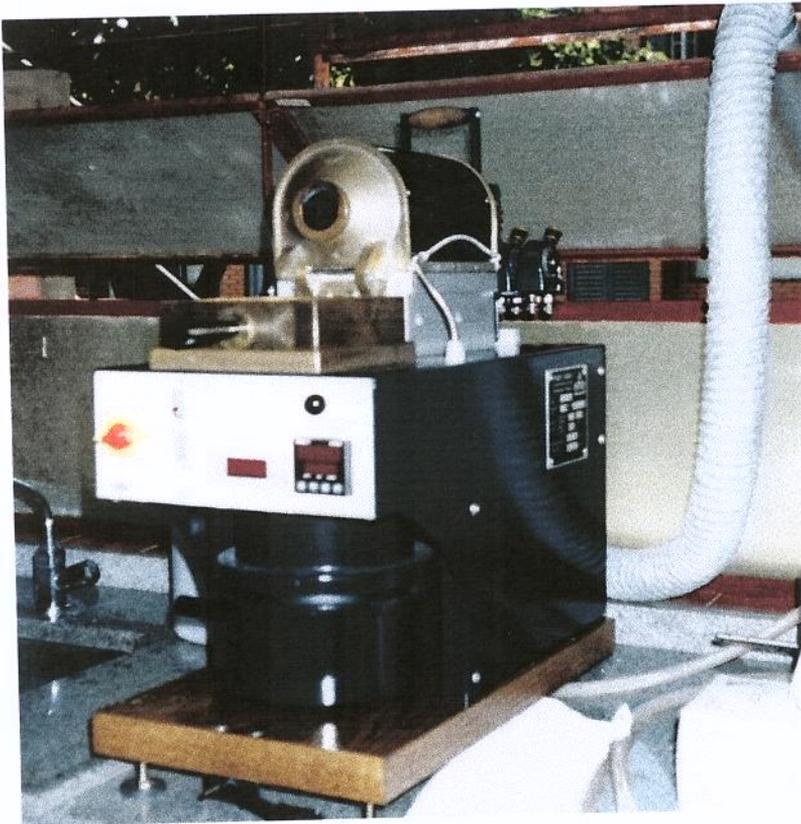


FIGURA 9: Torrador de Prova de Café PROBAT WERK®, modelo PRE 1Z: tipo tambor rotativo horizontal, elétrico, dotado de sistema digital para o controle da temperatura, marca WEST®, modelo 6100

O acondicionamento do café torrado, foi feito em embalagem comercial,

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions and activities. It emphasizes that this is crucial for ensuring transparency and accountability in the organization's operations.

2. The second part of the document outlines the various methods and tools used to collect and analyze data. It highlights the need for consistent and reliable data collection processes to support effective decision-making.

3. The third part of the document focuses on the role of technology in data management and analysis. It discusses how modern software solutions can streamline data collection, storage, and reporting, thereby improving efficiency and accuracy.

4. The fourth part of the document addresses the challenges associated with data management, such as data quality, security, and privacy. It provides strategies to mitigate these risks and ensure that data is used responsibly and ethically.

5. The fifth part of the document concludes by summarizing the key findings and recommendations. It stresses the importance of ongoing monitoring and evaluation to ensure that data management practices remain effective and aligned with the organization's goals.

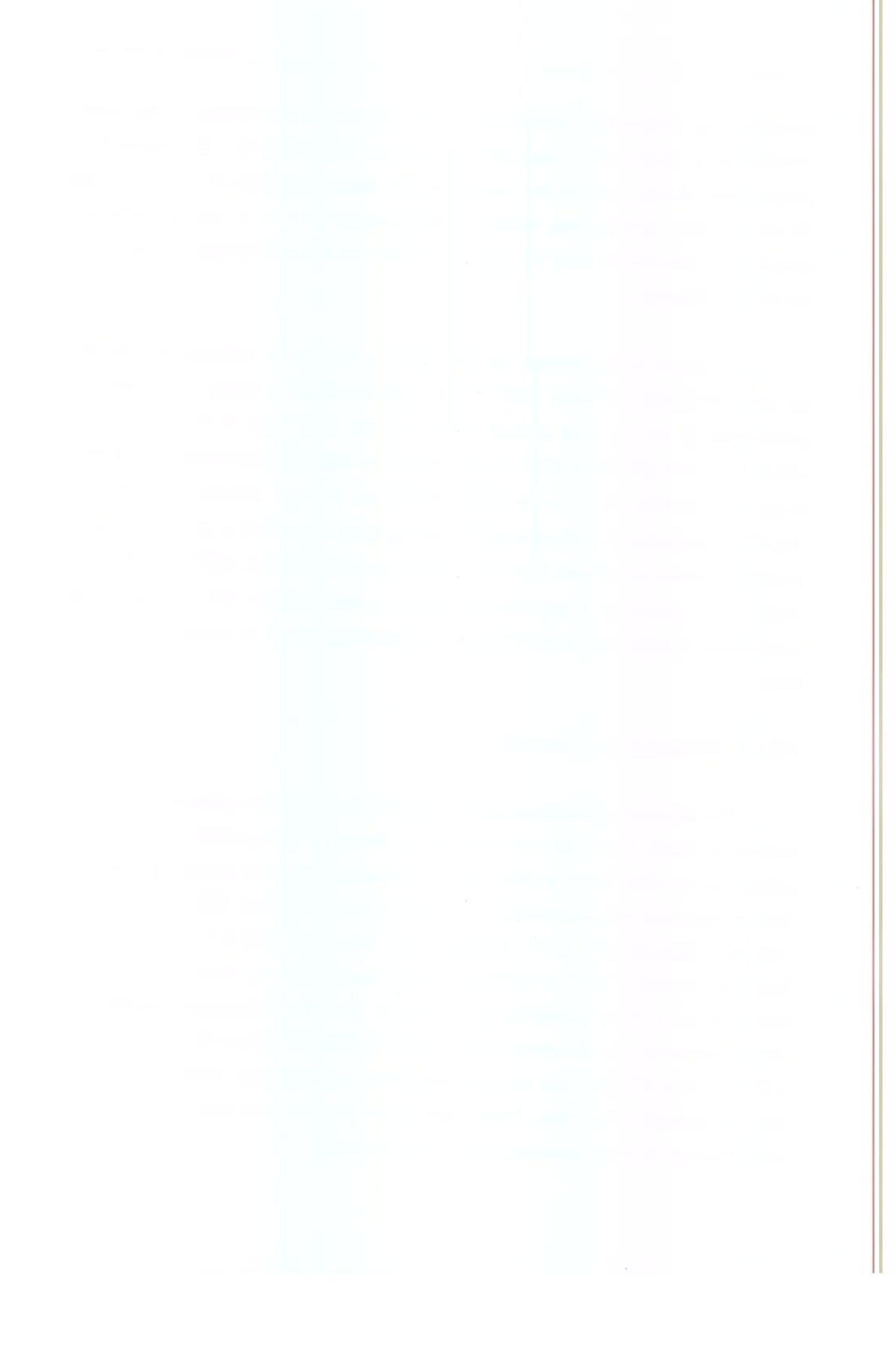
6. Finally, the document provides a list of references and resources for further reading. It includes links to relevant articles, books, and industry reports that can provide additional insights into data management best practices.

composta de polietileno tereftalato (PET) metalizado e polietileno de baixa densidade, e logo após, realizado o vácuo nas mesmas, de maneira a proporcionar, a manutenção das características físicas, químicas e organolépticas do café torrado, assim como, evitar a contaminação do mesmo com substâncias externas. O armazenamento foi feito a temperatura de aproximadamente -20°C , até a sua utilização.

A moagem das amostras de café verde e torrado foi realizada em moinho de disco BEGGIA[®], modelo ITALCREM (comercialmente usado para café). A granulometria do pó para o café verde foi de: 1,41 mm (5,77%), 1,18 mm (25,60%), 1 mm (28,73%), 0,85 mm (28,25%), ou seja, 82,58% partículas na faixa entre 1190 a 840 μm . E a do café torrado de 1,0 mm (46,83%) a 0,85 mm (42,45%), equivalente a 89,28% partículas na faixa entre 988 a 840 μm , grau de moagem médio de acordo com os padrões americanos (CLARKE & MACRAE, 1989). As amostras, imediatamente após a sua retirada do “freezer” foram submetidas a moagem, atingindo uma temperatura de no máximo 20°C ao seu final.

4.2.1.2. Sistema por Microondas

Os cafés cerejas descascados de diferentes tipos de qualidade (duro para melhor e mole) foram torrados por um sistema de microondas (Figura 10), a potências de 3500, 3700 e 3850 Watts, compreendendo as seguintes condições de temperaturas (massa de café) a um tempo de 12 minutos: 129°C a 3500 W no café duro para melhor; 127°C a 3500 W no café mole; 139°C a 3700 W no café duro para melhor; 137°C a 3700 W no café mole; 139°C a 3850 W no café duro para melhor; e 139°C a 3850 W no café mole. O café estritamente mole não pode ser torrado pela ação das microondas porque a 3500 W e a um minuto e a 2500 W e 3 minutos e 40 segundos de processamento, o grão sofreu carbonização. Logo após a torração, os grãos foram resfriados com ar comprimido nas mesmas condições do sistema de aquecimento convencional.



A temperatura da massa de café foi tomada com auxílio de um termômetro de infravermelho RAYTEC® (modelo RAYNGER PM PLUS), antes da exposição às microondas no depósito de café na entrada do secador, durante o processo de torração no interior da cavidade de microondas, através da inclusão de uma curva H de guia de onda dotada de um tubo de visualização com comprimento de onda de corte, e na saída, onde as amostras foram coletadas.

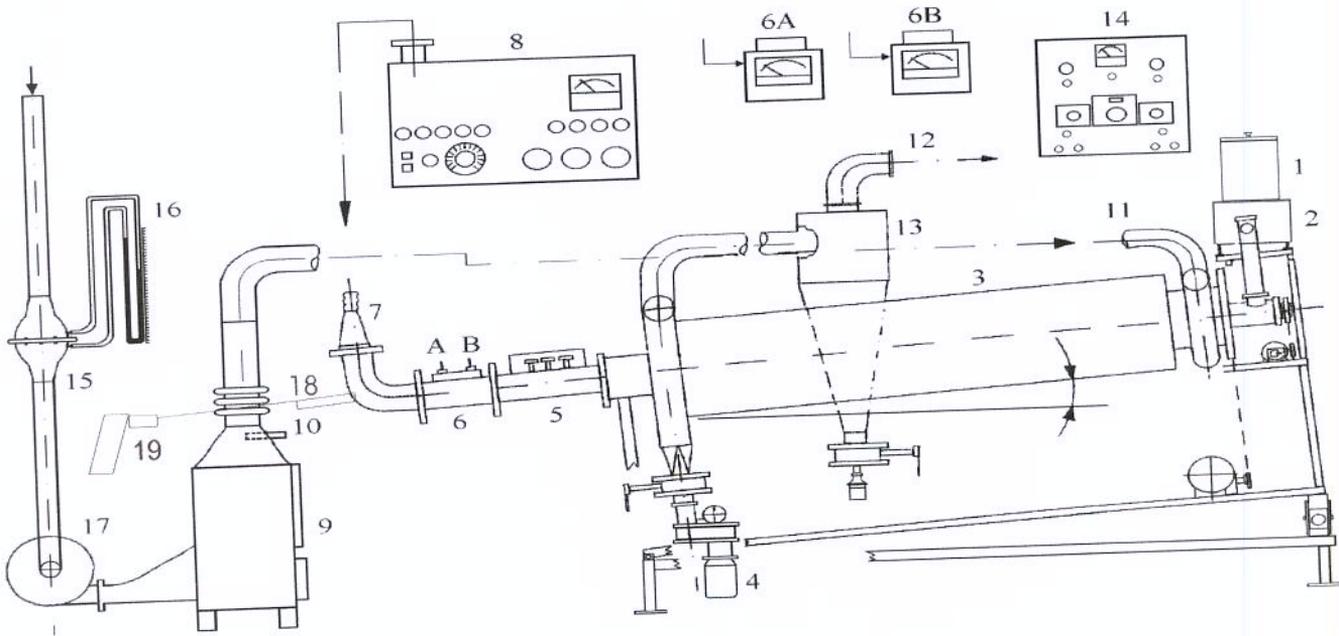


FIGURA 10: Desenho esquemático do aplicador de microondas utilizado para a torração: (1) Depósito de café; (2) Alimentador; (3) Cavidade de microondas (MO); (4) Café seco; (5) Toco triplo; (6) A/B Sistema medidor de MO; (7) Guia de onda flexível; (8) Gerador de MO; (9) Aquecedor de ar; (10) Sensor de temperatura; (11)/(12) Entrada de ar/exaustão; (13) Ciclone; (14) Painel de controle; (15)/(16) Medidor de fluxo; (17) Ventilador; (18) Abertura do Guia para a Medição da Temperatura Interna; (19) Termômetro de Infravermelho



As condições do ar para o processo de torração foram ajustadas para uma temperatura de 100°C a uma vazão de 1,6 m³/minutos, fluxo paralelo com o produto, anterior a alimentação dos grãos de café. 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 efetuado através de uma válvula borboleta, sendo medida por uma célula de fluxo laminar (MERIAM[®], modelo 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 SF6, de procedência americana, com potência de saída variável de 0,5 a 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 da transferência de 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 alto valor de reflexão da energia do sistema (cavidade mais produto), seria feito um ajuste no "toco triplo" (um dispositivo para o casamento das impedâncias) para minimizar a reflexão, 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).

4.2.2. Métodos de Análise

4.2.2.1. Físicos

4.2.2.1.1. Determinação do Grau de Torração

O grau de torração foi determinado através do percentual da perda de peso (Pp) (%), pesando em balança analítica a amostra, antes e após torração (ORTOLÁ et alii, 1998).

4.2.2.1.2. Densidade Aparente

A densidade aparente (ρ) (g/mL) foi medida colocando-se um peso conhecido de grãos de café dentro de uma proveta de 25 mL, após vibração por 15 minutos, o volume ocupado foi determinado (GUTIÉRREZ et alii, 1993 e ORTOLÁ et alii, 1998).

4.2.2.1.3. Grau de Inchação do Grão de Café Torrado

O grau de inchação do grão de café torrado (GI) foi calculado em relação a densidade do grão verde e a do grão torrado (g/mL) em termos percentuais (CLARKE & MACRAE, 1989).

4.2.2.1.4. Aumento de Volume e de Tamanho do Grão

O aumento relativo de volume do grão (AVG) foi calculado para cada amostra a partir das densidades do grão verde e torrado e da perda de peso, segundo a equação:

$$AVG = \frac{\rho_{GV}}{\rho_{GT}} \left(1 - \frac{\Delta Pp}{100} \right) - 1$$

onde: ρ_{GV} : densidade do grão verde (g/mL); ρ_{GT} : densidade do grão torrado (g/mL) e ΔPp : perda de peso (%) (GUTIÉRREZ et alii, 1993 e ORTOLÁ et alii, 1998).

O aumento de tamanho do grão (ATG) foi calculado em relação ao diâmetro do grão verde e do grão torrado (mm) em termos percentuais (CLARKE & MACRAE, 1989).

4.2.2.1.5. Determinação da Atividade de Água

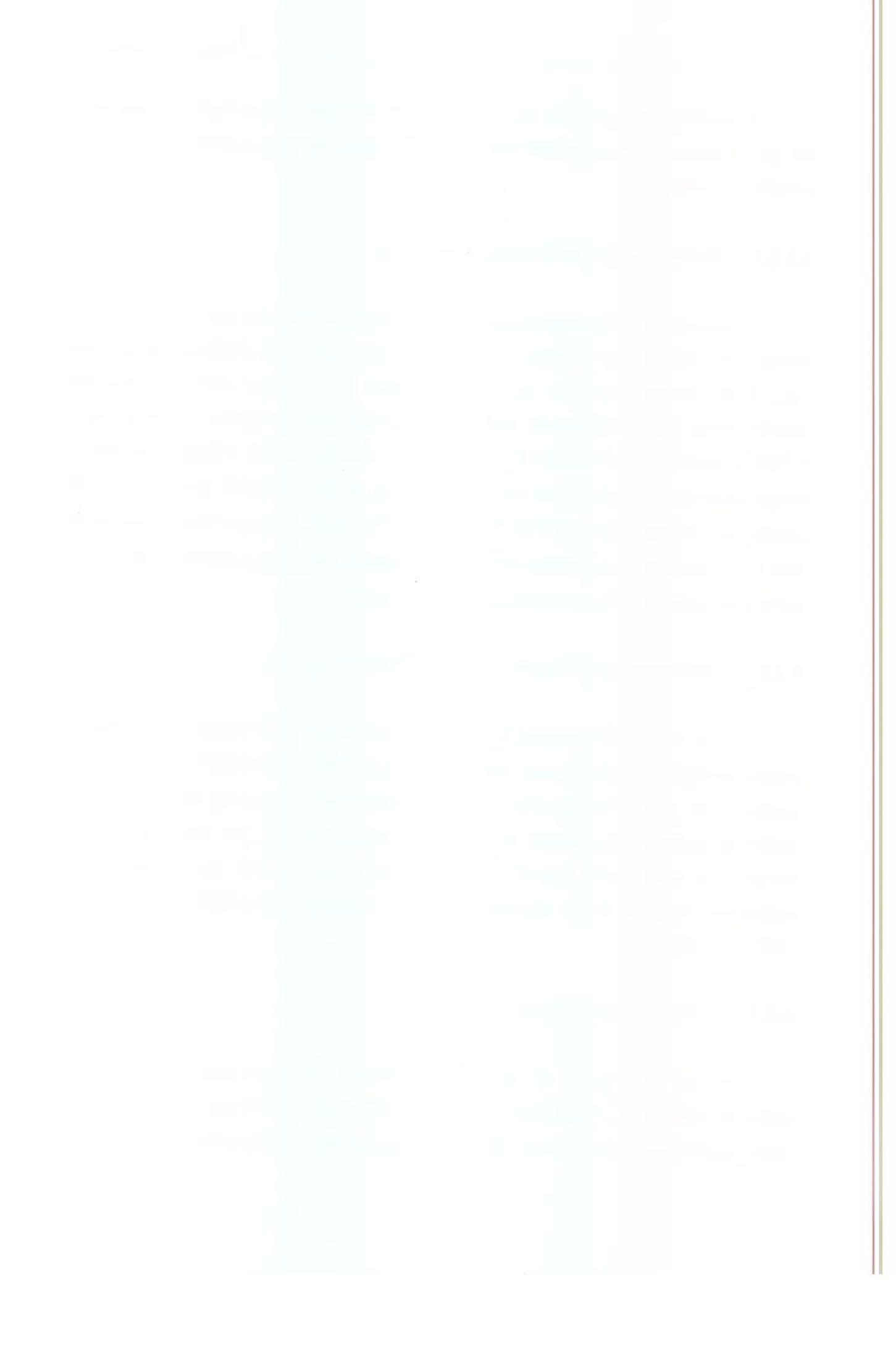
A medida experimental da atividade água (a_w) das amostras foi feita em um instrumento AQUA-LAB, digital, modelo CX-2, fabricado pela DEGAICON Devices Inc., EUA. O equipamento foi calibrado com 3 soluções salinas saturadas diferenciadas para a leitura do café verde (K_2CO_3 : 0,432; $MgNO_3$: 0,544 e $NaCl$: 0,755) e café torrado ($LiCl$: 0,113; $MgCl_2$: 0,331; K_2CO_3 : 0,432 e $MgNO_3$: 0,544). A temperatura para a leitura da a_w foi controlada a $20^\circ C \pm 0,2^\circ C$ com a ajuda de banho termostático (BROOKFIELD®, modelo TC 500). A leitura das amostras foi feita na mesma faixa de temperatura da calibração, com 6 repetições cada uma, e após calculada a média e o coeficiente de variação.

4.2.2.1.6. Determinação do pH e da Concentração Iônica

O pH e a concentração iônica (CI) (mV) foram determinados por método potenciométrico, utilizando-se de um pH ACCUMET FISHER SCIENTIFIC®, modelo 150, com PROBE ATC, com compensação automática de temperatura, calibrado periodicamente com as soluções padrões adequadas. Para as análises no grão de café verde e torrado foi preparada uma mistura de 1g de amostra moída em 9 g de água destilada a $25^\circ C$, segundo metodologia de BELL & LABUZA (1992).

4.2.2.1.7. Determinação de Cor

A cor dos grãos e pó de café foram determinados usando-se um espectrofotômetro COLORQUEST® II, HUNTERLAB®. As leituras foram realizadas com o aparelho ajustado para reflectância para as amostras na forma de grão e pó



e para transmitância na forma líquida (bebida), utilizando-se padrão branco nº C6299 de 03/96. A configuração incluiu iluminante D65 e ângulo 10° , e as leituras efetuadas pelo sistema CIELAB (L^* , a^* , b^*), calculando-se posteriormente os parâmetros de cor: diferença de luminosidade ($\Delta L^* = L^*_{TM} - L^*_{TI}$ onde TM : grão torrado e moído e TI : grão torrado inteiro), fator "f" ($f = L^*_{TM} - L^*_{IT} / L^*_{VM} - L^*_{IT}$ onde VM : grão verde moído) ou grau de uniformidade do tratamento térmico na torração, ângulo de matiz ($h^* = \arctan \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$), croma ou índice de saturação ($C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$), diferença de croma ($\Delta C^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$), diferença de matiz ($\Delta H^* = \sqrt{\Delta E^{*2} - \Delta L^{*2} - \Delta C^{*2}}$), diferença total da cor ($\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$) (LERICI et alii, 1980; ROTHFOS & OESTREICH-JANZEN, 1991; KIRKPATRICK et alii, 1992; MINOLTA, 1994; HUNTERLAB, 1996; PITTIA et alii, 1996; PIZZIRANI et alii, 1996; ÓRTOLA et alii, 1998).

4.2.2.1.8. Determinação das Propriedades Dielétricas

As propriedades dielétricas [coeficiente dielétrico (ϵ'), fator de perda dielétrica (ϵ'') e tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$)] dos cafés verde e torrado moído, foram determinadas usando um Determinador de Propriedades Dielétricas Hewlett Packard®, USA, modelo HP 85070 A, tendo como princípio o método da linha de transmissão. As leituras das amostras foram feitas através da colocação de um sensor de medida na superfície do produto a temperatura ambiente. Onde, os parâmetros acima foram obtidos dentro do espectro de varredura de 300 KHz a 6GHz, dados pelo equipamento para o ponto de frequência de 2450 MHz.

Os cálculos dos parâmetros [fator de perda dielétrica efetivo (ϵ''_{eff}), tangente de perda dielétrica efetiva ($\tan \delta_{eff}$), profundidade de penetração (dp), constante de atenuação (α) e de fase (β), intensidade de campo elétrico (E_{rms}) e energia dissipada por volume (P) (Watts/cm³)], foram realizadas a partir dos dados obtidos

pela leitura das propriedades dielétricas (ϵ' , ϵ'' , e $\text{Tan } \delta$), dados da literatura (permissividade do espaço livre, permeabilidade do espaço livre e permeabilidade magnética, frequência angular, calor específico do café e velocidade da onda eletromagnética no vácuo), parâmetro físico (densidade aparente do café verde e torrado) e condições de processamento por microondas (frequência, temperatura e tempo), desenvolvidas neste trabalho. O calor específico do café usado para o cálculo da intensidade do campo elétrico e da taxa de aumento de temperatura, foi o de 0,47 cal/g°C, referenciado por RAEMY & LAMBELET (1982), para o café *arabica*.

4.2.2.2. Químico

2.2.2.1. Determinação de Cafeína e dos Ácidos 5-Cafeoil Quínico e Caféico

4.2.2.2.1.1. Extração

Para a extração da cafeína e dos ácidos cafeoil quínico e caféico, foram tomadas 1 grama de amostra de café verde ou torrado moída e colocadas em um balão volumétrico de 100 mL, adicionado 50 mL de água fervente, e deixado em repouso por 5 minutos, resfriado e completado o volume com água destilada para 100 mL. Logo após foi retirada uma alíquota de 6 mL, a qual foi filtrada através de um cartucho de extração em fase sólida C-18 SEP-PAK® para dentro de um balão de 50 mL, com a realização de três lavagens com uma mistura de metanol e água (3:7), e em seguida completando o volume com a mesma solução (PURDON & McCAMEY, 1987).

4.2.2.2.1.2. Método Cromatográfico

A determinação de cafeína e dos ácidos cafeoil quínico e caféico foi realizada por cromatografia de fase reversa, utilizando-se um Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiência da WATER ASSOCIATES® (Milford, Massachusetts, USA), modelo 440, dotado com um detector de ultravioleta, operando a 313 nm, e uma coluna LiChrosorb RP18 (comprimento: 250 mm, diâmetro interno: 4 mm e tamanho da partícula: 10 µm) (MERCK®).

Para eluição, um sistema isocrático com 30% de metanol e 70% de água destilada, adicionado de ácido cítrico 0,05 M e de citrato tri-potássio 0,1 M (BOSCH et alii, 1996) em pH 6 (calculado pela equação $pH = pK_a + \text{Log} \frac{[A^-]}{[HA]}$ e analisado por pHgâmetro), a uma vazão de 1,5 mL/minuto, pressão de 0 a 0,14 atmosfera e atenuação de 0,05 AUFS (Absorbance Units Full Scale). A quantidade de amostra injetada foi de 20 microlitros, cada análise foi efetuada em triplicata, e a área do pico obtida através de um integrador de dados. A figura 11 exemplifica um cromatograma obtido de uma amostra de café duro para melhor verde.

A identificação da cafeína e dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico nas amostras foi efetuada pela comparação dos seus tempos de retenção com os dos respectivos padrões. Na avaliação da capacidade de recuperação foi realizado o preparo de uma solução padrão, contendo as três substâncias em concentrações semelhantes as encontradas nas amostras, e logo após, aplicada a metodologia analítica usada neste estudo.

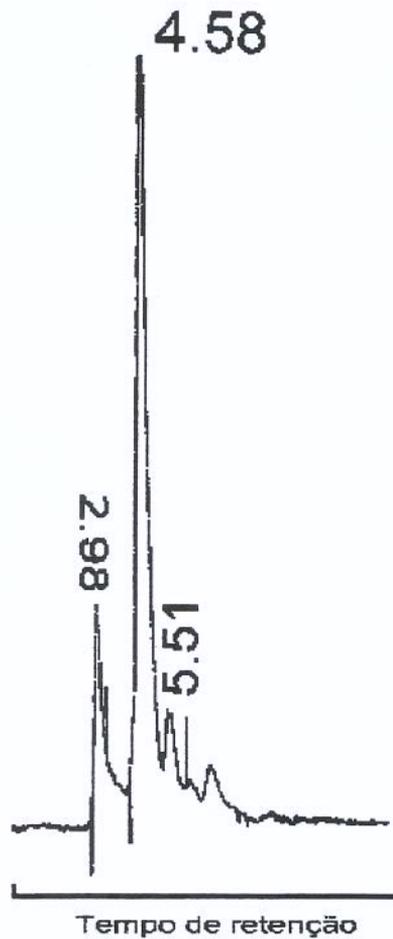


FIGURA 11: Cromatograma por CLAE de uma amostra de café duro para melhor verde. Condições cromatográficas: Coluna C18 (LICHROSORB) (250 mm x 4 mm e 10 μ m), fase móvel (metanol:água 30:70 v/v, e ácido cítrico:citrato de potássio 0,05M:0,1M em pH 6), fluxo de 1,5 mL/minuto, e detecção a 313 nm

4.2.2.3. Sensorial

A análise sensorial da bebida de café foi realizada por 2 classificadores e provadores de café. A prova consistiu na degustação de 10 g de café torrado e moído (granulometria grossa) em 90 mL de água fervente, e a degustação

realizada com a bebida de café a uma temperatura de 40°C, com 3 repetições por amostra.

4.3. Processamento dos Dados

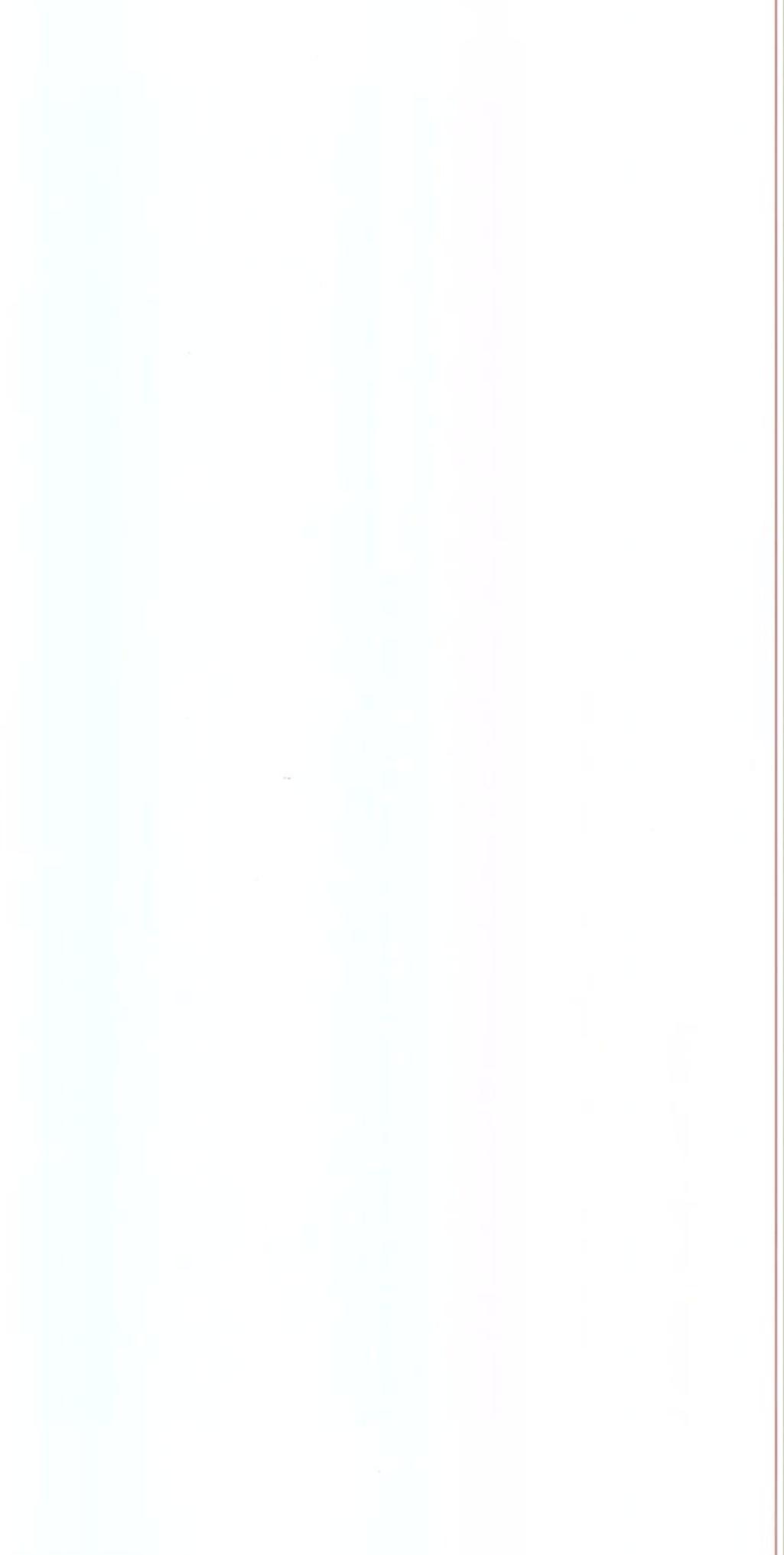
Para o processamento dos dados experimentais desenvolvidos neste trabalho foram utilizados os programas EXCEL v. 5.0 (1993) e ORIGIN v. 4.0 (1990 - 1996) da MICROSOFT CORPORATION®, USA.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização da Matéria-Prima (Física, Química e Dielétrica)

TABELA 15: Caracterização da matéria-prima quanto a sua composição física [grau de compactação do grão (relação entre o diâmetro e a densidade aparente), parâmetros de cor CIELAB (a^* , b^* , L^* , ΔL^* e fator de "f"), pH, concentração iônica (CI) (mV) e atividade de água (a_w)], química [cafeína (CF), ácido 5-cafeoil quinico (5-CQA) e ácido caféico (AC)] e dielétrica [coeficiente de atenuação (α) e profundidade de penetração (dp)]

| Parâmetros de Cor CIELAB | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------|---------|--------|------------------------------|------|-------|-------|-----------------------|----------|
| Compactação Grão | a^* | b^* | L^* | ΔL^* e "f" | pH | CI | a_w | CF | α |
| Café Duro para Melhor | | | | | | | | | |
| maior | verde | amarelo | mais | maior | 6,29 | 45,23 | 0,57 | predomínio 5-CQA e AC | maior |
| | | | escuro | desuniformidade | | | | menor [CF] | menor |
| Café Mole | | | | | | | | | |
| menor que duro e maior que ETM | verde | amarelo | mais | menor | 6,23 | 48,73 | 0,56 | predomínio CF | menor |
| | | | claro | uniformidade que café ETM | | | | menor [AC] | maior |
| Café Estritamente Mole | | | | | | | | | |
| menor | verde | amarelo | mais | maior | 6,18 | 51,97 | 0,57 | < predomínio CF | - |
| | | | claro | uniformidade | | | | menor [5-CQA] | |



5.2. Processo de Torração Convencional e por Microondas

5.2.1. Torração Convencional Doméstica e Rápida

5.2.1.1. Doméstica a 210°C e 220°C

O café duro para melhor quando torrado pelo método de aquecimento convencional doméstico a 210°C (D210) (onde cada 100 g de café verde se constituiu em um lote de torração), reportou um tempo médio de 10:34 minutos, em um coeficiente de variação acima de 10% (na faixa de 10,14 - 10,77%) para as temperaturas de: 160°C (7:16 minutos), 170°C (7:73 minutos), 180°C (8:38 minutos) e 190°C (8:95 minutos). Este mesmo café torrado a 220°C (D220), mostrou um tempo médio de 11:19 minutos, em um coeficiente de variação inferior a 3,32% (1,63% - 3,32%) (Figura 12).

O café mole, pelo método de aquecimento convencional doméstico a 210°C, foi torrado dentro de aproximadamente 10:33 minutos, em um coeficiente de variação inferior a 5,40% (faixa de 1,46% - 5,40%). E quando torrado a 220°C, o tempo médio foi de 11 minutos, em um coeficiente de variação inferior a 3,66% (0,43% - 3,66%). Para o café estritamente mole, café de maior qualidade, a torração doméstica a 210°C, foi realizada em cerca de 10:39 minutos, em um coeficiente de variação inferior a 4,98% (faixa de 1,35 - 4,98%), e quando torrado a 220°C, este foi de 11:08 minutos, em um coeficiente de variação inferior a 5,45% (1,34% - 5,45%) (Figura 12).

Pela D210, o café ETM foi o que apresentou o maior tempo de torração, e os cafés duro para melhor e mole, tempos praticamente iguais. Na D220, o café duro para melhor, foi o que levou mais tempo para torrar, e as outras duas qualidades de café em estudo, foram as que exibiram tempos de torração praticamente iguais. Em relação a perda de peso (%), as diferentes qualidades de



café (duro para melhor, mole e estritamente mole) quando torradas de modo doméstico a 210°C e a 220°C, não demonstraram diferenças significativas a nível de 5% de significância (Apêndice C), no entanto, entre as duas temperaturas 210°C e 220°C, as perdas de peso foram significativamente diferentes a 5% de significância, uma vez que os tempos de torração também foram significativos a $p < 0,05$ (Apêndice B).

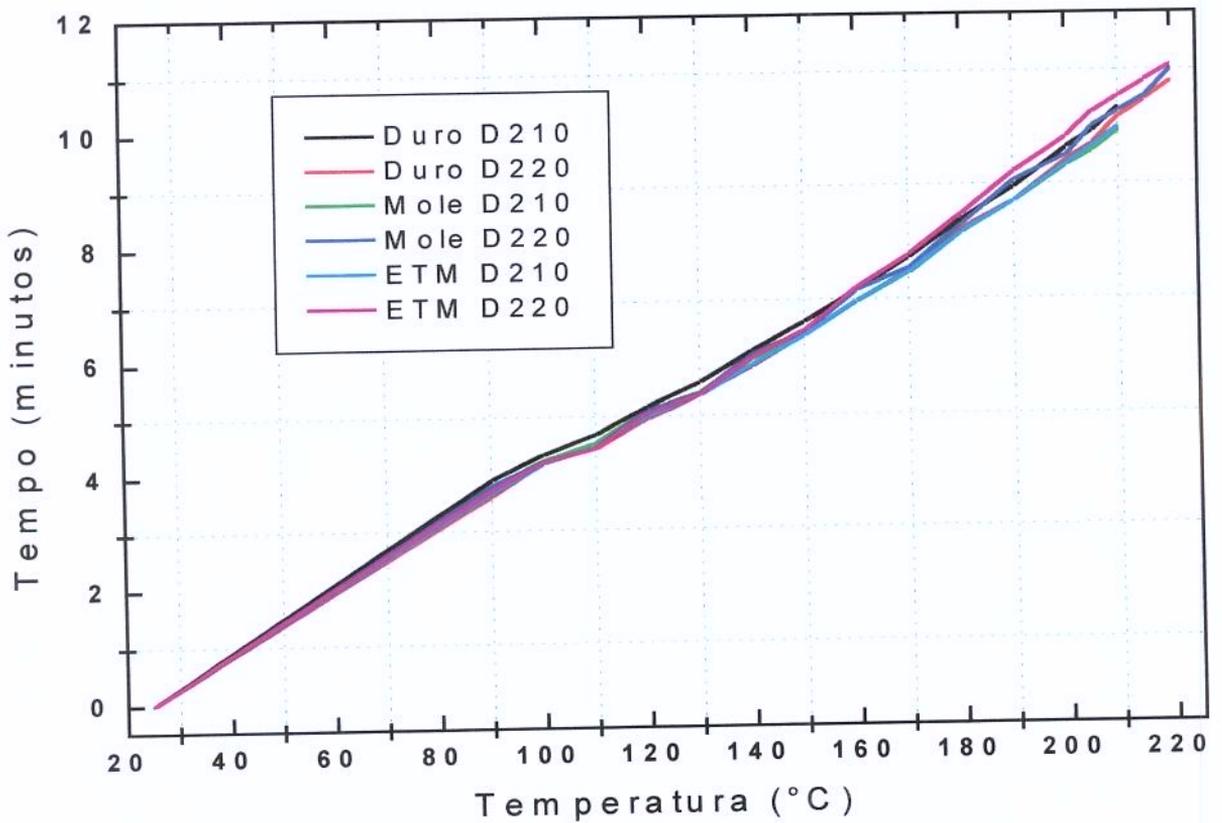
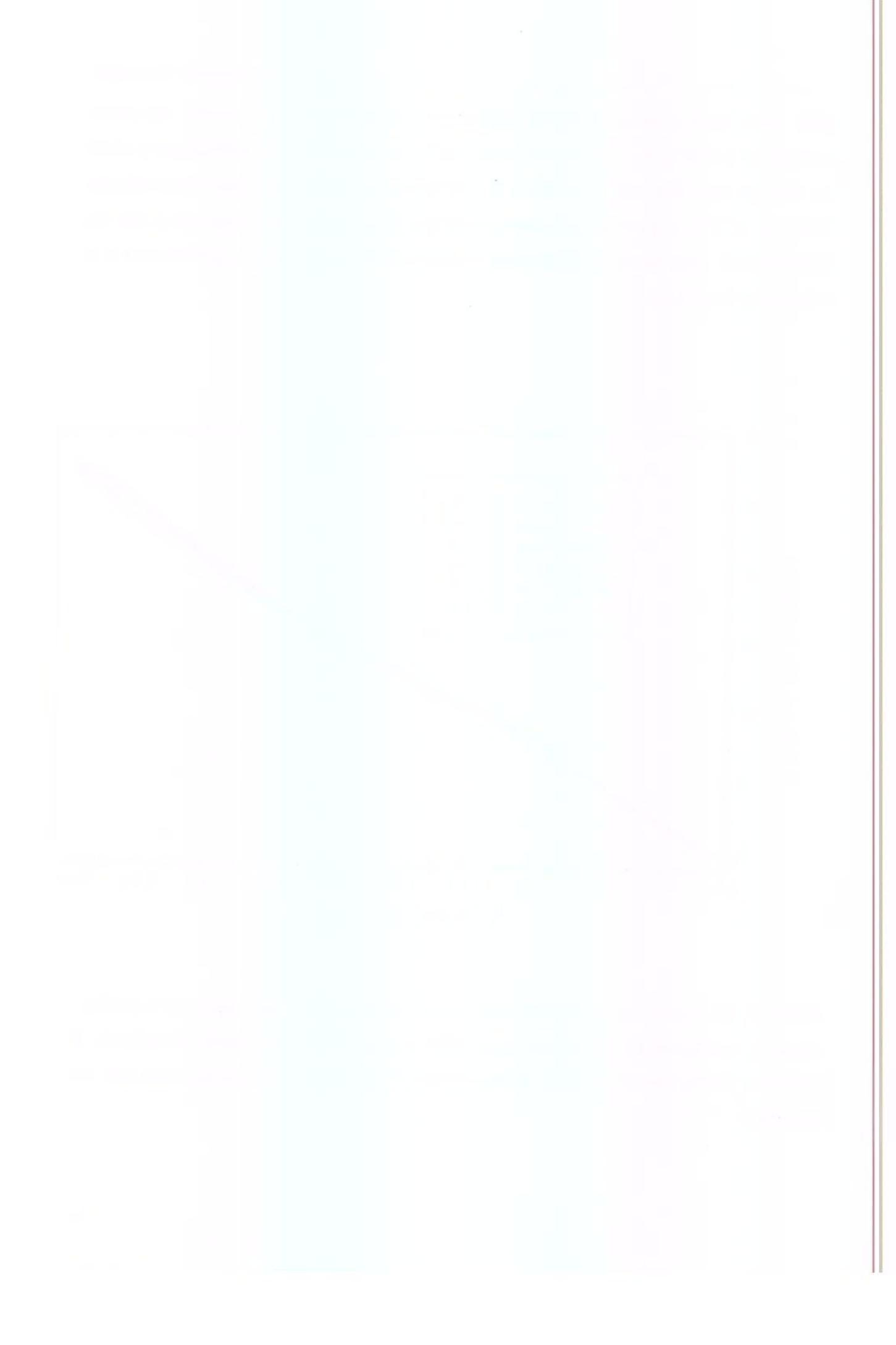


FIGURA 12: Comportamento das diferentes qualidades de café, duro para melhor, mole e estritamente mole, torradas pelo processo convencional doméstico a 210°C e 220°C (onde cada curva representa a média dos valores de cada lote de torração)



5.2.1.2. Rápida a 210°C e 220°C

No processo de torração rápida (industrial) (Figura 13), o tempo médio para atingir a temperatura de torração propriamente dita no processo convencional rápido, foi de: 4:56 minutos (coeficiente de variação de cada lote de 100g de café verde que foi torrado: 7,36%) a 210°C e de 4:31 minutos (coeficiente de variação: 2,58%) a 220°C para o café duro para melhor; 4:46 minutos (coeficiente de variação: 6,08%) a 210°C e de 5:25 minutos (coeficiente de variação (CV): 6,58%) a 220°C para o café mole; e 4,49 minutos (CV: 6,40%) a 210°C e de 4,49 minutos (CV: 1,63%) a 220°C para o café estritamente mole.

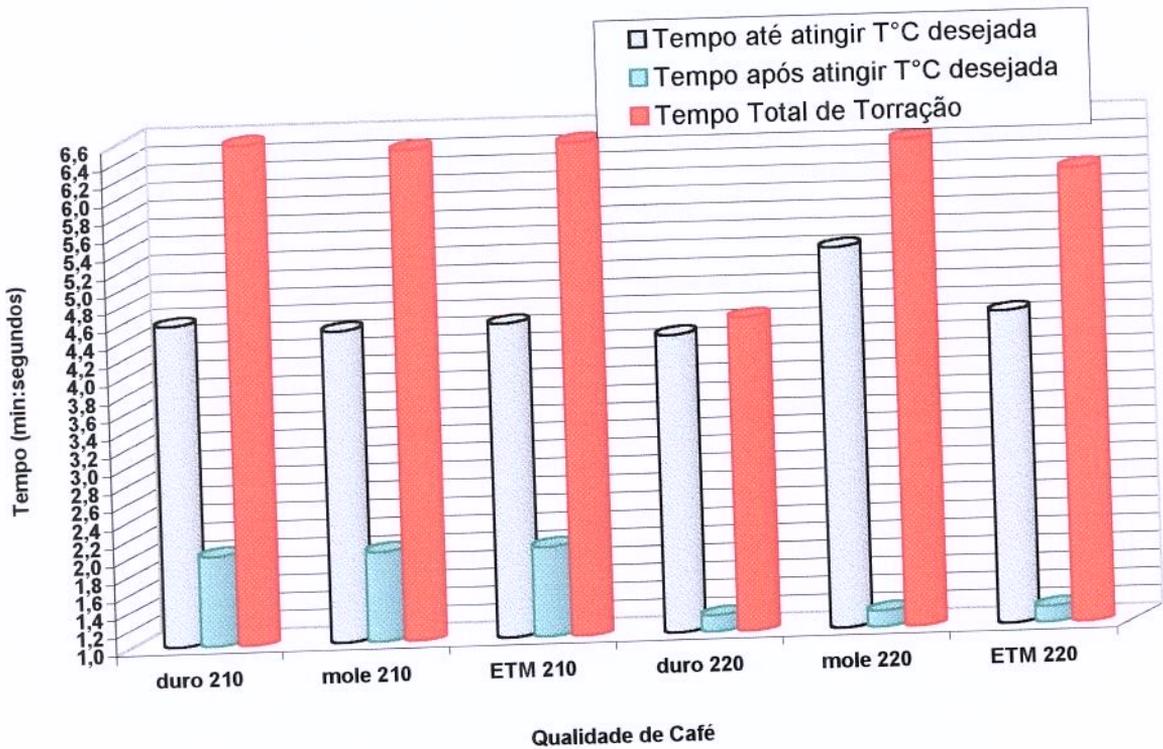


FIGURA 13: Comportamento das diferentes qualidades de café, duro para melhor, mole e estritamente mole, torradas pelo processo convencional rápido a 210°C e 220°C (onde cada coluna representa a média dos valores de cada etapa do processo de torração)

Na torração rápida a 210°C, o café mole foi o que torrou mais rápido, seguido do café ETM e duro para melhor, e na torração a 220°C, o café duro para melhor foi o que torrou em menor tempo, seguido do café ETM e mole. Se o tempo necessário para a temperatura de torração ser atingida, for considerado, entre as qualidades de café e entre as temperaturas de 210°C e 220°C, pode-se dizer que, não mostraram diferenças significativas a 5% de significância ($p < 0,05$) (Apêndice D). Todavia, o efeito da perda de peso (%) neste tipo de torração nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, foi significativo em 5% de significância, mas, não significativo entre as diferentes qualidades de café (Apêndice E).

O efeito da torração doméstica e rápida a 210°C e a 220°C e da qualidade do café, na perda de peso (%), foi significativo a nível de 5% de significância ($p < 0,05$) (Apêndice F), isto é, o tipo de aquecimento convencional produziu variações significativas nas perdas de peso sofridas pelas diferentes qualidades de café em estudo, assim como, que os cafés, duro para melhor, mole e ETM quando torrados por um mesmo tipo de torração convencional mostraram diferenças significativas em suas perdas de peso.

5.2.2. Torração por Microondas a 3500 W, 3700 W e 3850 W

Os cafés duro para melhor e mole (Figura 14), quando torrados pelo processo de aquecimento por microondas, produziram diferenças significativas na relação temperatura/tempo de torração a nível de 5% de significância (Apêndice G e H), a uma mesma potência de microondas e entre as potências de 3500W, 3700W e 3850W, e estas diferenças foram significativamente maiores para o café duro para melhor. Todavia, a torração por microondas nas 3 diferentes potências de aquecimento, não foi capaz de proporcionar diferenças significativas na perda de peso (%) a 5% de significância ($p < 0,05$) (Apêndice I),



bem como, não mostrou variações significativas na perda de peso (%) entre as duas qualidades de café.

Comparando os processos de torração convencional e microondas, na perda de peso (%) produzida nos cafés duro para melhor e mole, observou-se que as mesmas foram significativas a 5% significância ($p < 0,05$), contudo, não foram significativas nas diferentes qualidades de cafés (Apêndice J).

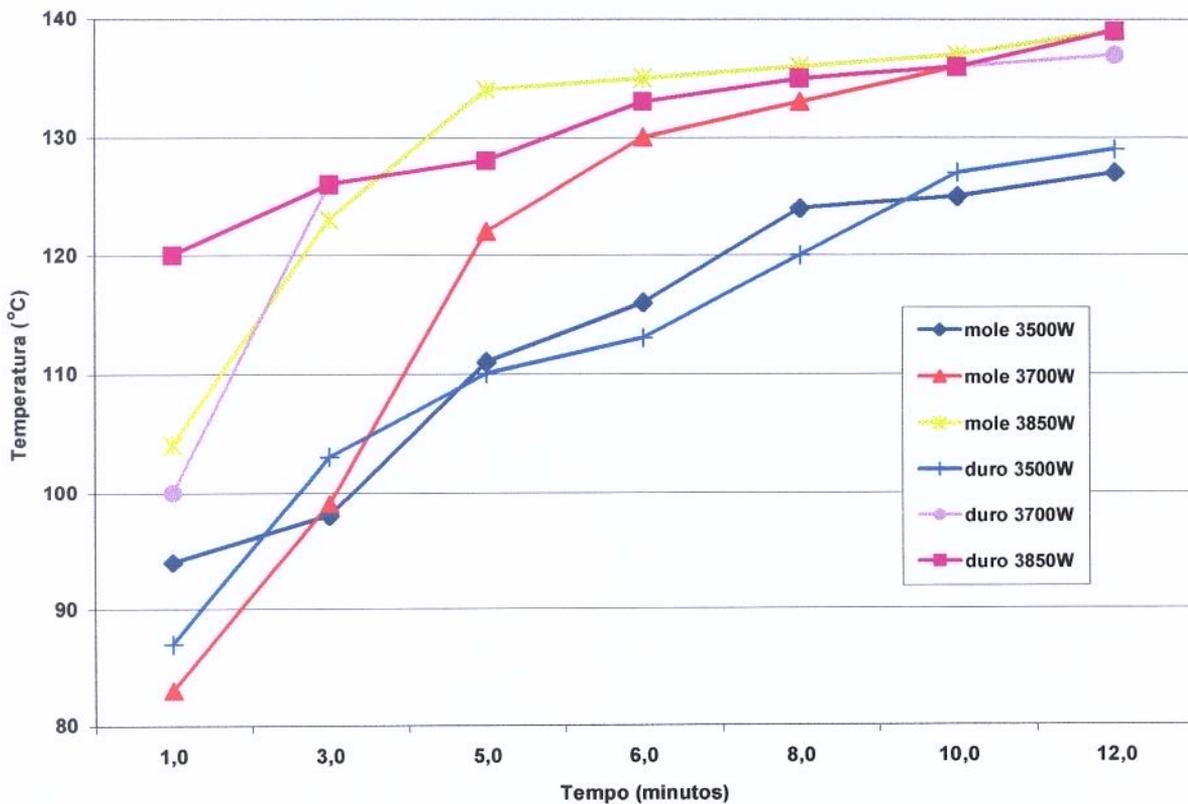


FIGURA 14: Comportamento dos cafés duro para melhor e mole durante o processo de torração por microondas a 3500W, 3700W e 3850W

5.3. Modificações Físicas do Grão e a Qualidade do Café

5.3.1. Atividade de Água, pH e Concentração Iônica

Handwritten text, likely bleed-through from the reverse side of the page. The text is extremely faint and illegible due to the low contrast and blurriness of the scan. It appears to be organized into several paragraphs or sections, but the specific content cannot be discerned.

O café duro para melhor quando torrado pelo método convencional doméstico e rápido (210°C e 220°C), em comparação ao café mole e estritamente mole, reportou uma menor perda de peso, a uma maior densidade aparente média no grão verde, maior pH (6,29), menor concentração iônica (45,23 mV) e a_w no grão verde de 0,57 (igual do café ETM e maior que a do café mole) (Tabelas 16 e 18). Estas características do café verde propiciaram ao café torrado sob diferentes condições de torração convencional: uma diminuição da a_w (maior diminuição no D220 e menor no R220), diminuição do pH (maior no D210 e menor no R220), aumento da concentração iônica (maior no D210 e menor no R220) (Tabela 16). Onde a torração rápida a 220°C, no café duro para melhor, foi a que produziu a menor diminuição nos parâmetros de atividade de água e pH, assim como, o menor aumento na concentração iônica (Tabela 16).

O café duro para melhor, quando torrado pelo método de microondas, em comparação ao café mole, sofreu uma menor perda de peso a 3500W e a 3700W e uma maior perda de peso a 3850W, repercutindo na: a_w (uma maior diminuição a MO3700W e menor a 3500W), pH (maior diminuição a 3500W e menor a 3850W), e concentração iônica (maior aumento a 3500W e menor a 3850W) (Tabelas 16, 22 e 18).

O café mole torrado pelo método convencional, em comparação ao café duro e ETM, reportou uma perda de peso maior que a do café duro e menor do que a do ETM, em uma densidade aparente média do grão verde de 0,67 g/mL e pH de 6,23, isto é, menor que a do café duro para melhor e maior que a do café ETM, concentração iônica de 48,73 mV (maior que a do café duro e menor que a do ETM) e menor a_w no grão verde (0,56). Assim sendo, as condições de torração em estudo, determinaram no café torrado: uma diminuição da a_w (maior diminuição no D210 e menor no R220), uma diminuição do pH (maior na D210, e

TABELA 16: Média dos resultados de densidade aparente (ρ) (g/mL), grau de inchação (GI%), diâmetro do grão (diâ) (mm), aumento de tamanho do grão (ATG), aumento de volume do grão (AVG%), atividade de água (café torrado) (a_w), pH (café torrado), concentração iônica (CI) (mV) (café torrado), obtidos para os cafés (duro para melhor, mole e estritamente mole) verdes e torrados pelos sistemas, convencional e microondas a uma determinada perda de peso (Pp %)

| Torrção | ρ_v | ρ_T | GI | diâ _{GV} | diâ _{GT} | ATG | AVG | a_{wT} | pH _T | CI _T | Pp |
|-------------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|--------------|
| CAFÉ DURO PARA MELHOR | | | | | | | | | | | |
| CD210 ₁ | 0,66 | 0,36 | 45,40 | 6,54 | 8,06 | 18,89 | 60,46 | 0,46 | 5,45 | 96,08 | 12,44 |
| CD220 ₄ | 0,68 | 0,33 | 51,77 | 6,65 | 8,26 | 19,29 | 75,20 | 0,40 | 5,75 | 78,35 | 15,53 |
| CR210 _{1/4} | 0,69 | 0,34 | 50,72 | 6,65 | 8,04 | 17,28 | 72,22 | 0,43 | 5,74 | 78,75 | 15,22 |
| CR220 ₄ | 0,69 | 0,33 | 51,68 | 6,65 | 8,04 | 17,25 | 73,48 | 0,49 | 5,81 | 74,05 | 16,18 |
| Média | 0,68 | 0,34 | 49,89 | 6,62 | 8,10 | 18,18 | 70,34 | 0,44 | 5,69 | 81,81 | 14,84 |
| DP | 0,01 | 0,01 | 3,03 | 0,05 | 0,11 | 1,07 | 6,70 | 0,04 | 0,16 | 9,75 | 1,65 |
| CV% | 2,08 | 4,16 | 6,08 | 0,83 | 1,32 | 5,87 | 9,52 | 8,70 | 2,84 | 11,92 | 11,12 |
| MO3500W ₆ | 0,68 | 0,48 | 29,02 | 6,52 | 7,53 | 13,50 | 18,04 | 0,47 | 5,62 | 86,60 | 16,22 |
| MO3700W ₈ | 0,69 | 0,38 | 45,09 | 6,51 | 7,83 | 16,78 | 47,86 | 0,42 | 5,74 | 78,20 | 18,81 |
| MO3850W ₉ | 0,69 | 0,33 | 51,90 | 6,52 | 8,10 | 19,55 | 59,92 | 0,44 | 6,03 | 60,95 | 23,08 |
| Média | 0,69 | 0,40 | 42,00 | 6,52 | 7,82 | 16,61 | 41,94 | 0,44 | 5,80 | 75,25 | 19,37 |
| DP | 0,01 | 0,08 | 11,75 | 0,01 | 0,28 | 3,03 | 21,56 | 0,02 | 0,21 | 13,08 | 3,46 |
| CV% | 0,84 | 19,25 | 27,97 | 0,09 | 3,65 | 18,23 | 51,40 | 5,68 | 3,64 | 17,38 | 17,88 |
| dif. % C/MO | 1,09 | 14,49 | 15,81 | 1,58 | 3,45 | 8,62 | 40,38 | 0,46 | 1,88 | 8,02 | 23,37 |
| CAFÉ MOLE | | | | | | | | | | | |
| CD210 _{1/2} | 0,66 | 0,33 | 49,69 | 6,59 | 8,08 | 18,41 | 72,58 | 0,40 | 5,54 | 90,51 | 13,19 |
| CD220 ₃ | 0,68 | 0,32 | 53,13 | 6,61 | 8,20 | 19,42 | 78,72 | 0,43 | 5,91 | 69,09 | 16,24 |
| CR210 ₄ | 0,68 | 0,32 | 52,25 | 6,51 | 7,97 | 18,35 | 77,25 | 0,45 | 5,86 | 70,91 | 15,36 |
| CR220 ₄ | 0,67 | 0,31 | 53,35 | 6,51 | 8,02 | 18,87 | 76,91 | 0,46 | 6,16 | 53,20 | 17,47 |
| Média | 0,67 | 0,32 | 52,11 | 6,55 | 8,07 | 18,76 | 76,37 | 0,43 | 5,87 | 70,93 | 15,57 |
| DP | 0,01 | 0,01 | 1,68 | 0,05 | 0,10 | 0,50 | 2,64 | 0,03 | 0,25 | 15,29 | 1,80 |
| CV% | 1,42 | 2,55 | 3,22 | 0,80 | 1,23 | 2,64 | 3,46 | 6,08 | 4,34 | 21,55 | 11,59 |
| MO3500W ₈ | 0,68 | 0,41 | 39,81 | 6,48 | 7,67 | 15,44 | 36,81 | 0,46 | 5,65 | 83,90 | 17,65 |
| MO3700W ₆ | 0,67 | 0,38 | 43,71 | 6,50 | 7,81 | 16,82 | 42,65 | 0,43 | 5,70 | 80,60 | 19,70 |
| MO3850W ₉ | 0,68 | 0,36 | 47,70 | 6,44 | 7,94 | 18,85 | 50,64 | 0,41 | 5,92 | 67,50 | 21,21 |
| Média | 0,68 | 0,38 | 43,74 | 6,47 | 7,81 | 17,04 | 43,37 | 0,43 | 5,76 | 77,33 | 19,52 |
| DP | 0,01 | 0,02 | 3,95 | 0,03 | 0,13 | 1,72 | 6,94 | 0,02 | 0,14 | 8,67 | 1,79 |
| CV% | 0,85 | 6,57 | 9,02 | 0,47 | 1,73 | 10,07 | 16,01 | 5,81 | 2,50 | 11,22 | 9,15 |
| dif. % C/MO | 1,25 | 15,98 | 16,05 | 1,24 | 3,28 | 9,20 | 43,21 | 0,25 | 1,89 | 8,28 | 20,26 |
| dif. % D/M | 1,21 | 5,53 | 4,25 | 1,01 | 0,39 | 3,12 | 7,89 | 2,94 | 3,07 | 13,30 | 4,64 |
| CAFÉ ESTRITAMENTE MOLE | | | | | | | | | | | |
| CD210 _{1/2} | 0,65 | 0,33 | 48,87 | 6,58 | 8,15 | 19,34 | 69,37 | 0,41 | 5,54 | 91,49 | 13,41 |
| CD220 ₂ | 0,65 | 0,31 | 54,54 | 6,58 | 8,33 | 21,10 | 81,47 | 0,39 | 6,12 | 56,18 | 17,51 |
| CR210 ₄ | 0,67 | 0,32 | 52,04 | 6,54 | 8,07 | 19,00 | 76,03 | 0,41 | 5,81 | 74,53 | 15,56 |
| CR220 ₄ | 0,65 | 0,30 | 52,87 | 6,54 | 8,10 | 18,93 | 75,43 | 0,42 | 6,15 | 53,59 | 17,69 |
| Média | 0,65 | 0,32 | 52,08 | 6,56 | 8,16 | 19,59 | 75,58 | 0,41 | 5,91 | 68,95 | 16,04 |
| DP | 0,01 | 0,01 | 2,38 | 0,02 | 0,12 | 1,02 | 4,95 | 0,01 | 0,29 | 17,68 | 2,00 |
| CV% | 1,53 | 4,10 | 4,57 | 0,35 | 1,43 | 5,21 | 6,55 | 3,09 | 4,87 | 25,65 | 12,48 |
| dif. % M/ETM | 1,08 | 1,03 | 0,05 | 0,02 | 1,14 | 4,24 | 1,03 | 5,76 | 0,64 | 2,79 | 2,98 |
| dif. % D/ETM | 2,28 | 6,50 | 4,20 | 0,99 | 0,75 | 7,22 | 6,93 | 8,53 | 3,68 | 15,72 | 7,48 |

Ex: CR220₄: em subscrito representa o número da saca de café verde

menor na R220), e aumento da concentração iônica (maior no D210 e menor no R220) (Tabela 16). De maneira que, o D210 determinou nesta qualidade de café, o maior aumento na diminuição da aw e do pH e o maior aumento da CI. E a R220, no café mole, reproduziu o mesmo comportamento ocorrido no café duro para melhor, em relação a aw, pH e CI.

Quando torrado pelo sistema de microondas, o café mole, sofreu em relação a: aw (maior diminuição a 3850W e menor a 3500W), pH (maior diminuição a 3500W e menor a 3850W), e concentração iônica (maior aumento a 3500W e menor a 3850W). O que traduziu no café mole e duro para melhor, um mesmo comportamento para o pH (maior diminuição a 3500W e menor a 3850W) e concentração iônica (maior aumento a 3500W e menor a 3850W), por comparação entre as três potências de microondas em análise (Tabela 16).

O café estritamente mole, torrado pelo método convencional, doméstico e rápido (210°C e 220°C), em comparação, aos cafés, duro para melhor e mole, demonstrou uma maior perda de peso, a uma menor densidade aparente média no grão verde (0,65 g/mL), menor pH (6,18), maior concentração iônica (51,97 mV) e aw no grão verde de 0,57 (igual do café duro para melhor e maior que a do café mole). Este café, quando torrado pelo aquecimento convencional doméstico e rápido, exibiu: uma diminuição da aw (maior diminuição no D220 e menor no R220), diminuição do pH (maior no D210 e menor no R220), aumento da concentração iônica (maior no D210 e menor no R220) (Tabela 16).

Comparando as três qualidades de café, torradas pelo sistema convencional de aquecimento, observou-se que a D210, proporcionou a maior diminuição de pH e o maior aumento da CI, e a R220, a menor diminuição do pH e o menor aumento da CI. Em termos de aw, os cafés, duro para melhor e ETM foram os que apresentaram o mesmo comportamento, isto é, uma maior

diminuição no D220 e uma menor diminuição no R220, e no café mole, o mesmo comportamento ocorreu apenas na R220.

Entre os processos de torração convencional, o rápido a 220°C, foi o que produziu a menor diminuição da aw, a menor diminuição do pH e o menor aumento da CI, a uma maior perda de peso, entre as três qualidades de café. E na torração por microondas: a potência de 3500W, foi a que determinou entre as duas qualidades café, duro para melhor e mole, a menor diminuição da aw, a maior diminuição do pH e o maior aumento da CI, a uma menor perda de peso; e a potência de 3850W, nos cafés duro para melhor e mole, a menor diminuição do pH e o menor aumento da CI.

5.3.1.1. Efeito na Análise Sensorial

Segundo PORTO et alii (1991), os ácidos orgânicos, como cítrico, fumárico, málico, láctico e acético, contribuem significativamente, nos cafés verde e torrado (unicamente naquele com grau de torração clara) para a sua acidez titulável total. O aumento na acidez durante a torração, é mais evidenciado no grau de torração média, onde tem sido atribuído, a presença de altas concentrações de ácidos carboxílicos, como ácido clorogênico e ácido quínico, ou pela presença de ácido fosfórico (MAIER, 1987). Assim como, podem contribuir significativamente para a acidez titulável, alguns produtos da reação de Maillard, os quais são facilmente formados no estágio intermediário da torração e parcialmente decompostos ao final do processo (LINGUERT & ERIKSSON, 1981). PORTO et alii (1991), concluíram que a considerável diferença observada entre a acidez calculada e a titulável era devido provavelmente, aos ácidos fenólicos ou a novos compostos formados pela pirólise e a reações de escurecimento não enzimático, no processo de torração.

Segundo CLIFFORD (1988), a acidez percebida não é uma função unicamente dos prótons, mas também da acidez residual devido aos ácidos não dissociados, e que a acidez percebida a um pH em particular (ex: ácido acético a pH 3,9) é maior quando o ácido está tamponado. Logo, a intensidade percebida aumenta com o aumento da acidez titulável e com a redução do pH. Bem como, que os grupos hidroxila fenólicos dos ácidos clorogênicos contribuem para a percepção da acidez.

Neste estudo, a resposta sensorial de 'acidez forte', correspondeu aos menores valores de pH (5,47 a 5,75) em uma perda de peso de 12,03% a 15,41% (Tabela 17), no sistema de aquecimento convencional, devido provavelmente: ao pH menor, maior a intensidade de acidez percebida; e aos grupamentos hidroxila fenólicos dos ácidos clorogênicos (pK_a a partir de 8,5) não estarem dissociados nessa faixa de pH, aumentando a percepção de acidez, o que concorda com CLIFFORD (1988). Esta maior percepção de acidez, ocorreu a concentrações dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico relativamente semelhantes entre si (0,76 a 0,52 g/100g café para o 5-CQA e 0,77 a 0,41 g/100g café para o AC). Os processos de torração convencionais envolvidos foram o D210 para os cafés, duro para melhor, mole e ETM e o R210 para o café duro para melhor.

A resposta sensorial 'acidez forte', no café mole torrado por MO3700W, a uma perda de peso de 19,70% e a um pH de 5,70 (Tabela 17), aconteceu a uma quantidade dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico de 0,49 g/100g café e 0,83g/100g café, respectivamente. Neste caso, talvez uma possível explicação possa estar na perda de 3,49% do 5-CQA a cada 1% de perda de peso (Tabela 27), e com isto, uma maior formação dos ácidos quínico e caféico pela degradação térmica do 5-CQA (Figura 15). O que de acordo com MAIER (1987) e PORTO et alii (1991), o aumento da acidez, a partir do grau de torração média (superior a 14,9% de perda de peso), pode ser atribuído aos ácidos fenólicos, como um dos seus principais compostos.

TABELA 17: Resultados da análise sensorial dos cafés duro para melhor, mole e ETM, torrados pelos sistemas, convencional e microondas em comparação ao pH, presença no café torrado do 5-CQA e AC (maior e/ou menor) e a perda de peso (%)

| | Análise Sensorial | pH | Presença Café Torrado | Pp |
|-------------------------------|-----------------------------------|------|-----------------------|-------|
| Café Duro para Melhor | | | | |
| D210 | Duro para melhor com acidez forte | 5,47 | < 5-CQA e > AC | 12,03 |
| D220 | Queimado | 5,79 | > 5-CQA e < AC | 15,85 |
| R210 | Duro para melhor com forte acidez | 5,75 | > 5-CQA e < AC | 15,41 |
| R220 | Queimado | 5,81 | > 5-CQA e < AC | 16,18 |
| MO3500W | Mole acidez considerável | 5,62 | < 5-CQA e > AC | 16,22 |
| MO3700W | Mole acidez considerável | 5,74 | > 5-CQA e < AC | 18,81 |
| MO3850W | Queimado | 6,03 | > 5-CQA e < AC | 23,08 |
| Café Mole | | | | |
| D210 | Duro para melhor com acidez forte | 5,54 | > 5-CQA e < AC | 13,38 |
| D220 | Queimado | 5,88 | > 5-CQA e < AC | 16,00 |
| R210 | Queimado | 5,92 | > 5-CQA e < AC | 15,57 |
| R220 | Queimado | 6,16 | > 5-CQA e < AC | 17,47 |
| MO3500W | Mole acidez considerável | 5,65 | < 5-CQA e > AC | 17,65 |
| MO3700W | Duro para melhor com acidez forte | 5,70 | < 5-CQA e > AC | 19,70 |
| MO3850W | Queimado | 5,92 | > 5-CQA e < AC | 21,21 |
| Café Estritamente Mole | | | | |
| D210 | Duro para melhor com acidez forte | 5,56 | < 5-CQA e > AC | 13,77 |
| D220 | Queimado | 6,14 | > 5-CQA e < AC | 17,07 |
| R210 | Queimado | 5,82 | > 5-CQA e < AC | 15,40 |
| R220 | Queimado | 6,24 | > 5-CQA e < AC | 18,19 |

Na resposta sensorial 'acidez considerável', a faixa de pH ficou em 5,74 a 5,62 (Tabela 17), demonstrado pelos cafés torrados pelo sistema de microondas a 3700W (café duro para melhor) e a 3500W (café duro para melhor e mole), em uma perda de peso de 18,81%, 16,22% e 17,65%, respectivamente. Possivelmente em razão de: um maior pH, menor percepção sensorial de acidez, mesmo a um maior número de grupamentos hidroxila fenólicos dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico, na faixa de 0,77 a 0,94 g/100g café, e de 0,55 a 0,95 g/100g café (Figura 15), respectivamente. Pois, para NICOLI et alii (1989), pequenas alterações no pH alteram o grau de ionização dos compostos ácidos com consideráveis modificações no sabor e gosto da bebida.

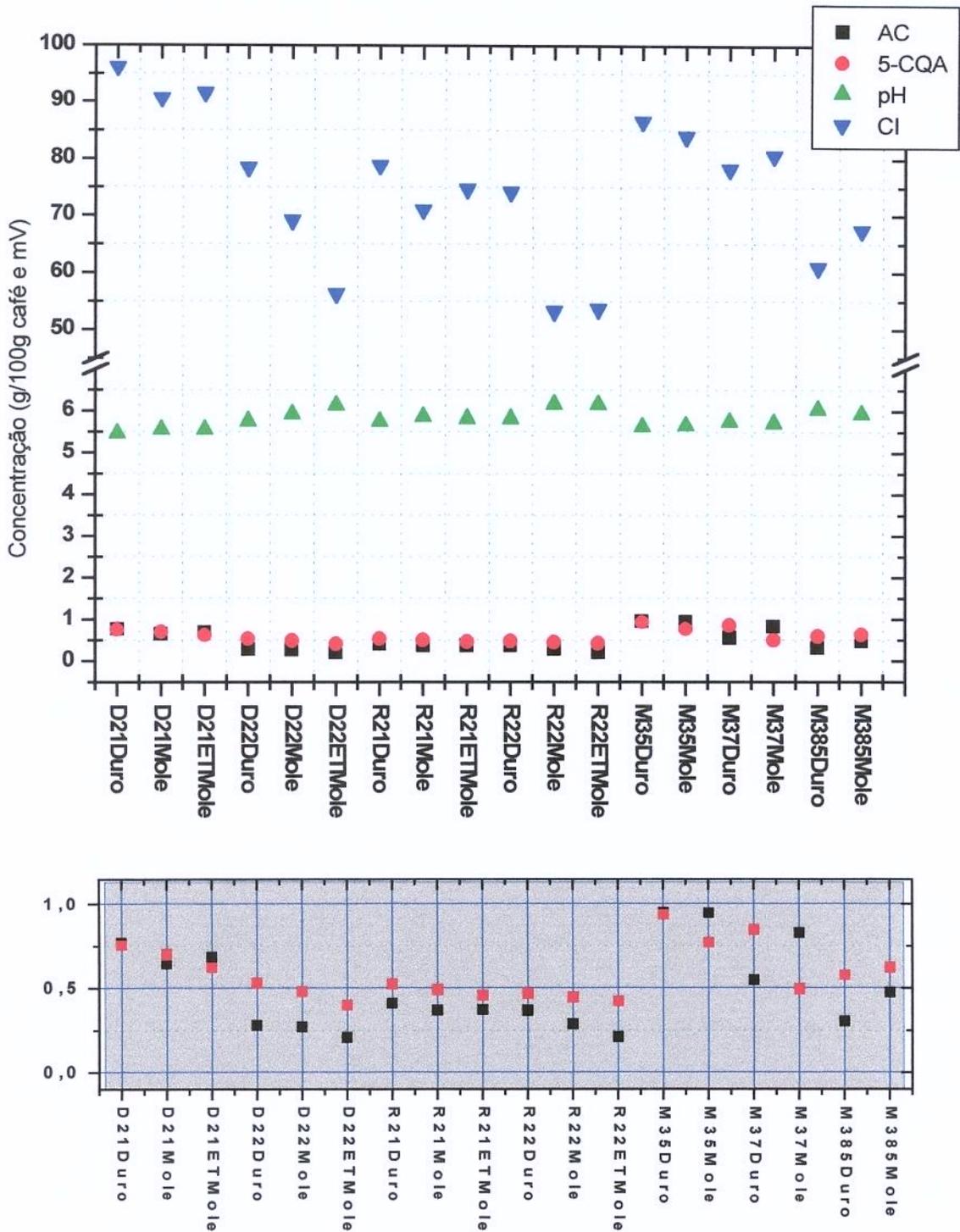


FIGURA 15: Relação entre o pH, a concentração iônica (CI) (mV), e as concentrações dos ácidos 5-cafeoil quínico (5-CQA) e caféico (AC) (g/100g café) nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, torrados pelos sistemas convencional e microondas

O 'sabor queimado' correspondeu a uma faixa de pH de 5,79 a 6,24, em uma perda de peso de 15,40% (R210 no café ETM) a 18,19% (R220 no café ETM) pelo sistema de aquecimento convencional (D220, R220, e R210 apenas nos cafés mole e ETM), e de 21,21% (MO3850W no café mole) a 23,08% (MO3850W no café duro para melhor) pelo sistema de microondas (3850W) (Tabela 17), a uma perda de 5,12% a 2,80% de 5-CQA a cada 1% de redução de peso (0,58 a 0,40 g/100g café), e de 5,40% a 2,74% de AC a cada 1% de redução de peso (0,47 a 0,21 g/100g café) (Tabela 27) (Figura 15). A significativa degradação térmica dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico (Tabela 27) originou possivelmente uma alta concentração de fenóis. Estes fenóis, segundo TRESS et alii (1979), propiciam um forte odor de queimado fenólico com algum grau de doçura.

O efeito do pH na resposta sensorial reproduziu uma diferença significativa (5% de nível de significância, $p < 0,05$), entre os diferentes processos de torração convencional (Apêndice K) e entre os dois sistemas de aquecimento, convencional e microondas (Apêndice L), mas não significativa para a qualidade do café.

A relação entre a concentração iônica e as características organolépticas foram as seguintes: 53,20 a 78,35 mV para 'queimado'; 78,75 a 96,08 mV para 'café duro com acidez forte'; e 78,20 a 86,60 mV para 'café mole com acidez considerável' (Figura 15 e Tabela 17). Onde, uma menor concentração de íons foi originada no sabor 'queimado' e a maior concentração iônica na resposta sensorial 'café duro para melhor com acidez forte'.

O efeito da concentração iônica, na resposta sensorial, para os cafés torrados pelo aquecimento convencional, foi significativa (5% de significância) entre as qualidades de café e entre os diferentes tipos de torração convencional

(Apêndice M). Assim como, mostrou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os sistemas de torração convencional e microondas, mas não, entre as qualidades de café (Apêndice N).

Os percentuais de diferença entre o café duro e o mole, pelo processo de torração convencional, foram: 13,30% para a concentração iônica; 4,64% para a perda de peso; 3,07% para o pH; e 2,94% para a aw do café torrado (Tabela 16). Onde, o café duro para melhor foi o que sofreu a maior modificação em termos da sua concentração iônica, passando de um menor teor no grão verde para um maior valor médio no grão torrado em uma perda de peso de 12,44% a 16,18% (13,19% a 17,47% no café mole).

Os percentuais de diferença entre o café duro para melhor e o estritamente mole, no processo de torração convencional, seguiram a seguinte ordenação: 15,72% para a concentração iônica; 8,53% para a aw do grão torrado; 7,48% para a perda de peso; e 3,68% para o pH. O café ETM, quando torrado pelo sistema de aquecimento convencional, sofreu as maiores modificações na sua concentração iônica, passando de um maior teor no grão verde para um menor teor médio no grão torrado, e na sua aw, de um valor igual ao do café duro para um menor valor médio no grão torrado, a uma maior perda de peso média (13,41% a 17,69%) (Tabela 16). E entre os cafés, ETM e mole, no processo de torração convencional, os percentuais de diferença observados foram: 5,76% para a aw do grão torrado, 2,98% para a perda de peso, 2,79% para a concentração iônica, e 0,64% para o pH (Tabela 16).

Os percentuais de diferença entre o processo de torração por microondas e o convencional, nos parâmetros físicos foram: 20,26% no café mole e 23,37% no café duro para melhor para a perda de peso; 8,28% no café mole e 8,02% no café duro para a concentração iônica; 1,89% no mole e 1,88% no duro para o pH; e 0,25% no mole e 0,46% no duro para a aw do grão torrado (Tabela 16). Onde, o

café duro para melhor foi o que sofreu uma diferença percentual mais relevante na sua perda de peso (23,37% no café duro e 20,26% no café mole), quando torrado pelo sistema de microondas em comparação ao convencional.

5.3.2. Densidade Aparente (ρ), Grau de Inchação (GI), Diâmetro do Grão, Aumento de Volume do Grão (AVG) e Aumento de Tamanho do Grão (ATG)

O café duro para melhor em comparação ao café mole, torrado de modo doméstico a 210°C, continha no seu grão verde, uma quantidade de massa igual a do café mole mas a um menor volume (isto é, uma estrutura mais compactada que o café mole) em uma maior aw (0,57 para o café duro para melhor, 0,53 para o mole e 0,57 para o ETM). Esta estrutura mais compacta do café verde, propiciou uma menor transferência de calor, maior tempo de torração (10:13 minutos para o café duro e 10:01 minutos para o café mole), menor grau de inchação (GI), menor aumento de volume do grão (AVG) e menor perda de peso (Tabela 16 e Figura 16). Em contrapartida, o café mole, com uma maior transferência de calor em uma menor aw no grão verde, mostrou um menor tempo de torração, maior destruição térmica dentre as qualidades de café, maior GI e AVG, em uma perda de peso maior que a do café duro para melhor e menor que a do café ETM, contudo, com um aumento de volume (ATG) praticamente igual.

A mesma capacidade para o aumento de tamanho do grão (Tabela 16 e Figura 17) do café duro para melhor e mole, na D210, possivelmente tenha sido em razão, de um efeito compensatório das pressões de vapor de água e CO_2 (menor pressão de CO_2 e maior pressão do vapor de água no café duro para melhor e maior pressão de CO_2 e menor pressão do vapor de água no café mole), a uma semelhante densidade aparente e pequena diferença no volume do grão verde (Tabela 16 e Figura 16). Segundo SIVETZ & DESROSIER (1979), no grau de torração clara, obtido para as diferentes qualidades de café em estudo,



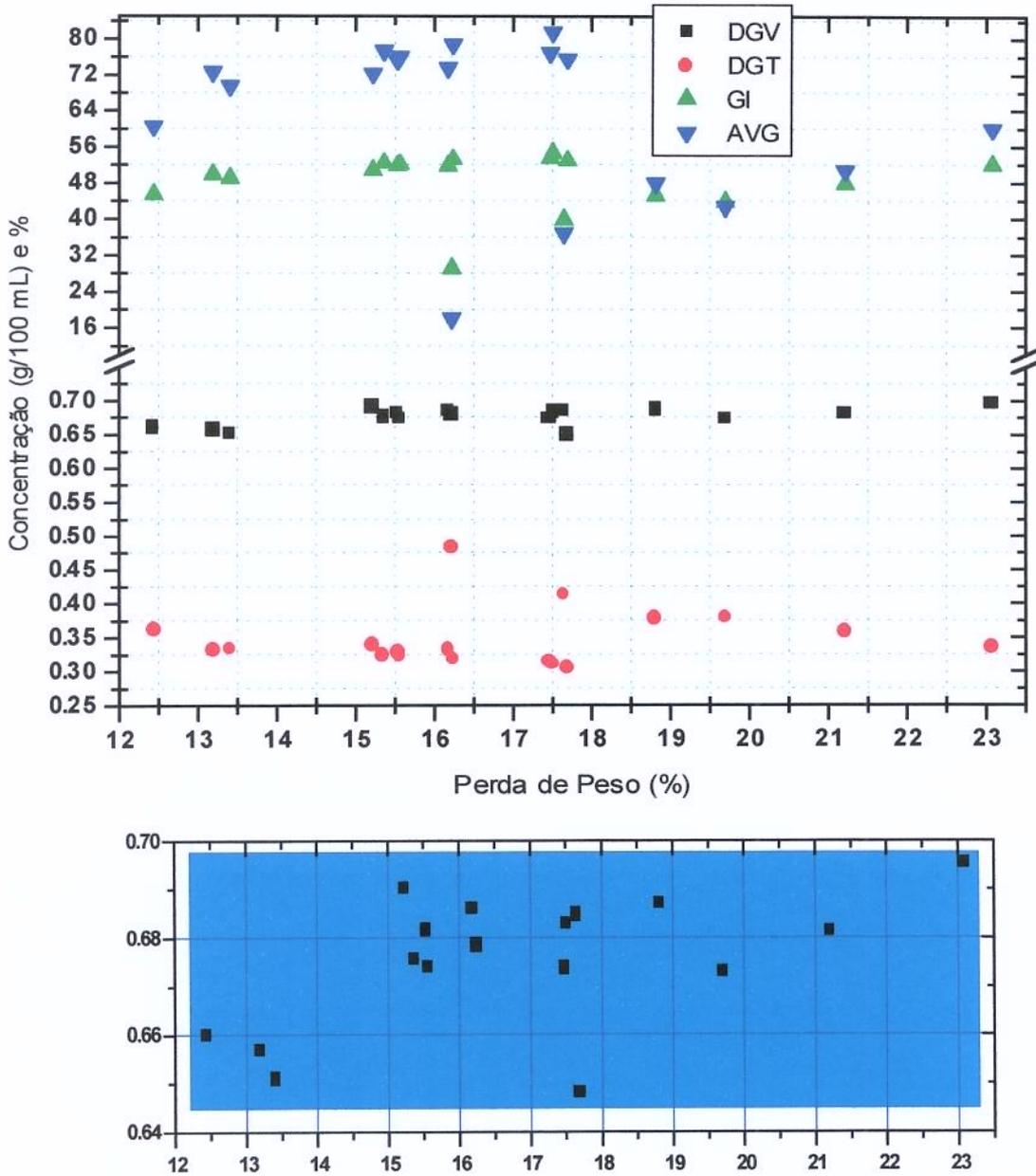


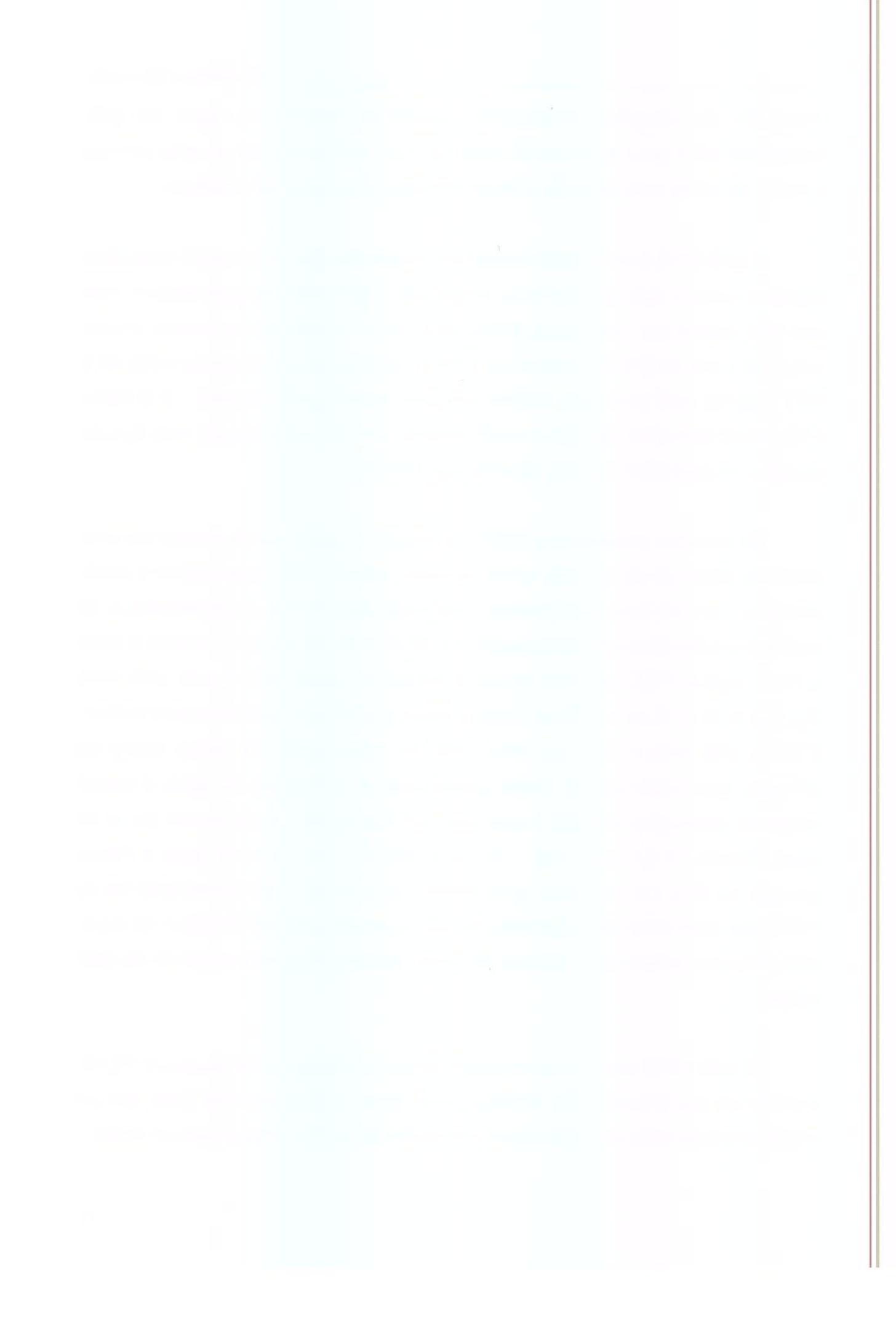
FIGURA 16: Efeito dos processos de torração convencional e microondas, nos cafés, duro para melhor, mole e estritamente mole em relação aos parâmetros físicos [densidade aparente do grão verde (DGV) e torrado (DGT) (g/mL), grau de inchação (GI) (%), e aumento de volume do grão (AVG) (%)] e a perda de peso (Pp) (%)

neste tipo de torração convencional, ocorre a remoção da água do grão lentamente até a uma temperatura entre 127°C e 188°C, e a cor do grão começa a mudar de verde para amarelo e posteriormente, para uma cor castanha.

O café ETM, com uma estrutura bem menos compactada (menor densidade aparente e maior diâmetro no grão verde) que a do café duro para melhor, mas com uma mesma a_w , pela D210, sofreu uma maior transferência de calor, menor tempo de torração (10:04 minutos no ETM e 10:13 minutos no duro), maior GI e AVG, que no café duro para melhor, em uma maior perda de peso. E o maior ATG, talvez tenha sido devido a maior pressão de CO_2 originada por este tipo de torração, no café ETM (Tabela 16 e Figuras 16 e 17).

Na torração doméstica a 220°C, a mesma quantidade de massa em uma pequena diferença de volume, entre os cafés verdes, duro para melhor e mole, propiciou, no café duro para melhor, uma maior capacidade de transferência de calor em um menor tempo de torração (11:06 para o café duro, 11:14 para o mole e 11:31 para o ETM), em uma estrutura menos compactada que a do café mole (ϕ_{GV}/ρ_{GV} : 9,78 no duro e 9,72 no mole), e maior a_w (0,63 no café duro para melhor, 0,55 no café mole e 0,57 no café ETM) do grão verde. O menor tempo de torração, aconteceu em um maior tempo para a eliminação de água e menor tempo de destruição térmica, e com isso, um menor GI e AVG, menor perda de peso (Tabela 16 e Figura 16). A maior pressão do vapor de água e menor pressão de CO_2 , no café duro para melhor, levou a um ATG semelhante ao do café mole, com uma maior pressão de CO_2 e menor pressão do vapor de água, pela pequena diferença de volume em uma mesma densidade aparente do grão verde.

O café ETM, com uma menor compactação de grão verde ($\phi_{GV}/\rho_{GV} = 10,12$), e maior a_w que o café mole, reportou uma maior transferência de calor, em um maior tempo de torração, pela maior eliminação de água, todavia, com um maior



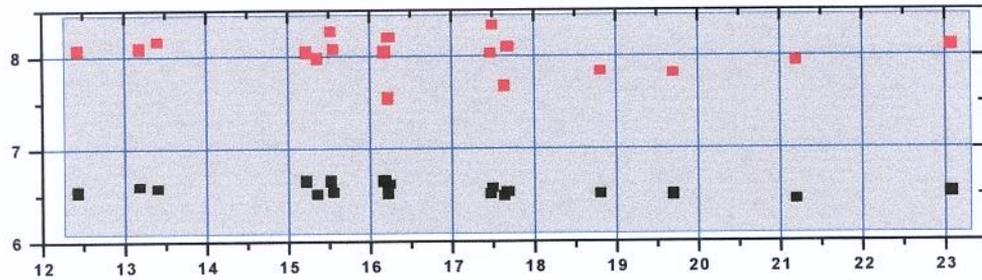
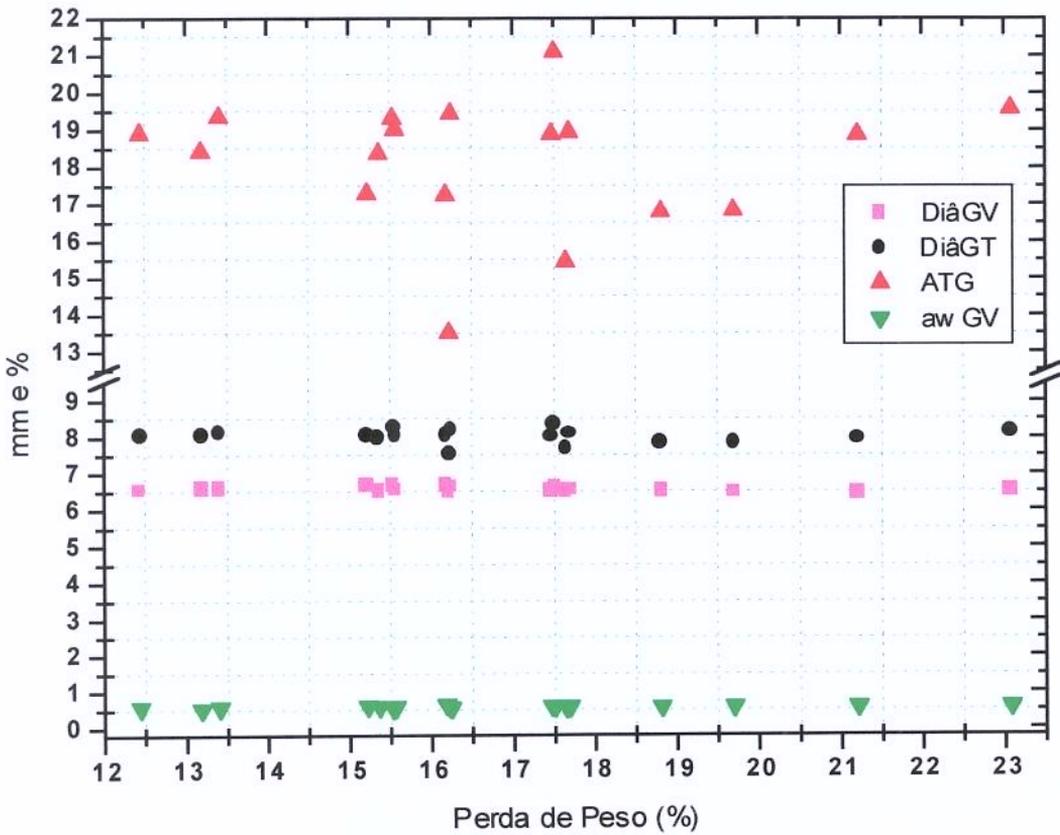


FIGURA 17: Efeito dos processos de torração convencional e microondas nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole em relação aos parâmetros físicos [atividade de água (aw), diâmetro do grão verde e torrado (Diâ GV e Diâ GT) (mm), e aumento de tamanho do grão (ATG) (%)] e a perda de peso (Pp)(%)

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions.

2. It then outlines the various methods used to collect and analyze data, including surveys and interviews.

3. The next section describes the results of the study, highlighting the key findings and trends.

4. Finally, the document concludes with a discussion of the implications of the research and suggestions for future work.

5. The overall goal of this study is to provide a comprehensive overview of the current state of the field.

6. This research is based on a thorough review of the existing literature and primary data collection.

7. The findings of this study are consistent with previous research, but also reveal some new insights.

8. The data suggests that there is a significant correlation between the variables studied.

9. These results have important implications for both theory and practice in the field.

10. The study also identifies several areas where further research is needed to clarify the findings.

11. In conclusion, this research contributes to the understanding of the complex relationships between the variables.

12. The results of this study provide a solid foundation for future research in this area.

13. The findings of this study are discussed in detail in the following sections of the report.

14. The overall purpose of this research is to explore the underlying mechanisms of the observed phenomena.

grau de destruição térmica, pelo maior GI e AVG, dentre as qualidades de café torradas pela D220 (Tabela 16 e Figuras 16 e 17).

No processo de torração convencional doméstica a 210°C e a 220°C, o tipo de compactação do grão de café determinou a maior ou menor transferência de calor, e desta forma, um menor ou maior tempo de torração, onde, uma maior compactação de estrutura, menor foi a transferência de calor ao grão, maior o tempo de torração. Assim como, que o aumento de tamanho do grão (ATG) dependeu também, de uma certa quantidade de massa/volume de grão verde, onde, uma menor quantidade de massa/volume, produziu um maior ATG, e em valores semelhantes, um semelhante ATG, no café torrado.

Na torração rápida a 210°C e a 220°C, os cafés verde, duro para melhor [maior quantidade de massa em um maior volume], mole [menor quantidade de massa a um menor volume, e aw menor que o café duro na R210 e maior na R220], e ETM [menor quantidade de massa ainda em um maior volume, e menor aw que o café mole], reportaram o mesmo comportamento durante a torração dentre as suas respectivas qualidades. O que significou para o café mole, em comparação ao café ETM: uma menor transferência de calor em uma estrutura de grão verde mais compactada, maior tempo de eliminação de água (4:49 minutos para o mole e 4:47 para o ETM pela R210 e 5:25 para o mole e 4:52 para o ETM pela R220) pela maior aw (0,59 para o mole e 0,58 para o ETM), menor tempo de transformação térmica, contudo, em um maior GI e AVG, pelo efeito de proporcionalidade dimensional dos grãos, de modo que, as perdas de peso (15,36% no café mole e 15,56% no ETM pela R210 e 17,47% no mole e 17,69% no ETM pela R220) e o ATG entre as duas qualidades de café foram parecidos nas R210 e R220 (Tabela 16 e Figuras 16 e 17).

O café duro melhor, quando torrado pela R210 e R220, possuía a estrutura menos compactada de grão verde entre as qualidades de café, e por isso, maior a

transferência de calor em uma maior massa, o tempo de eliminação de água foi maior (5:06 minutos pela R210 e 4:31 pela R220) a uma maior a_w e menor a uma menor a_w (0,60 na R210 e 0,54 na R220), menor o grau de inchação do café, aumento de volume do grão e aumento de tamanho do grão, em uma perda de peso diferenciada (semelhante a do café mole na R210 e menor na R220) (Tabela 16 e Figuras 16 e 17). O café mole tendo uma estrutura de grão verde mais compacta e a_w menor (R210) e maior (R220), que o café duro para melhor, mostrou um tempo para a eliminação de água menor na R210 e maior na R220, em uma maior transformação térmica (maior formação de CO_2) pela menor transferência de calor a uma menor quantidade de massa, de maneira que, as perdas de peso (15,36% para o mole e 15,22% para o duro) foram compensadas entre as perdas de matéria seca e de água nos cafés torrados pela R210, nas duas qualidades de café.

Neste estudo, o processo convencional de torração rápida produziu aos cafés, uma faixa de densidade aparente de 0,30 a 0,34 g/mL (Tabela 16), e desta forma dentro do conceito de torração rápida descrito por MAHLMANN et alii (1985) e KIRKPATRICK et alii (1992), que é de 0,28 a 0,38 g/mL. Fazendo com que o consumidor, possa usar uma menor quantidade de café para um dado volume de bebida, comparado ao que utilizaria com o café torrado pelo método tradicional doméstico, e assim diminuindo o custo do produto, sem alterar o seu nível de aceitabilidade (densidade aparente de 0,38 a 0,50 g/mL) (MAHLMANN et alii, 1985 e PULTINAS, 1986). Este ainda, proporciona ao café torrado, um maior conteúdo de compostos aromáticos e sólidos extratáveis, e uma maior força a bebida (RUBACH & KIRCHOFF, 1984; PULTINAS, 1986; DUPLATE et alii, 1987; MAHLMANN et alii, 1985 e KIRKPATRICK et alii, 1992).

A compactação da estrutura do grão de café verde determinou a maior ou menor transferência de calor durante a torração convencional rápida a 210°C e a 220°C, assim como, o maior ou menor grau de inchação e aumento de volume do

café torrado a uma certa quantidade de massa (densidade aparente) no café verde, independente de sua qualidade. Ou seja, em uma estrutura mais compactada de grão verde, menor foi a transferência de calor para o grão durante a torração, o maior GI e AVG ocorreu em uma menor quantidade de massa por volume, e o menor GI e AVG em uma maior densidade aparente do grão verde. Outrossim, em uma menor compactação de grão verde, maior foi a transferência de calor, maior o GI e AVG em uma menor densidade aparente do grão verde, e menor GI e AVG em uma maior quantidade de massa por volume.

Pelo processo de torração doméstica a 210°C e 220°C, a estrutura de compactação também determinou a maior ou menor transferência de calor ao grão de café durante a torração, proporcionando uma maior ou menor transformação térmica (refletido no GI e AVG) dependendo da densidade aparente do grão verde. Uma exceção ocorreu no café ETM, na D210, possivelmente devido a sua maior aw no grão verde, maior tempo para a eliminação de água e menor para a transformação térmica durante a torração, proporcionando com isso, um menor GI e AVG, mesmo na presença de uma menor quantidade de massa por volume, a uma maior transferência de calor, pela menor compactação do grão verde.

A capacidade para o aumento de tamanho do grão (ATG), dependeu da pressão exercida pela evaporação da água e pela formação do CO₂ durante a torração em uma dada densidade aparente e tamanho do grão verde. E o aumento de volume do grão, dependeu essencialmente do grau de transformação térmica dos compostos de alto peso molecular em compostos de baixo peso molecular, ou seja, da quantidade de CO₂ formada por estas reações térmicas, onde a torração por microondas foi a que traduziu os menores valores (18,04% a 59,92%) para o AVG em comparação a torração convencional (60,46% a 81,47%).

O café ETM, de maior qualidade, foi o que demonstrou o maior ATG em todos os processos convencionais de torração, e o AVG maior, apenas na D220. O café mole, de qualidade entre o café ETM e o duro para melhor, exibiu o maior ATG quando torrado por microondas, nas potências de 3500W e 3700W, e o maior AVG, na torração convencional (D210, R210 e R220) e por microondas (3500W). O café duro para melhor, de menor qualidade dos cafés em estudo, apenas quando torrado por microondas, mostrou o ATG maior, na potência de 3850W, e o AVG maior, nas potências de 3700W e 3850W (Figuras 16 e 17).

O café duro para melhor reportou as menores perdas de peso dentre as qualidades de café, quando torrado pelo sistema de aquecimento convencional, o café ETM, as maiores perdas de peso, e o café mole, estas, foram maiores que as do café duro para melhor, e menores que as do café ETM. Pelo sistema de aquecimento por microondas, as perdas de peso do café duro para melhor foram sempre menores que as do café mole, nas potências de microondas de 3500W e 3700W, e na potência de 3850W, a maior perda de peso ocorreu no café duro para melhor e a menor perda de peso no café mole (Tabela 16). Onde a quantidade de massa a um dado volume no grão verde (densidade aparente), se constituiu em um importante fator no estabelecimento de uma dada perda de peso, de tal maneira, que uma maior densidade aparente de grão verde proporcionou uma menor perda de peso, ou uma menor densidade aparente de grão verde uma maior perda de peso, tanto pela torração convencional como de microondas, nas potências de 3500W e 3700W.

Os cafés verdes, duro para melhor e mole, contendo densidades aparentes semelhantes em diâmetro de grão e aw diferente (menor quantidade de massa/volume e maior aw no café duro, e no café mole, uma maior quantidade de massa/volume e menor aw) quando torrados por microondas a 3500W, reportaram, no caso do café duro para melhor, um menor GI, AVG e ATG, a uma menor perda de peso, e no caso, do café mole, um maior GI, AVG e ATG, a uma

maior perda de peso. A estrutura mais compacta do café mole verde, em uma menor aw, nesta potência de microondas, acarretou em um maior tempo para a transformação térmica, e com isto, um maior perda de peso, o contrário, foi verdadeiro para o café duro para melhor, com uma menor perda de peso (Tabela 16 e Figuras 16 e 17).

No processo de torração por microondas a 3700W, a densidade aparente do grão verde, determinou a perda de peso, e a aw do café verde, a maior ou menor capacidade de inchação e aumento de volume do grão de café torrado, em virtude de, um maior ou menor tempo para a eliminação de água, menor ou maior tempo para a transformação térmica. De maneira que, uma maior quantidade de massa em um maior volume, no café duro para melhor, mostrou uma menor perda de peso e maior AVG, e uma menor quantidade de massa em um menor volume, no café mole, um menor AVG e maior perda de peso. Todavia, em um praticamente semelhante ATG nas duas qualidades de café (Tabela 16 e Figuras 16 e 17).

Na torração a 3850W, a estrutura menos compacta no café duro para melhor verde, em presença de uma maior aw, sofreu um maior GI, AVG e ATG, com uma maior perda de peso, e a estrutura mais compacta, no café mole verde, em uma menor aw, exibiu um menor GI, AVG e ATG, em uma menor perda de peso (Tabelas 16, 22 e 18 e Figuras 16 e 17). De acordo com SIVETZ & DESROSIER (1979), uma perda de peso (superior a 18%) correspondente ao grau de torração muito escura, o café contém em sua estrutura, regiões de carbonização.

Em termos médios, o café duro para melhor, quando verde, foi o que apresentou, a maior densidade aparente e o maior diâmetro (maior quantidade de massa/volume) (estrutura mais compactada), em comparação as outras qualidades de café. Quando torrado pelo sistema convencional de aquecimento,

sofreu uma menor penetração do calor, menor taxa de transferência de calor, menor desdobramento de compostos de alto peso molecular em compostos de baixo peso molecular, e com isto, menor formação de CO_2 , menor AVG (menor abertura da estrutura do grão), menor GI (menor perda de matéria seca a um determinado volume), e menor perda de peso, entre as três qualidades de café torrado (Tabela 16 e Figuras 16 e 17).

A menor perda de peso do café duro para melhor, durante a torração convencional, ocorreu em presença de uma maior a_w no grão verde (média: 0,58) (exceção na R220), de maneira que, parte desta perda de peso foi devido a eliminação de água do grão, refletindo-se na permanência da maior densidade aparente média (0,34 g/mL) e no menor ATG (18,18%) (relação entre o diâmetro do café verde e do torrado) (exceção na D210) (Tabela 16), ou seja, uma estrutura de grão torrado mais compactada que as demais.

O café estritamente mole, com uma menor quantidade de massa a um volume médio praticamente igual ao do café mole (menor quantidade de massa/volume dentre as qualidades de café), no café verde, reportou, uma maior penetração de calor, maior taxa de transferência de calor, e deste modo, uma maior perda de peso, quando torrado pelo processo convencional em comparação ao café mole. A perda de massa seca (em termos médios), no café ETM, deve ter sido praticamente igual a do café mole, pois o GI foi de 52,08% (e 52,11% no café mole), todavia, com um menor AVG (75,58% no ETM e 76,37% no café mole), exceção na D220. O GI semelhante entre as suas qualidades de café, contudo, em um menor AVG médio, foi devido a relação ϕ_{GV} / ρ_{GV} (10,09 no café ETM e 9,78 no mole), isto é, menor quantidade de massa em um maior volume de grão verde, com uma maior a_w média (0,58), maior o tempo para a eliminação de água e menor o tempo para a transformação térmica. Na D220, o GI e AVG foram os maiores dentre as qualidades de café, em razão da relação ϕ_{GV}/ρ_{GV} $\left(\frac{6,58}{0,65} = 10,12 \right)$

ser maior, estrutura de grão verde de menor compactação, ainda, maior transferência de calor em uma maior aw de grão verde (0,57), maior transformação térmica, maior formação de CO_2 . O maior ATG, no café ETM, pode ter sido devido, a uma maior pressão de CO_2 (pela maior perda de peso dentre as qualidades de café) e de vapor de água (maior aw dentre as qualidades de café), oriundo da degradação térmica pelo processo de torração (Tabela 16 e Figuras 16 e 17).

O café mole, verde, possuindo, em média, uma menor densidade aparente em comparação ao café duro para melhor, em um menor tamanho médio de grão (menor quantidade de massa/volume que o duro e maior que o ETM), quando torrado pelo sistema de aquecimento convencional, tenha provavelmente exibido uma maior penetração de calor, maior taxa de transferência de calor, a uma menor aw média (Tabelas 16 e 18), e com isso, uma menor quantidade de água evaporada, maior perda de matéria seca, maior perda de peso (Tabelas 16 e 18). A maior perda de matéria seca dentre as qualidades de café, tenha sido decorrente de um maior desdobramento de compostos de alto peso molecular em compostos de menor peso molecular, maior GI, maior AVG pela maior formação de CO_2 , todavia, a um ATG, praticamente igual ao do café duro para melhor, em razão do efeito compensatório entre as pressões do vapor de água e CO_2 a uma menor quantidade de massa em um menor volume de grão verde.

O café mole verde, torrado pelo sistema de microondas a 3500W, em comparação ao café duro para melhor, possuía praticamente a mesma densidade aparente do café duro para melhor a um menor tamanho de grão, menor aw (Tabelas 22 e 18) (menor quantidade de água para a evaporação por ação de um campo eletromagnético), originando com isso, por ocasião do processo de torração, um maior GI no grão (maior perda de matéria seca a um determinado volume) em uma maior perda de peso (Tabela 16 e Figura 16). A maior perda de matéria seca no café mole, em virtude de, uma maior transformação térmica,

proporcionou uma maior formação de CO_2 , maior AVG e ATG. Esta maior formação de CO_2 , em um menor diâmetro e menor a_w no grão verde, gerou uma menor pressão de vapor de água e maior de CO_2 no interior do grão, e desta forma, um maior ATG (Figura 17).

O processo de torração por microondas a 3700W, também exibiu no café mole em comparação ao café duro para melhor, uma maior perda de peso, contudo, em um menor GI, na presença de uma menor quantidade de massa a um praticamente igual volume de grão verde e maior a_w (Tabelas 16, 22 e 18). A menor perda de matéria seca, demonstra menor formação de CO_2 , menor transformação térmica, menor AVG (Tabela 16 e Figura 16), a um semelhante ATG (Figura 17). Ou seja, houve um efeito compensatório entre os dois tipos de pressão (maior pressão de vapor de água e menor de CO_2 no café mole e o contrário no café duro para melhor) originadas no decorrer do processo de torração, em um semelhante tamanho de grão verde, o que deve ter provocado um semelhante ATG. Em relação a perda de peso, a maior a_w do grão verde nesta potência de microondas, fez com o tempo para a eliminação de água do grão fosse maior, e com isso, menor tempo para a destruição térmica, menor a perda de matéria seca a uma maior eliminação de água, maior a perda de peso do grão de café mole.

O café duro para melhor torrado a 3850W, em comparação ao café mole, mostrava uma maior quantidade de massa a um maior volume de grão verde e maior a_w (Tabelas 16, 22 e 18). Com a torração por ação do campo eletromagnético, o efeito do tipo de estrutura do grão de café, mais compactada ou menos compactada, foi fundamental para a determinação do grau de destruição térmica sofrido pelo café. Desta forma, o café duro para melhor, com uma estrutura menos compactada, sofreu um maior destruição térmica, maior GI, maior AVG (Figura 16) e ATG (Figura 17), com uma maior perda de peso.

Comparando os percentuais de diferença entre os processos de torração convencional e por microondas, no café duro para melhor e mole, verificou-se que estes foram maiores para: o AVG (43,21% no mole e 40,38% no duro), Pp (23,37% no duro e 20,26% no mole), GI (16,05% no mole e 15,81% no duro), densidade aparente do grão torrado (15,98% no mole e 14,49% no duro) e ATG (9,20% no mole e 8,62% no duro). E os menores percentuais de diferença para: atividade de água do grão torrado (0,25% no mole e 0,46% no duro), densidade aparente do café verde (1,09% no duro e 1,25% no mole), diâmetro do grão de café verde (1,24% no mole e 1,58% no duro) e diâmetro do grão torrado (3,28% no mole e 3,45% no duro). Onde, em média, as maiores diferenças percentuais, entre a torração convencional e a de microondas, ocorreram no café mole, em comparação ao café duro para melhor, e entre os parâmetros físicos, o AVG exibiu o maior percentual de diferença, seguido da perda de peso e do GI (Tabela 16).

Os percentuais de diferença entre o café duro para melhor e o mole, torrados pelo processo convencional, foram de: 7,89% para o AVG; 5,53% para a densidade aparente do café torrado; 4,64% para a perda de peso; 4,25% para o GI; 3,12% para o ATG; 2,94% para a a_w do grão torrado; 1,21% para a densidade aparente do grão verde; 1,01% para o diâmetro do grão verde; e 0,39% para o diâmetro do grão torrado (Tabela 16). Também o aumento de volume do grão, foi o que traduziu a maior diferença percentual entre as duas qualidades de café, torradas pelo sistema convencional. A maior ou menor transformação térmica dos compostos de alto peso molecular em compostos de baixo peso molecular (maior ou menor quantidade de compostos de gosto e aroma), com a maior ou menor formação de CO_2 , e daí, um maior ou menor AVG, nos cafés duro para melhor e mole torrados pelo sistema convencional, a uma dada taxa de transferência de calor, foram os determinantes das maiores diferenças entre as duas respectivas qualidades de café.

Os percentuais de diferença entre o café duro para melhor e o estritamente mole, no processo de torração convencional, seguiram a seguinte ordenação: os maiores percentuais de diferença para a aw do grão torrado (8,53%), perda de peso (7,48%), ATG (7,22%), AVG (6,93%), densidade aparente do grão torrado (6,50%), GI (4,20%) e densidade aparente do grão verde (2,28%) e os menores percentuais de diferença, para o diâmetro do grão torrado (0,75%) e do grão verde (0,99%) (Tabela 16). A atividade de água, levando a um maior ou menor tempo para a eliminação de água e menor ou maior tempo para a transformação térmica, e com isso, menor ou maior perda de matéria seca e maior ou menor perda de água, influenciando na perda de peso dos cafés duro para melhor e ETM torrados pelo sistema convencional, foram as principais diferenças entre estas duas qualidades de café.

Entre o café estritamente mole e o mole, no processo de torração convencional, os percentuais de diferença observados foram: 5,76% para a aw no café torrado, 4,24% para o ATG, 2,98% para a perda de peso, 1,14% para o diâmetro do grão torrado, 1,08% para a densidade aparente do grão verde, 1,03% para a densidade do grão torrado e AVG, 0,05% para o GI e 0,02% para o diâmetro do grão verde (Tabela 16). Entre estas duas maiores qualidades de café, a atividade de água, originando uma dada pressão do vapor de água e de CO₂ a semelhantes diâmetros de grão verde, durante o processo de torração convencional doméstica e rápida, promoveu um maior ou menor ATG, e desta forma, se diferenciando entre si.

5.3.3. Cor

Segundo CIE (1976), as coordenadas de cromaticidade a^* e b^* , da escala CIE, indicam a direção de cor, onde $+a^*$ é a direção para o vermelho e $-a^*$ para o verde, $+b^*$ é a direção para o amarelo e $-b^*$ para o azul. Pela observação da Tabela 18 pode-se verificar que o café duro para melhor verde apresentou uma

diferença de percentual para a coordenada de cromaticidade a^* de 44,35% em comparação ao café mole, com uma direção de cor mais para o verde (a^* igual a 1,20) que as outras qualidades de café. O valor da coordenada de cromaticidade b^* foi de 17,11, para o café duro para melhor, com uma diferença percentual de 4,32% em comparação com o café mole e de 4,71% em comparação com o café ETM, com uma direção da cor para o amarelo (Tabela 18 e Figura 18).

Entre o café mole e estritamente mole verde, a diferença de percentual para a coordenada a^* foi de 3,09%, entre os valores de 2,15 e 2,22, respectivamente; com uma direção de cor para o vermelho. E para a coordenada de b^* a diferença percentual foi de 0,41%, com uma maior direção de cor para o amarelo. Ou seja, as coordenadas de cromaticidade foram muito semelhantes entre o café mole e o estritamente mole, enquanto que em comparação ao café duro para melhor, a coordenada de cromaticidade a^* apresentou uma diferença percentual mais relevante (44,35% entre o café duro e o mole e 46,07% entre o café duro e o café ETM) (Tabela 18 e Figura 18).

Os parâmetros de cor L^* (representando a luminosidade) nos cafés verdes, foram maiores (tonalidade mais clara), nos cafés mole e ETM que no café duro para melhor (tonalidade mais escura), com uma diferença percentual de 0,26% entre o café mole e o ETM, 3,12% entre o café ETM e o duro para melhor, e de 3,37% entre o mole e o duro para melhor (Tabela 18). Em contrapartida, o maior grau de uniformidade de cor ($\Delta L = LTM-LTI$) foi do café ETM em comparação ao café mole e duro para melhor. Este maior grau de uniformidade de cor está relacionado a um café de melhor qualidade, segundo CARVALHO et alii (1989), pois o café duro para melhor, qualidade inferior ao do mole e estritamente mole, reportou o maior valor de ΔL^* (13,40) (menor grau de uniformidade de cor), a uma diferença percentual de 5,44% entre o café duro para melhor e o ETM, 2,39% entre o café duro e o mole, e 3,12% entre o café mole e o ETM (Tabela 18).

TABELA 18: Valores obtidos para a densidade aparente (ρ) (g/mL), pH, concentração iônica (CI) (mV), atividade de água (aw), parâmetros de cor (a^* , b^* , L^* e ΔL^*) e os seus respectivos percentuais de diferença (%), nos grãos de café verde (duro para melhor, mole e estritamente mole)

| Qualidade | Cor | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | ρ | pH | CI | aw | a^* | b^* | L^* | ΔL^* |
| Café Duro para Melhor | | | | | | | | |
| Saca 1 | 0,6790 | 6,27 | 46,10 | 0,573 | 1,56 | 17,27 | 43,26 | 12,39 |
| Saca 2 | 0,6817 | 6,29 | 45,20 | 0,545 | 1,19 | 16,41 | 42,95 | 13,89 |
| Saca 4 | 0,6842 | 6,29 | 45,30 | 0,629 | 0,90 | 16,92 | 42,82 | 12,97 |
| Saca 5 | 0,6809 | 6,32 | 43,30 | 0,562 | 1,27 | 17,35 | 42,83 | 14,07 |
| Saca 6 | 0,6785 | 6,30 | 44,70 | 0,557 | 1,17 | 17,52 | 43,46 | 13,58 |
| Saca 8 | 0,6870 | 6,26 | 47,20 | 0,565 | 0,99 | 17,18 | 43,55 | 13,17 |
| Saca 9 | 0,6954 | 6,30 | 44,80 | 0,576 | 1,29 | 17,10 | 42,42 | 13,75 |
| Média | 0,6838 | 6,29 | 45,23 | 0,572 | 1,20 | 17,11 | 43,04 | 13,40 |
| DP | 0,0059 | 0,02 | 1,21 | 0,027 | 0,21 | 0,36 | 0,40 | 0,59 |
| CV (%) | 0,86 | 0,32 | 2,68 | 4,71 | 17,99 | 2,11 | 0,93 | 4,42 |
| grau diferença | > | > | < | > | < | < | < | > |
| Café Mole | | | | | | | | |
| Saca 1 | 0,6515 | 6,23 | 48,90 | 0,522 | 2,18 | 17,42 | 44,17 | 14,27 |
| Saca 2 | 0,6622 | 6,23 | 49,00 | 0,547 | 2,03 | 17,57 | 44,89 | 13,10 |
| Saca 3 | 0,6786 | 6,23 | 49,00 | 0,547 | 2,09 | 17,72 | 44,63 | 13,36 |
| Saca 4 | 0,6747 | 6,24 | 48,40 | 0,591 | 2,10 | 18,23 | 45,33 | 11,94 |
| Saca 6 | 0,6731 | 6,23 | 49,00 | 0,568 | 2,41 | 18,69 | 44,61 | 11,83 |
| Saca 8 | 0,6848 | 6,23 | 49,00 | 0,549 | 2,15 | 17,54 | 43,94 | 13,72 |
| Saca 9 | 0,6813 | 6,24 | 47,80 | 0,569 | 2,08 | 17,99 | 44,24 | 13,36 |
| Média | 0,6723 | 6,23 | 48,73 | 0,556 | 2,15 | 17,88 | 44,54 | 13,08 |
| DP | 0,0117 | 0,00 | 0,46 | 0,0220 | 0,12 | 0,45 | 0,47 | 0,90 |
| CV (%) | 1,74 | 0,08 | 0,95 | 3,96 | 5,82 | 2,54 | 1,06 | 6,87 |
| grau diferença | ≡ | ≡ | ≡ | < | ≡ | ≡ | > | ≡ |
| diferença em relação ao Duro (%) | 1,68 | 0,91 | 7,18 | 2,85 | 44,35 | 4,32 | 3,37 | 2,39 |
| Café Estritamente Mole | | | | | | | | |
| Saca 1 | 0,6496 | 6,16 | 53,30 | 0,579 | 2,18 | 18,21 | 45,02 | 11,76 |
| Saca 2 | 0,6525 | 6,18 | 51,60 | 0,558 | 2,30 | 17,82 | 44,12 | 12,50 |
| Saca 4 | 0,6611 | 6,19 | 51,20 | 0,576 | 2,01 | 17,58 | 43,74 | 12,61 |
| Saca 5 | 0,6828 | 6,18 | 51,60 | 0,583 | 2,45 | 18,56 | 45,15 | 12,84 |
| Saca 6 | 0,6721 | 6,16 | 53,30 | 0,569 | 2,21 | 17,33 | 43,90 | 13,55 |
| Saca 8 | 0,6482 | 6,19 | 51,20 | 0,560 | 2,15 | 18,66 | 45,58 | 11,83 |
| Saca 9 | 0,6466 | 6,18 | 51,60 | 0,578 | 2,22 | 17,51 | 43,49 | 13,63 |
| Média | 0,6590 | 6,18 | 51,97 | 0,572 | 2,22 | 17,95 | 44,43 | 12,67 |
| DP | 0,0138 | 0,01 | 0,93 | 0,0098 | 0,14 | 0,53 | 0,81 | 0,74 |
| CV (%) | 2,09 | 0,20 | 1,78 | 1,71 | 6,11 | 2,94 | 1,82 | 5,84 |
| grau diferença | < | < | > | > | > | > | ≡ | < |
| diferença em relação Duro (%) | 3,63 | 1,79 | 12,97 | 0,10 | 46,07 | 4,71 | 3,12 | 5,44 |
| diferença em relação ao Mole (%) | 1,98 | 0,89 | 6,24 | 2,75 | 3,09 | 0,41 | 0,26 | 3,12 |

grau de diferença: menor (<), maior (>) e intermediária (≡) entre as qualidades de café

Deste modo, a cor dos cafés verdes das três diferentes qualidades de café em estudo, em relação as coordenadas de cromaticidade a^* e b^* , L^* e ΔL^* foram as seguintes: no café duro para melhor, um maior aumento do componente verde da cor em a^* , um menor incremento da cor amarela em b^* , luminosidade [maior na MO3500W, média (D210 e MO3700W), baixa (D220, R210, MO3850W e R220)] em L^* , em uma uniformidade de cor [ΔL^* : maior em D220, MO3850W, R210 e R220 e menor em MO3500W, D210 e MO3700W]; no café mole, um incremento do componente verde da cor praticamente igual ao do café ETM em a^* , um incremento de amarelo em b^* (também praticamente igual ao do café ETM, mas em valor menor ao do café duro para melhor), luminosidade [maior na MO3500W, média (3700W e D210) e baixa (MO3850W, R210, D220, R220)] em L^* , em uma uniformidade de cor [ΔL^* : maior em R220, D220 e R210, e menor em D210, MO3700W, MO3500W e MO3850W]; e no café ETM, um incremento de verde um pouco menor que o do café mole em a^* , um incremento de amarelo um pouco maior que o do café mole em b^* , luminosidade [média (D210) e baixa (R210, D220 e R220)] em L^* , todavia, em uma uniformidade de cor [ΔL^* : maior em R220, R210 e D220, e menor em D210].

A torração doméstica a 210/C, com uma perda de peso média de 13,01%, produziu no grão: um incremento da cor vermelha, na coordenada de cromaticidade a^* (5,69 - 5,89), um incremento da cor amarela, na coordenada de cromaticidade b^* (7,31 - 8,84); um valor de L^* (25,73 - 26,66) de ¹

¹ O termo maior, média ou baixa luminosidade foi utilizado neste trabalho, como um termo de comparação para os valores obtidos para o parâmetro L^*

TABELA 19: Resultados médios encontrados para os parâmetros de cor [a^* , b^* , L^* , ΔL^* , " f ", ângulo de matiz (h^*) (graus), ΔH^* , croma (C^*), ΔC^* e ΔE^*] nos grãos de café (duro para melhor, mole e estritamente mole) torrados pelos sistemas convencional e microondas

| Tipo de Torração | a^* | b^* | L^* | ΔL^* | f | h^* | ΔH^* | C^* | ΔC^* | ΔE^* |
|-------------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Convencional Doméstico 210°C | | | | | | | | | | |
| Duro | 5,89 | 8,84 | 26,66 | 1,13 | 0,65 | 56,25 | 0,26 | 10,62 | 5,20 | 5,33 |
| Mole | 5,73 | 7,31 | 26,18 | 0,89 | 0,44 | 51,77 | 1,14 | 9,29 | 5,14 | 5,44 |
| ETMole | 5,69 | 8,02 | 25,73 | 1,21 | 0,76 | 54,53 | 0,41 | 9,83 | 4,74 | 4,91 |
| Média | 5,77 | 8,06 | 26,19 | 1,08 | 0,62 | 54,18 | 0,60 | 9,91 | 5,03 | 5,23 |
| Convencional Doméstico 220°C | | | | | | | | | | |
| Duro | 4,42 | 5,78 | 24,54 | -1,25 | -1,68 | 52,49 | 0,08 | 7,27 | 2,38 | 2,72 |
| Mole | 3,78 | 4,55 | 23,58 | -0,75 | -1,16 | 50,30 | 0,23 | 5,92 | 2,51 | 2,65 |
| ETMole | 2,95 | 3,31 | 22,31 | -1,10 | -1,49 | 48,24 | 0,11 | 4,43 | 1,62 | 2,33 |
| Média | 3,72 | 4,54 | 23,47 | -1,03 | -1,44 | 50,34 | 0,14 | 5,87 | 2,17 | 2,56 |
| Convencional Rápido 210°C | | | | | | | | | | |
| Duro | 4,20 | 5,79 | 23,32 | -0,03 | -0,45 | 53,97 | 0,76 | 7,15 | 2,66 | 2,46 |
| Mole | 4,39 | 6,02 | 23,64 | -0,49 | -0,90 | 53,90 | 0,21 | 7,45 | 1,93 | 2,22 |
| ETMole | 4,28 | 5,94 | 24,27 | -0,76 | -1,20 | 54,20 | 0,33 | 7,32 | 2,30 | 2,45 |
| Média | 4,29 | 5,91 | 23,74 | -0,43 | -0,85 | 54,02 | 0,43 | 7,30 | 2,29 | 2,37 |
| Convencional Rápido 220°C | | | | | | | | | | |
| Duro | 3,44 | 4,34 | 21,49 | -0,005 | -0,39 | 51,61 | 1,58 | 5,53 | 2,41 | 1,81 |
| Mole | 3,15 | 4,09 | 22,87 | -1,93 | -2,32 | 52,36 | 0,21 | 5,16 | 1,17 | 2,26 |
| ETMole | 2,83 | 3,31 | 21,20 | -0,02 | -0,39 | 49,29 | 0,04 | 4,35 | 1,64 | 1,65 |
| Média | 3,14 | 3,91 | 21,85 | -0,65 | -1,03 | 51,09 | 0,61 | 5,01 | 1,74 | 1,91 |
| Microondas a 3500W | | | | | | | | | | |
| Duro | 7,61 | 14,58 | 31,49 | 3,97 | 3,42 | 62,45 | 1,31 | 16,45 | 1,74 | 4,34 |
| Mole | 8,24 | 15,38 | 33,53 | 0,09 | -0,49 | 61,81 | 0,02 | 17,45 | 2,36 | 2,36 |
| Média | 7,93 | 14,98 | 32,51 | 2,03 | 1,47 | 62,13 | 0,67 | 16,95 | 2,05 | 3,35 |
| Microondas a 3700W | | | | | | | | | | |
| Duro | 5,65 | 8,16 | 25,48 | 0,88 | 0,43 | 55,29 | 4,57 | 9,92 | 7,97 | 9,23 |
| Mole | 6,85 | 11,45 | 29,29 | 0,81 | 0,30 | 59,13 | 0,32 | 13,34 | 3,55 | 3,66 |
| Média | 6,25 | 9,81 | 27,39 | 0,85 | 0,37 | 57,21 | 2,45 | 11,63 | 5,76 | 6,45 |
| Microondas a 3850W | | | | | | | | | | |
| Duro | 4,84 | 5,49 | 22,99 | -0,88 | -1,29 | 48,01 | 0,12 | 6,20 | 1,12 | 1,42 |
| Mole | 5,12 | 7,62 | 24,81 | 0,04 | -0,40 | 56,10 | 0,14 | 9,18 | 1,99 | 2,00 |
| Média | 4,98 | 6,55 | 23,90 | -0,42 | -0,85 | 52,06 | 0,13 | 7,69 | 1,56 | 1,71 |

média luminosidade; um ângulo de matiz vermelho ($51,77^\circ - 56,25^\circ$); um croma (9,29 - 10,62) um pouco forte; uma diferença de cromaticidade (4,74 - 5,20) de alta saturação; uma diferença de matiz (ΔH^*) (0,26 - 1,14) para um vermelho mais amarelado (o que significa que a cor do grão torrado ficou mais próxima do eixo do b^*); em uma maior diferença total de cor (ΔE^*) (4,91 a 5,44), apenas menor que a do café duro para melhor torrado por microondas a 3700W (Tabela 19 e Figuras 18 e 19). FRANCIS & CLYDESDALE (1975) verificaram que a tolerância aceitável para a diferença total de cor no café torrado ficava entre 0,3 e 3,60, de maneira que, este limite foi superado para os três tipos de qualidade de café, torrados por processo doméstico a 210°C .

O processo de torração convencional rápido a 210°C , com uma perda de peso média de 15,38%, determinou como: a^* um menor incremento do componente vermelho (4,20 a 4,39) em comparação a D210; b^* um incremento do amarelo menor que a da D210 (5,79 a 6,02); L^* com baixa luminosidade (23,32 a 24,27); ângulo de matiz vermelho ($53,90^\circ$ a $54,20^\circ$); croma mais fosco que no D210 (7,15 a 7,45); diferença de cromaticidade (1,93 - 2,66) com média saturação; diferença de matiz (0,21 a 0,76) para um vermelho mais amarelado que na D210; e diferença total de cor (ΔE^*) (2,22 a 2,46) dentro da tolerância aceitável segundo FRANCIS & CLYDESDALE (1975) (Tabela 19 e Figuras 18 e 19).

O processo de torração convencional doméstico a 220°C , com uma perda de peso média de 16,43%, originou como: a^* um incremento de vermelho menor que na R210 (2,95 - 4,42); b^* um incremento de amarelo menor que na R210 (3,31 - 5,78); L^* com um valor de baixa luminosidade semelhante ao obtido na R210 (22,31 - 24,54); ângulo de matiz vermelho ($48,24^\circ - 52,49^\circ$); croma mais fosco que na R210 (4,43 - 7,27); diferença de cromaticidade de média saturação mas menor que na R210 (1,62 - 2,51); diferença de matiz (0,08 - 0,23) um

[The page contains extremely faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the paper. The text is arranged in several paragraphs and is not readable.]

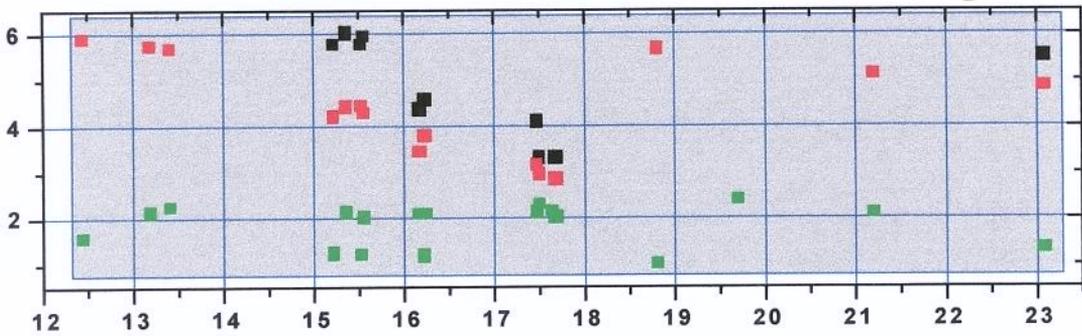
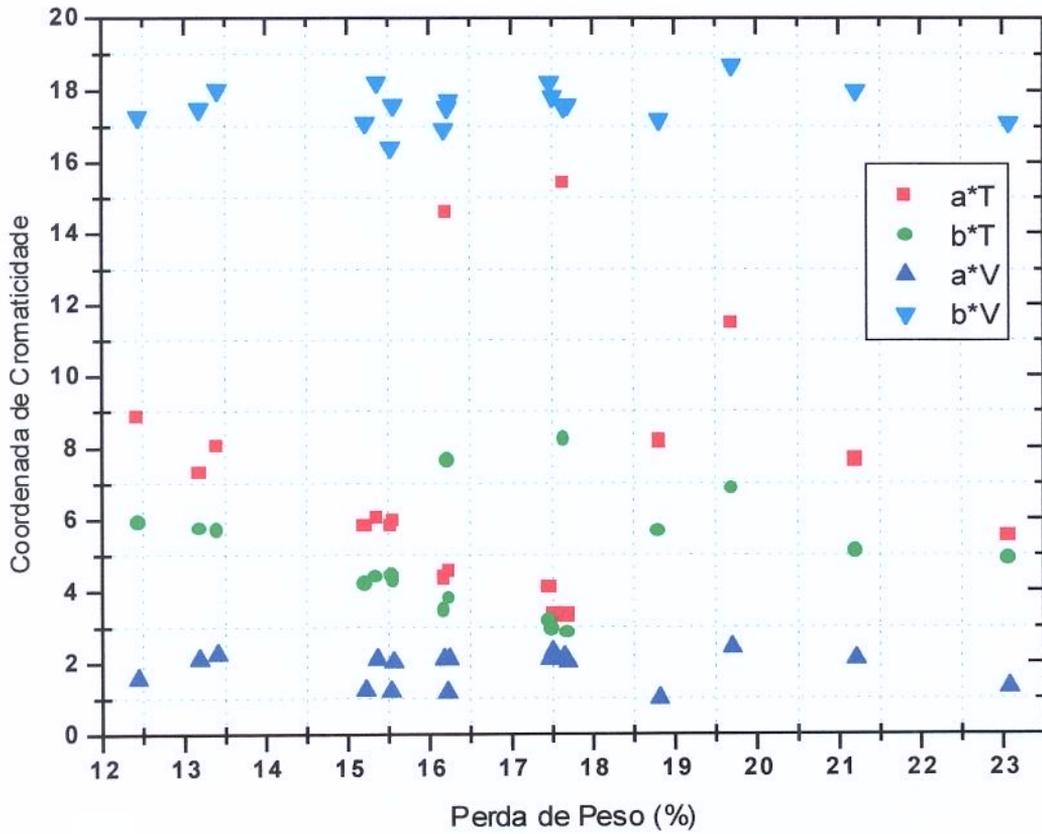
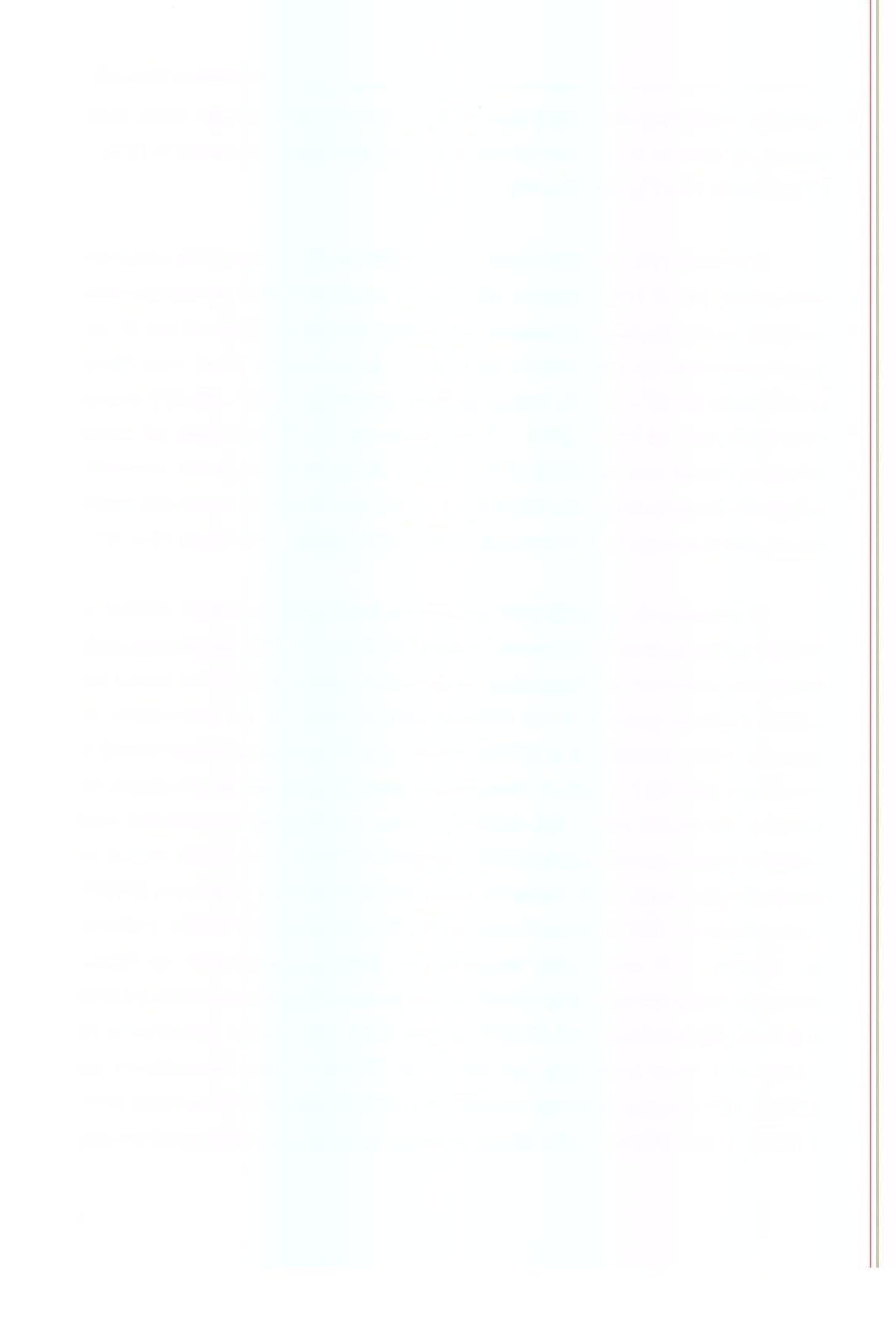


FIGURA 18: Os parâmetros de cor CIELAB a^* e b^* , nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, verde e torrado (sistemas convencional e microondas) em relação a perda de peso (%)

vermelho ainda mais amarelado que na R210 (cor do grão torrado, ainda mais próximo do eixo de b^*); e uma diferença total de cor maior que na R210 (2,33 - 2,72) (Tabela 19 e Figuras 18 e 19).

O processo de torração convencional rápido a 220°C, com uma perda de peso média de 17,11%, mostrou como: a^* o menor aumento do componente vermelho na cor dentre os processos de torração em estudo (2,83 - 3,44); b^* um maior incremento do componente azul na cor (3,31 - 4,34); L^* de mais baixa luminosidade (21,20 - 22,87); ângulo de matiz vermelho (49,29° - 52,36°); croma mais fosco que na D220 (4,35 - 5,53); diferença de cromaticidade de baixa saturação menor que na D220 (1,17 - 2,41); diferença de matiz um vermelho amarelado semelhante ao da D210 (0,04 -1,58); ΔE^* a menor observada neste estudo dentre a torração convencional (1,65 - 2,26) (Tabela 19 e Figura 18 e 19).

O processo de torração pelo sistema de microondas a 3500W, 3700W, e 3850W, perda de peso média de de 16,94%, 19,26% e 22,15%, respectivamente, apresentou como: a^* : um incremento de vermelho maior em 3500W e menor em 3850W (todavia, maior que no sistema convencional); b^* : um incremento de amarelo, maior em 3500W e 3700W (maior que pelo sistema convencional) e menor em 3850W; L^* : com a luminosidade mais alta dentre os processos de torração em estudo (maior em 3500W e menor em 3700W) (tonalidades mais claras) e baixa luminosidade a 3850W (semelhante nas R210 e D220); ângulo de matiz vermelho em 3850W, vermelho alaranjado em 3700W e laranja em 3500W; croma: fosco em 3850W (semelhante na R210), forte (vivo) em 3700W e intenso em 3500W; ΔC^* : com baixa saturação em 3850W (semelhante na R220), saturação média em 3500W e 3700W no café mole (semelhante na D220 e R210) e a mais alta saturação em 3700W no café duro para melhor (semelhante na D210); ΔH^* : mais amarelado em 3850W e 3500W e mais avermelhado em 3700W; ΔE^* : a menor diferença em 3850W e 3500W (semelhante na R220, R210 e D220) e em 3700W a maior diferença dentre os processos de torração em estu



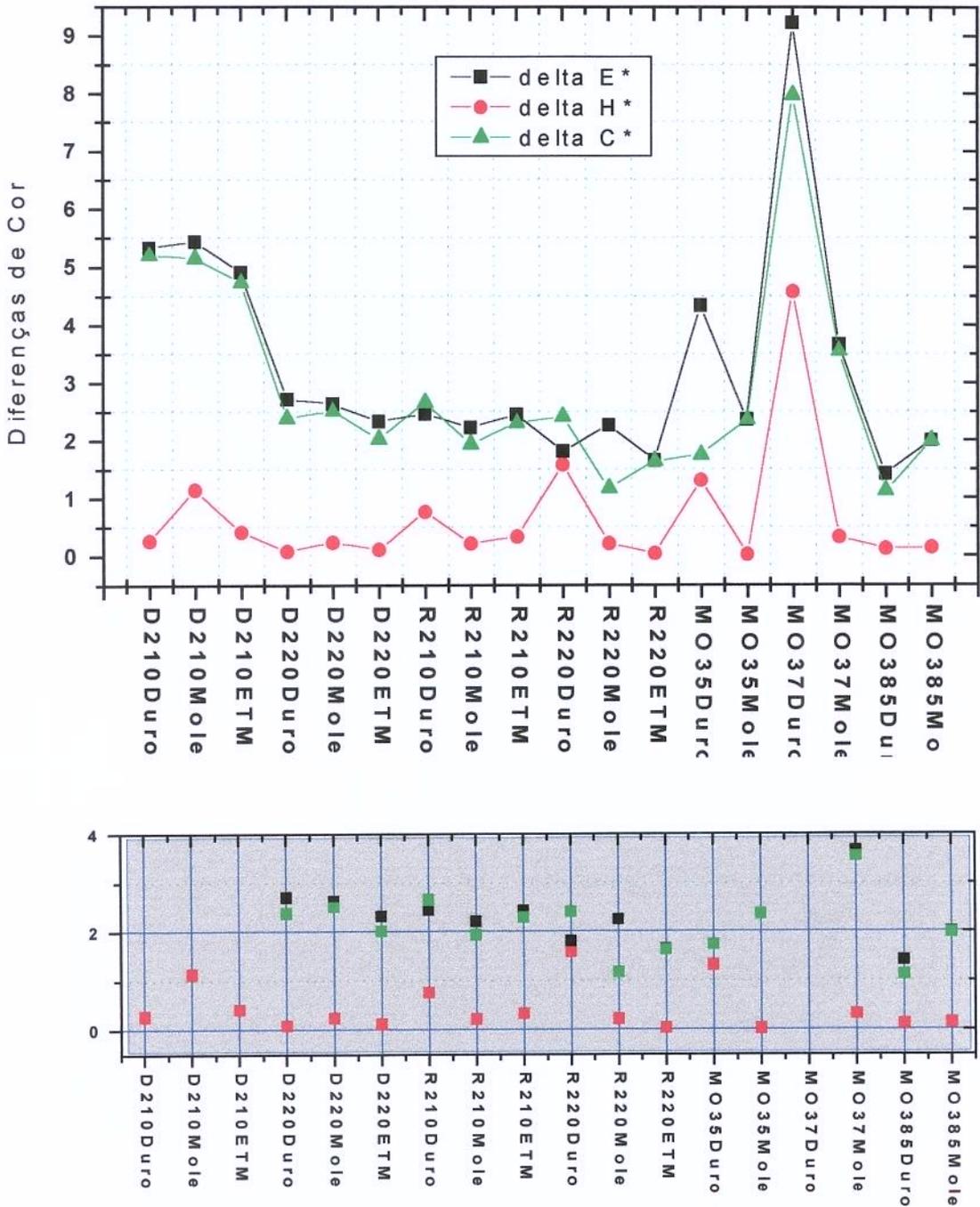


FIGURA 19: Diferença de cromaticidade (delta C*), diferença de matiz (delta H*) e diferença total de cor (delta E*) nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, torrados pelo sistema convencional e microondas

do [acima da tolerância aceitável para café torrado, de acordo com FRANCIS & CLYDESDALE (1975)] (Tabela 19) (Figuras 18 e 19).

A uma determinada faixa de perda de peso, os resultados encontrados para croma (índice de saturação) (C^*), diferença de cromaticidade (ΔC^*), ângulo de matiz (h^*) e diferença de matiz (ΔH^*), neste estudo, foram: de 12,44% a 13,41%: pouco forte a uma alta saturação para C^* e ΔC^* e vermelho amarelado para h^* e ΔH^* ; de 15,22% a 17,69%: fosco [baixa saturação (R220) e média saturação (R210 e D220)] e intenso [média saturação (MO3500W)] para C^* e ΔC^* , e vermelho amarelado (R220, R210 e D220) e laranja amarelado (MO3500W) para h^* e ΔH^* ; superior a 18%: fosco a mais baixa saturação (MO38500W) e forte a média saturação (MO370W no café mole) e a alta saturação (MO3700W no café duro para melhor) para C^* e ΔC^* , e vermelho amarelado (3850W) e vermelho alaranjado (3700W) para h^* e ΔH^* (Tabela 19). Neste estudo, os resultados encontrados para o croma e ângulo de matiz, a uma perda de peso de 16,22% [MO3500W no café duro para melhor], e de 17,51%, 17,47% e 17,69% [D220 no café ETM, R220 nos cafés, mole e ETM], situaram-se dentro da faixa (Tabela 3) observada por SEVERINI et alii (1991).

Pelo processo de torração convencional e por microondas, os parâmetros de cor CIELAB reportaram: na coordenada de cromaticidade a^* um incremento no vermelho; na coordenada de cromaticidade b^* um aumento no amarelo; no L^* uma maior luminosidade (MO3500W), média luminosidade (MO3700W e D210) e baixa luminosidade (MO3850W, R210, D220 e R220); no ângulo de matiz vermelho (D210, R210, D220, R220 e MO3850W), vermelho alaranjado (3700W) e laranja (MO3500W); no croma fosco (R210, D220, R220 e MO3850W), pouco forte (D210), forte (MO3700W) e intenso (MO3500W); e na diferença de cromaticidade, uma alta saturação (D210 e 3700W no café duro para melhor)

média saturação (R210, D220, MO3500W e 3700W no café mole) e baixa saturação (R220 e 3850W) (Tabelas 19 e 20).

Em relação a diferença total de cor ($\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$), os processos de torração que proporcionaram valores superiores ao limite preconizado por FRANCIS & CLYDESDALE (1975), para o café torrado, foram: microondas em 3700W, no café mole [3,66, em um matiz vermelho alaranjado, croma forte e ΔC^* de média saturação] e no café duro para melhor [com destaque para o maior ΔE^* (9,23), em um matiz vermelho, croma pouco forte e ΔC^* com alta saturação], e em 3500W, no café duro para melhor [4,34, em um matiz laranja, croma mais vivo, e ΔC^* com baixa saturação]; e convencional na D210, nas três qualidades de café em análise [5,23 como valor médio, em um matiz vermelho, croma pouco forte, e ΔC^* com alta saturação] (Tabela 19 e Figura 19).

No café duro para melhor, torrado por microondas a 3500W, o ΔE^* acima do limite de 3,60, aconteceu em razão do maior valor encontrado para ΔL^* (3,97) e para o fator de "f" (3,42) (Tabela 19), neste estudo. Os parâmetros de cor ΔL^* e "f", sendo positivos e de maior valor absoluto, a cor interna do grão apresentava-se bem mais escura que a sua cor externa, maior o grau de torração no interior do grão, e segundo KIRKPATRICK et alii (1992) e LERICI et alii (1980), quanto maior e mais positivo estes dois fatores, maior o grau de desuniformidade de tratamento térmico durante a torração.

Pelo processo de torração por microondas a 3700W e convencional doméstico a 210°C, um ΔE^* acima do limite preconizado para café torrado, ocorreu em razão, de valores de ΔC^* acima de 3,55 (alta saturação) em comparação aos demais, estes proporcionados, por uma maior variação das coordenadas de cromaticidade a^* e b^* , entre o café torrado inteiro e moído, em

um valor de ΔL^* e " f " positivos (maior grau de torração no interior do grão que no seu exterior, maior o grau de desuniformidade térmica no grão de café) (Tabela 19). Pois, para MINOLTA (1994), a ΔE^* (diferença total de cor) indica o tamanho da diferença de cor, mas não o porque das cores serem diferentes.

Pelo sistema de cor CIELAB, a escala de L^* é de 100 unidades de divisões iguais, o preto absoluto constitui o $L^* = 0$ e o branco absoluto o $L^* = 100$. Conseqüentemente, segundo KIRKPATRICK et alii (1992), na medida do grau de torração, quanto menor for o valor da escala de L^* maior o grau de torração, mais escura seria a cor do grão torrado. A variação do valor de L^* , constituiu o termo de cor ΔL^* de Hunter, que compara L^* no café moído e no grão inteiro.

Para LERICI et alii (1980), o parâmetro de cor ΔL^* negativo, significava um valor de L^* no grão inteiro superior ao mesmo quando moído, logo, a cor externa do grão era mais escura que a do seu interior, maior o grau de destruição térmica na superfície do grão que no interior deste; e um valor de ΔL^* positivo, representava um maior grau de torração no interior do grão que na sua superfície. Conseqüentemente, quanto maior era o valor de ΔL^* , menor a uniformidade do tratamento térmico. O fator " f " ($f = LTM-LIT/LVM-LIT$) fornecia um índice do grau de uniformidade da torração no grão de café, correspondendo a um valor teórico igual a 1 no grão verde, independente da natureza desta cor verde. Com o transcorrer do processo de torração, este " f " variava de acordo com as mudanças físicas que o grão sofria, como a redução de peso, o aumento de volume e a redução de matéria seca.

Este fator de " f ", correlacionava os valores de L^* no grão verde moído com os do grão torrado inteiro e moído. De maneira que, por correlacionar os valores de L^* entre o grão verde moído e o grão torrado inteiro e moído, se constituía em um parâmetro mais sensível para a avaliação do grau de uniformidade do tratamento térmico durante o processo de torração, e quanto maior e mais

positivo, maior o grau de desuniformidade do tratamento térmico durante a torração (DALLA ROSA et alii, 1980).

O parâmetro de cor ΔL^* e o fator "f" observados neste trabalho, comparados aos diferentes tipos de processos de torração e qualidades de café, podem ser descritos da seguinte maneira: valores negativos para ΔL^* e "f" - na D220, MO3850W (café duro para melhor), R220, R210 e; valores positivos para ΔL^* e negativos para "f" - na MO3500W e MO3850W (café mole); valores positivos para ΔL^* e "f" - na MO3700W, D210 e MO3500W (café duro para melhor) (maior desuniformidade de tratamento térmico) (Tabela 19 e Figura 20).

Nos cafés, mole (D210 e R210), duro para melhor (R210), e ETM (R220) que demonstraram diferenças nas suas repetições, quanto a grandeza positiva ou negativa dos parâmetros de cor ΔL^* e "f", foi realizado o cálculo dos seus respectivos valores médios: 0,89 para ΔL^* e 0,44 para "f" (D210) e -0,49 para ΔL^* e -0,90 para "f" (R210), no café mole; -0,03 para ΔL^* e -0,45 para "f" (R210), no café duro para melhor; e -0,02 para ΔL^* e -0,39 para "f" (R220), no café ETM (Tabela 19 e Figura 20).

Os processos de torração convencionais (D220, R210 e R220) e microondas a 3850W (café duro para melhor) foram os que proporcionaram nas três qualidades de café em estudo, uma cor mais escura na superfície do grão, sinônimo de um maior grau de destruição térmica na parte externa do grão, mas pelos valores de "f" um maior grau de uniformidade de tratamento térmico por ocasião do processo de torração. Os valores de cor L^* ficaram na faixa de 21,20 a 24,54, em uma perda de peso de 15,22% a 17,69% (Tabelas 16 e 19 e Figura 20).

O café mole, torrado por microondas a 3500W apresentou a maior luminosidade (L^* : 33,53) (tonalidade mais clara) e a 3700W (L^* : 29,29) a menor

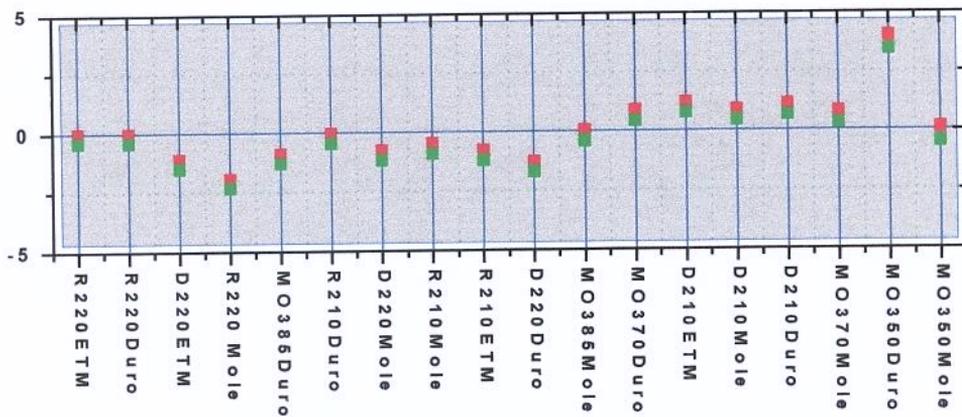
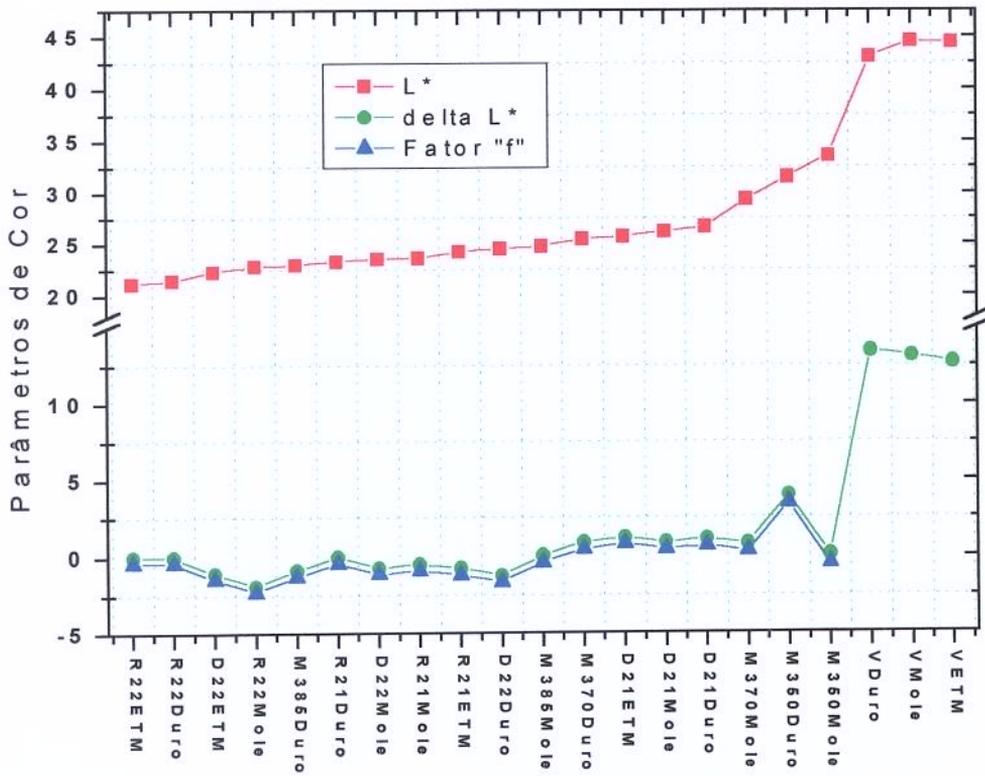


FIGURA 20: Efeito dos parâmetros de cor CIELAB L* e ΔL^* (delta L*) e o Fator "f", nos cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, verde e torrado (sistema convencional e microondas)

luminosidade média, dentre os processos de torração em estudo (Tabela 19). Na potência de 3500W, o café mostrou uma cor externa mais escura que a sua interna, maior grau de torração na superfície do grão e maior uniformidade de tratamento térmico, pelo valor de "f" negativo, e na potência de 3700W, uma cor interna mais escura que a externa, maior grau de torração no interior do grão que no seu exterior e menor uniformidade de tratamento térmico ("f" positivo) (Tabela 19 e Figura 19).

KIRKPATRICK et alii (1992) patentearam um processo de torração para a produção de café com densidade reduzida (torração rápida) de maior uniformidade de cor que o processo tradicional doméstico, de modo que, os valores de ΔL^* obtidos na presente invenção foram menores do que 1,2, mas preferencialmente menores que 0,6, a uma faixa de L^* de 14 a 25. No presente estudo, os processos que mostraram valores para ΔL^* maiores que 1,2, foi o convencional doméstico a 210°C, no café ETM (1,21), e o de microondas em 3500W, no café duro para melhor (3,97), a uma perda de peso de 13,41% e 16,22%, respectivamente (Tabelas 16 e 19).

Os processos de torração, que produziram no grão de café o maior grau de desuniformidade de tratamento térmico ("f" positivo), assim como um maior grau de torração no interior que no exterior do grão (ΔL^* positivo), foram os processos: MO3500W no café duro para melhor, D210 e MO3700W. De maneira que, o maior grau de desuniformidade de tratamento térmico ocorreu no café duro para melhor (ΔL^* : 3,97 e "f": 3,42), na torração por microondas a 3500W, seguido dos cafés ETM (ΔL^* : 1,21 e "f": 0,76) e duro para melhor (ΔL^* : 1,13 e "f": 0,65), na D210, e dos cafés duro para melhor a 3700W (ΔL^* : 0,88 e "f": 0,43) e mole a 3700W (ΔL^* : 0,81 e "f": 0,30). Estes apresentaram valores de L^* de 31,49, 25,73 e 26,66, e de 25,48 e 29,29, respectivamente, com a maior (MO3500W no café

duro para melhor) e média (MO3700W e D210) luminosidade (Tabela 19 e Figura 20), neste estudo.

Para DUPLATE et alii (1987), o processo convencional de torração rápida, produziu uma coloração mais escura na superfície do grão e uma atenuação gradativa da cor em direção ao interior do grão, e esta atenuação era nitidamente menor no grão torrado pelo processo doméstico. Neste estudo, esta mesma tendência foi exibida pela torração rápida em comparação a torração doméstica a 210°C e a 220°C, uma vez que, menores valores de ΔL^* e " f " negativos foram reportados para R220 (ΔL^* : -0,65 e " f " : -1,03) e R210 (ΔL^* : -0,43 e " f " : -0,85), e maiores valores para D220 (ΔL^* : -1,03 e " f " : -1,44) e D210 (ΔL^* : 1,08 e " f " : 0,62). Onde, entre a torração rápida, o R220 foi o que demonstrou o maior grau de uniformidade de tratamento térmico, e entre a torração doméstica, o D210 foi o apresentou o maior grau de desuniformidade de tratamento térmico (Tabela 19).

Portanto, a ordem de uniformidade de tratamento térmico, considerando os parâmetros médios de cor ΔL^* e " f ", obedeceu a seguinte ordem: D220 (maior uniformidade de tratamento térmico), MO3850W (café duro para melhor), R220, R210, MO3500W (café mole), MO3850W (café mole), MO3700W, D210 e MO3500W (café duro para melhor: maior desuniformidade de tratamento térmico pelo processo de torração). Entre as diferentes potências de microondas, a que produziu o maior grau de uniformidade de tratamento térmico foi a de 3850W no café duro para melhor (ΔL^* : -0,88 e " f " : -1,29), e a de maior desuniformidade, a de 3500W, no café duro para melhor (ΔL^* : 3,97 e " f " 3,42) (Figura 20).

5.4. Relação das Propriedades Dielétricas com as Características de Aquecimento por Microondas

5.4.1. Café Verde

Para uso prático na indústria, as propriedades dielétricas, são convertidas para um coeficiente de atenuação (α) ou para o seu inverso, a profundidade de penetração (d_p) (OHLSSON, 1978). O café duro para melhor verde foi o que apresentou a maior capacidade para a penetração do componente elétrico do campo eletromagnético (α) (4,31%), em um menor d_p , e maior coeficiente dielétrico (ϵ'), perda dielétrica (ϵ'') e coeficiente de fase (β). E o café mole reportando, o menor α em uma maior d_p , o menor coeficiente dielétrico (ϵ') e perda dielétrica (ϵ''), teria a menor absorção da energia elétrica em uma maior distância para a diminuição do aquecimento dielétrico, a medida que a onda eletromagnética penetrava no café (Tabela 21).

A profundidade de penetração (distância na qual a energia diminui cerca de $1/e \approx 37\%$ do seu valor da superfície), no café mole, seria de 119,40 mm, maior em cerca de 7,12%, que a do café duro para melhor (110,90 mm). A proporção entre d_p e o diâmetro médio do café verde foi menor em cerca de 18,44 vezes ($119,40/6,4739$) para o café mole e de 17,02 vezes ($110,90/6,5174$) para o café duro para melhor (Tabela 21). O maior α em uma menor d_p , propicia ao café duro para melhor quando for torrado, por microondas, uma maior tendência de sofrer um maior grau de destruição térmica na superfície do grão que no seu interior, e o contrário verdadeiro para o café mole, pelo menor α em uma maior d_p .

O café duro para melhor verde demonstra ser capaz de armazenar uma maior quantidade de energia elétrica (14,75%) de um campo eletromagnético em relação ao café mole, pelo seu maior coeficiente dielétrico (ϵ'). Este em comparação ao café mole, possuindo uma maior perda dielétrica (ϵ''), significa, uma resistência de 8,33% maior para a dissipação da energia elétrica do café quando sofresse o processo de torração pelo sistema de microondas, todavia, em uma menor transformação desta energia em calor (menor $\tan \delta$), e por isso, uma maior perda dielétrica efetiva (ϵ''_{eff}) (Tabela 21).

TABELA 21: Valores médios obtidos para o coeficiente dielétrico (ϵ'), perda dielétrica (ϵ''), tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$), fator de perda efetiva (ϵ''_{eff}), tangente de perda dielétrica efetiva ($\tan \delta_{eff}$), densidade aparente (ρ) (g/mL), diâmetro do grão (diâ) (mm), relação $di\grave{a}_{cv}/\rho_{gv}$ (estrutura de compactação do grão verde), coeficiente de atenuação (α) (Nepers/m), profundidade de penetração (dp) (m), impedância intrínseca (ohm), coeficiente de fase (β) (radianos/m) e os percentuais de diferença (%), para os cafés duro para melhor, mole e estritamente mole, verdes

| Café | ϵ' | ϵ'' | $\tan \delta$ | ϵ''_{eff} | $\tan \delta_{eff}$ | ρ | diâ _{gv} | diâ _{gv} / ρ_{gv} | α | dp | η | β |
|-------------------------------|---|--------------|---------------|--------------------|---------------------|--------|-------------------|---------------------------------|----------|--------|--------|---------|
| Café Duro para Melhor | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,83 | 0,12 | 0,066 | 0,24 | 0,1310 | 0,6870 | 6,52 | 9,49 | 4,5391 | 0,1109 | 279,29 | 69,51 |
| DP | 0,20 | 0,02 | 0,007 | 0,03 | 0,013 | 0,01 | 0,01 | 0,11 | 0,50 | 0,012 | 15,75 | 3,81 |
| CV% | 10,83 | 14,43 | 10,37 | 14,43 | 10,20 | 1,22 | 0,09 | 1,21 | 11,09 | 10,85 | 5,64 | 5,48 |
| grau diferença | > | > | < | > | < | > | > | > | > | < | < | > |
| Café Mole | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,56 | 0,11 | 0,069 | 0,21 | 0,1349 | 0,6797 | 6,47 | 9,52 | 4,3435 | 0,1194 | 301,52 | 64,23 |
| DP | 0,13 | 0,03 | 0,01 | 0,06 | 0,027 | 0,01 | 0,03 | 0,12 | 1,06 | 0,028 | 12,71 | 2,69 |
| CV% | 8,35 | 28,64 | 16,88 | 28,64 | 20,22 | 0,88 | 0,47 | 1,24 | 24,34 | 23,24 | 4,22 | 4,19 |
| grau diferença | < | < | > | < | > | < | < | < | < | > | > | < |
| diferença D/M (%) | 14,75 | 8,33 | 4,35 | 12,50 | 2,89 | 1,06 | 0,77 | 0,32 | 4,31 | 7,12 | 7,37 | 7,60 |
| Café Estritamente Mole | | | | | | | | | | | | |
| Média | 1,73 | 0,15 | 0,084 | 0,29 | 0,165 | 0,66 | 6,56 | 9,95 | 5,59 | 0,093 | 287,17 | 67,77 |
| DP | 0,15 | 0,04 | 0,01 | 0,061 | 0,027 | 0,0060 | 0,02 | - | 1,24 | 0,02 | 12,76 | 2,69 |
| CV% | 8,91 | 26,84 | 16,76 | 28,64 | 20,22 | 0,88 | 0,35 | - | 22,25 | 20,89 | 4,44 | 4,19 |
| Descarga Elétrica | 1,94 | 0,21 | 0,108 | 0,42 | 0,165 | 0,65 | 6,45 | - | 7,70 | 0,065 | 270,67 | 71,94 |
| grau de diferença: | menor (<) e maior (>) entre as qualidades de café | | | | | | | | | | | |

TABELA 22: Resultados obtidos para o coeficiente dielétrico (ϵ'), perda dielétrica (ϵ''), tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$), pH, concentração iônica (CI) (mV), condutividade dielétrica (σ) (siemens/m), fator de perda dielétrica efetiva (ϵ''_{eff}), tangente de perda dielétrica efetiva ($\tan \delta_{\text{eff}}$), profundidade de penetração (ρ) (m), densidade aparente (ρ) (g/mL), coeficiente de atenuação (α) (Neper/m), coeficiente de fase (β) (radianos/m), intensidade do campo elétrico (E_{rms}) (Volts/m) e energia dissipada por volume (P) (Watts/m³) nos cafés duro para melhor e mole, verde e torrado

| | ϵ' | ϵ'' | $\tan \delta$ | pH | CI | σ | ϵ''_{eff} | $\tan \delta_{\text{eff}}$ | dp | ρ | α | β | E_{rms} | P |
|--------------------------------------|-------------|--------------|---------------|-------------|-------------|---------------|---------------------------|----------------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|------------------|-----------|
| Café Duro para Melhor Verde | | | | | | | | | | | | | | |
| DV ₆ | 1,61 | 0,11 | 0,071 | 6,30 | 44,7 | 0,0145 | 0,22 | 0,1366 | 0,1124 | 0,6785 | 4,44 | 65,22 | | |
| DV ₈ | 1,90 | 0,11 | 0,058 | 6,26 | 47,2 | 0,0145 | 0,22 | 0,1158 | 0,1221 | 0,6870 | 4,09 | 70,82 | | |
| DV ₉ | 1,99 | 0,14 | 0,068 | 6,30 | 44,8 | 0,0191 | 0,28 | 0,1407 | 0,0982 | 0,6954 | 5,08 | 72,49 | | |
| Média | 1,83 | 0,12 | 0,066 | 6,29 | 45,6 | 0,0164 | 0,24 | 0,1310 | 0,1109 | 0,6870 | 4,54 | 69,51 | | |
| DP | 0,20 | 0,02 | 0,007 | 0,02 | 1,41 | 0,0024 | 0,03 | 0,0134 | 0,0120 | 0,0084 | 0,50 | 3,81 | | |
| CV% | 10,83 | 14,43 | 10,37 | 0,37 | 3,11 | 14,43 | 14,43 | 10,20 | 10,85 | 1,22 | 11,09 | 5,48 | | |
| Café Mole Verde | | | | | | | | | | | | | | |
| MV ₈ | 1,55 | 0,10 | 0,067 | 6,23 | 49,0 | 0,0136 | 0,20 | 0,1290 | 0,1213 | 0,6848 | 4,12 | 63,99 | | |
| MV ₆ | 1,70 | 0,14 | 0,081 | 6,23 | 49,0 | 0,0191 | 0,28 | 0,1647 | 0,0907 | 0,6731 | 5,50 | 67,04 | | |
| MV ₉ | 1,44 | 0,08 | 0,058 | 6,24 | 47,8 | 0,0109 | 0,16 | 0,1111 | 0,1462 | 0,6813 | 3,42 | 61,67 | | |
| Média | 1,56 | 0,11 | 0,069 | 6,23 | 48,6 | 0,0145 | 0,21 | 0,1349 | 0,1194 | 0,6797 | 4,34 | 64,23 | | |
| DP | 0,13 | 0,03 | 0,006 | 0,006 | 0,69 | 0,0042 | 0,06 | 0,0273 | 0,0278 | 0,0060 | 1,05 | 2,69 | | |
| CV% | 8,35 | 28,64 | 16,88 | 0,09 | 1,43 | 28,64 | 28,64 | 20,22 | 23,24 | 0,88 | 24,34 | 4,19 | | |
| Café Duro para Melhor Torrado | | | | | | | | | | | | | | |
| 3500W ₆ | 1,81 | 0,15 | 0,080 | 5,62 | 86,6 | 0,0204 | 0,30 | 0,1657 | 0,0874 | 0,4816 | 5,71 | 69,16 | 2171,65 | 192834,54 |
| 3700W ₈ | 1,68 | 0,11 | 0,068 | 5,74 | 78,2 | 0,0150 | 0,22 | 0,1310 | 0,1148 | 0,3772 | 4,35 | 66,61 | 2648,03 | 210258,84 |
| 3850W ₉ | 1,56 | 0,11 | 0,070 | 6,03 | 60,9 | 0,0150 | 0,22 | 0,1410 | 0,1106 | 0,3345 | 4,51 | 64,21 | 2687,85 | 216630,36 |
| Média | 1,68 | 0,12 | 0,073 | 5,80 | 48,6 | 0,0168 | 0,25 | 0,1459 | 0,1043 | 0,3978 | 4,86 | 66,66 | 2502,51 | 206574,58 |
| DP | 0,13 | 0,02 | 0,006 | 0,21 | 0,69 | 0,0031 | 0,05 | 0,0179 | 0,0148 | 0,0757 | 0,74 | 2,48 | 287,23 | 12318,30 |
| CV% | 7,43 | 18,72 | 8,85 | 3,64 | 1,43 | 18,72 | 18,72 | 12,27 | 14,17 | 19,03 | 15,26 | 3,72 | 11,48 | 5,96 |
| Café Mole Torrado | | | | | | | | | | | | | | |
| 3500W ₈ | 1,47 | 0,11 | 0,076 | 5,65 | 83,9 | 0,0150 | 0,22 | 0,1497 | 0,1074 | 0,4122 | 4,65 | 62,34 | 2523,03 | 190876,68 |
| 3700W ₆ | 1,84 | 0,08 | 0,160 | 5,70 | 80,6 | 0,0116 | 0,17 | 0,0924 | 0,1555 | 0,3789 | 3,21 | 69,68 | 3008,27 | 209685,31 |
| 3850W ₉ | 1,68 | 0,11 | 0,065 | 5,94 | 67,5 | 0,0150 | 0,22 | 0,1309 | 0,1148 | 0,3563 | 4,35 | 66,61 | 2660,52 | 212247,37 |
| Média | 1,66 | 0,10 | 0,100 | 5,76 | 77,3 | 0,0139 | 0,20 | 0,1243 | 0,1259 | 0,3825 | 4,07 | 66,21 | 2730,61 | 204269,79 |
| DP | 0,19 | 0,01 | 0,052 | 0,15 | 8,67 | 0,0020 | 0,03 | 0,0292 | 0,0259 | 0,0281 | 0,75 | 3,68 | 250,10 | 11669,30 |
| CV% | 11,16 | 14,20 | 51,79 | 2,69 | 11,22 | 14,20 | 14,20 | 23,49 | 20,57 | 7,35 | 18,56 | 5,57 | 9,16 | 5,71 |

O coeficiente de fase (β) por compreender a capacidade de um material para armazenar energia elétrica do campo eletromagnético aplicado, em um determinado período no espaço (radianos/m), exibe uma menor capacidade no café mole que no café duro para melhor verde, a um percentual de diferença de 7,60% e assim, no café mole, pode ocorrer uma maior velocidade de fase (Tabela 22) quando for torrado por microondas. Este β , no café ETM, sendo semelhante ao do café duro para melhor, a probabilidade da velocidade de fase é de ser menor (Tabela 21).

A quantidade de energia elétrica convertida em calor (tangente de perda dielétrica ou fator de dissipação) no café mole, revelou-se maior (4,35%) (Tabela 20) que a do café duro para melhor, o que representa um maior aproveitamento da energia elétrica absorvida do campo elétrico gerado pelas microondas, e conseqüentemente, uma menor perda efetiva (ϵ''_{eff}), cerca de 12,50%, e provavelmente menor a dissipação da energia elétrica a cada unidade de volume ($P = \text{Watts/m}^3$) quando torrado por microondas (Tabelas 22 e 23).

Na tangente de perda efetiva ($\tan \delta_{\text{eff}}$), definida pela relação existente entre ϵ''_{eff} e a ϵ' , um valor menor que 1, o meio é considerado de baixa perda (METAXAS & MEREDITH, 1988). O café mole verde, apresenta-se com um percentual de variação de 2,89% (Tabela 21) maior que o do café duro para melhor. Ou seja, que efetivamente a diferença da quantidade de energia elétrica convertida em calor em ambas as qualidades de café não pode ser muito significativa.

Como a perda efetiva (ϵ''_{eff}) depende diretamente da perda dielétrica e da condutividade dielétrica (σ) (capacidade de um material para conduzir corrente elétrica em relação a perda dielétrica), uma ϵ''_{eff} menor, representa uma condutividade dielétrica (σ) média menor no café mole em comparação ao café duro para melhor, com um percentual de diferença de 50% (Tabelas 22 e 23).

Pela comparação da concentração iônica (CI) e o pH com a condutividade dielétrica, no café verde, verifica-se que esta apresentou uma relação inversa com a CI e direta com o pH (maior pH maior σ e menor pH menor σ), isto é, em uma menor condutividade dielétrica e pH, uma maior concentração iônica. No café mole verde, a CI foi 6,23% maior que no café duro para melhor, em um menor pH (Tabela 21). Esta maior concentração iônica, no café mole, favorece uma maior fricção molecular, maior aproveitamento da energia elétrica em calor ($\text{Tan } \delta$), menor perda dielétrica efetiva (Tabelas 22 e 23).

O café de maior qualidade neste estudo, o ETM, possuía como propriedades dielétricas, no seu grão verde: o maior α em uma menor dp, uma impedância intrínseca (η) menor que a do café mole (maior reflexão e menor transmissão) e maior que a do café duro para melhor (menor reflexão e maior transmissão das ondas eletromagnéticas no café), e um maior ϵ' que o do café mole. E entre as qualidades de café verde, a maior ϵ'' (diferença de 20% entre o café mole e de 26,67% entre o café duro), maior $\text{Tan } \delta$, ϵ''_{eff} e $\text{Tan } \delta_{\text{eff}}$ (Tabela 21). O que representava, a maior capacidade para a absorção da energia elétrica de um campo eletromagnético, na menor distância para a diminuição desta energia, a medida que a onda eletromagnética penetrava neste dielétrico, e com isso, a probabilidade de uma maior destruição térmica na superfície do grão que no seu interior. Uma capacidade para armazenar energia elétrica maior que a do café mole e menor que a do café duro para melhor, mas ao mesmo tempo, maior resistência para a dissipação desta energia dentre as qualidades de café. A maior concentração iônica e condutividade dielétrica dentre os cafés, propicia a uma maior fricção molecular, e por isso, maior aproveitamento da energia elétrica em calor ($\text{Tan } \delta$), todavia, com uma maior perda dielétrica efetiva (ϵ''_{eff}) e $\text{Tan } \delta_{\text{eff}}$ (Tabelas 22 e 23).

O café estritamente mole verde, quando torrado pelo processo de microondas a 3500W, reportou ocorrência de descarga elétrica e fumaça, após um

minuto sob ação do campo eletromagnético gerado pelas microondas. Uma possível explicação de tal fato, possa estar no alto coeficiente de atenuação (7,70 Neper/m) e muito baixa profundidade de penetração (0,065 m), alta concentração iônica (51,97 mV no café ETM, 48,73 no mole e 45,23 no duro para melhor) e alta condutividade dielétrica (0,03 siemens/m no café ETM, 0,02 no café duro e 0,01 no café mole), alto coeficiente dielétrico (1,94) e alta perda dielétrica (0,21), apresentada por este café em comparação aos demais (Tabelas 22 e 23). O que significa que o café ETM, apresentou uma alta capacidade para a penetração da energia elétrica do campo eletromagnético (alta absorção desta energia) em uma muito baixa profundidade de penetração, embora em uma impedância intrínseca (η) intermediária entre as qualidades de café. A alta capacidade para armazenar energia elétrica (ϵ') e alta resistência para a dissipação desta (ϵ''), assim como, a alta conversão da energia elétrica em energia calorífica ($\text{Tan } \delta$), deve ter acarretado, a formação de uma intensidade de campo elétrico máximo (E_{rms}), com efeito de concentração de aquecimento na superfície do café pela baixa profundidade de penetração.

A alta concentração iônica e condutividade dielétrica, determinaram uma maior fricção molecular, maior dissipação de calor pelo maior ϵ''_{eff} e $\text{Tan } \delta_{\text{eff}}$, de tal modo que culminou, com a produção de descarga elétrica e carbonização do grão (Tabelas 22 e 23). CALDAS (1992) tinha observado este fenômeno, em materiais granulares, como café, na secagem a alta frequência, quando o ar ou o dielétrico atingiam uma intensidade de campo elétrico máximo. OHLSSON & RISMAN (1978) observaram que o efeito de concentração de aquecimento determinava efeitos nocivos sempre que o conjunto de influências excedesse a capacidade do material de suportar o estresse mecânico e térmico criado.

5.4.2. Café Torrado

O processo de torração do café pelo sistema de microondas nas potências de 3500, 3700 e 3850 Watts proporcionou a manutenção das mesmas relações

demonstradas no grão verde em relação ao α e a d_p (Tabela 21), onde o café duro para melhor reportou o maior α e a menor d_p , e o café mole, o menor α e a menor d_p , com as respectivas maiores destruições térmicas, na superfície do grão do café duro para melhor e no interior do grão do café mole.

O café duro para melhor, quando torrado por microondas em 3850 Watts, possuía em comparação ao café mole, uma maior densidade aparente em um maior diâmetro, o que trouxe ao grão de café verde uma maior quantidade de massa por volume (ϕ/ρ de 9,38 no café duro e 9,45 no mole) (Tabela 21). Esta quantidade de massa sob a ação das microondas reportou uma maior capacidade para a penetração do componente elétrico do campo eletromagnético (α) (3,55%) em uma menor distância para a diminuição do aquecimento dielétrico (d_p) (3,66%) (Tabela 22), e portanto, uma tendência de destruição térmica maior na parte externa que na parte interna do grão, confirmando pelo valor de ΔL^* negativo (-0,88 no café duro e 0,04 no café mole). O café duro para melhor, ainda mostrou uma maior uniformidade de tratamento térmico pela ação do campo eletromagnético, que o café mole, em virtude do seu menor fator " f " (-1,29 no duro e - 0,40 no mole).

O maior α no café duro para melhor verde em comparação ao do café mole, em uma maior capacidade de armazenar energia elétrica de um campo eletromagnético (ϵ') e maior resistência a dissipação desta energia elétrica (ϵ''), maior β , maior $\tan \delta$ (Tabela 21), levou ao grão verde na torração a 3850W, uma maior velocidade de fase (3,61%), maior intensidade de campo elétrico (E_{rms})(1,02%), maior energia dissipada por volume (P) (2,03%), maior taxa de aumento de temperatura (12°C/minuto no café duro para melhor e 7,20°C/minuto no café mole) (40%) (T°C final: 139°C no café duro para melhor e mole), maior perda de peso (8,10%), em um mesmo fator de perda dielétrica efetiva (ϵ''_{eff}) mas maior $\tan \delta_{eff}$ (7,16%) (Tabelas 23 e 24).

A menor CI (6,28%), no café duro para melhor verde, trouxe ao grão

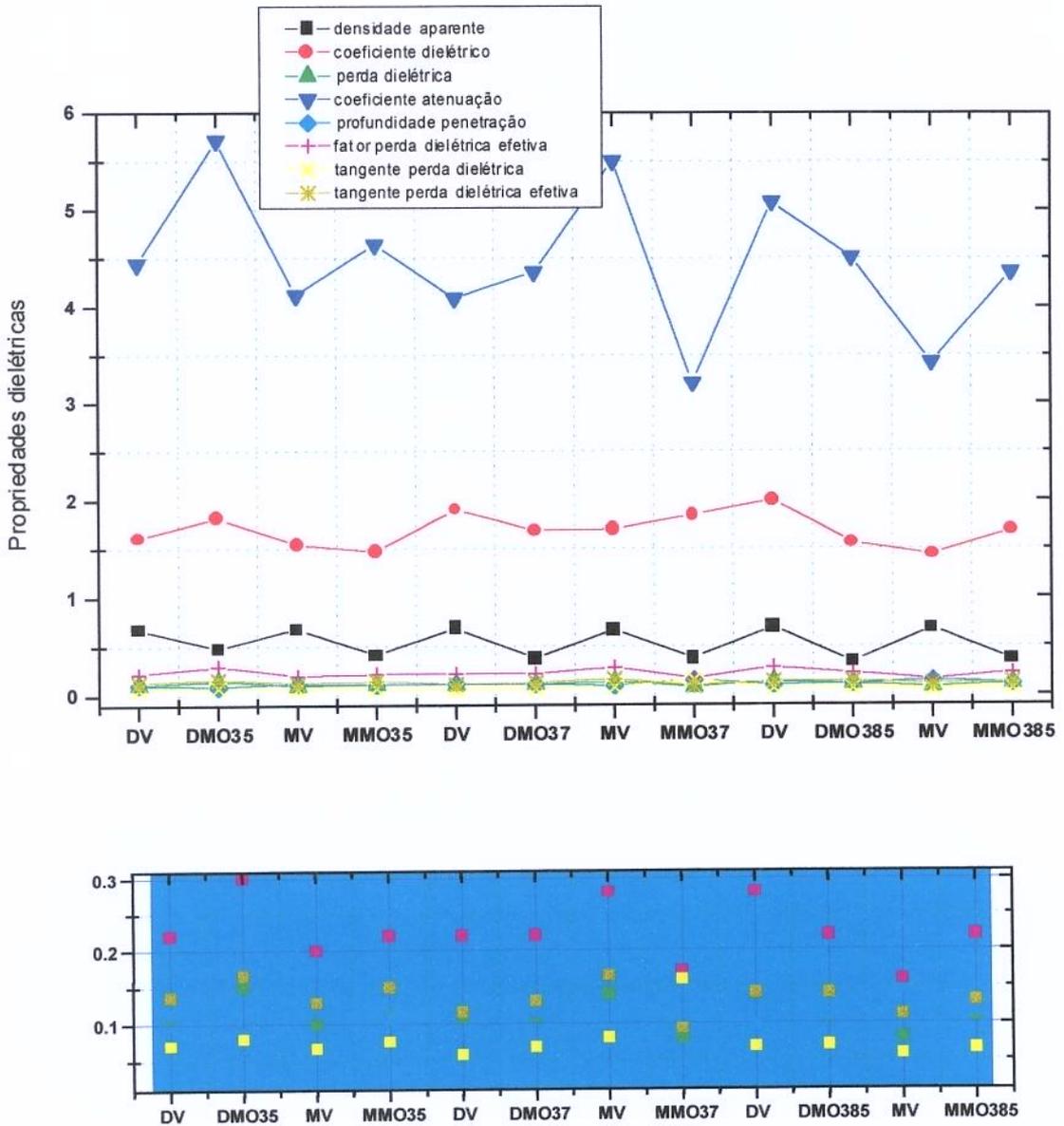


FIGURA 21: Propriedades dielétricas [coeficiente dielétrico (ϵ'), perda dielétrica (ϵ''), fator de perda dielétrica efetiva (ϵ''_{eff}), tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$), tangente de perda efetiva ($\tan \delta_{eff}$), coeficiente de atenuação (α)(Neper/m) e profundidade de penetração (m)] e densidade aparente (g/mL) dos cafés duro para melhor e mole, verde e torrado pelo sistema de microondas (3500W, 3700W e 3850W) a 2450 MHz

TABELA 23: Resultados obtidos para ϵ' , ϵ'' , $\tan \delta$, ϵ''_{eff} , $\tan \delta_{eff}$, ρ , α , $\tan \delta_{eff}$, ρ (g/mL), α (Neper/m), β (radianos/m), velocidade de fase (V) (m/s), E_{rms} (Volts/m), e a taxa de aumento de temperatura ($^{\circ}$ C/minuto) (T) nos cafés duro para melhor e mole torrados por microondas

| Café | ϵ' | ϵ'' | $\tan \delta$ | ϵ''_{eff} | $\tan \delta_{eff}$ | ρ | α | β | $V = w/\beta$ | E_{rms} | T | |
|---|-------------|--------------|---------------|--------------------|---------------------|--------|----------|---------|---------------|---------------|---------|-------|
| D3500W₆ grau diferença | 1,81 | 0,15 | 0,08 | 0,30 | 0,1657 | 0,4816 | 5,71 | 0,0874 | 69,16 | 222.571.482,5 | 2171,65 | 6,60 |
| M3500W₈ grau diferença | 1,47 | 0,11 | 0,076 | 0,22 | 0,1497 | 0,4122 | 4,64 | 0,1074 | 62,34 | 246.912.694,1 | 2523,03 | 7,80 |
| Média | 1,64 | 0,13 | 0,078 | 0,26 | 0,158 | 0,45 | 5,17 | 0,0974 | 65,75 | 234742088,3 | 2347,34 | 7,20 |
| DP | 0,24 | 0,03 | 0,003 | 0,06 | 0,011 | 0,05 | 0,76 | 0,0141 | 4,82 | 17211835,8 | 248,46 | 0,85 |
| CV% | 14,66 | 21,76 | 3,63 | 21,76 | 7,17 | 10,98 | 14,62 | 14,52 | 7,33 | 7,33 | 10,58 | 11,78 |
| diferença (%) | 18,78 | 26,67 | 5,00 | 26,67 | 9,66 | 14,41 | 18,74 | 18,62 | 9,86 | 9,86 | 13,93 | 15,38 |
| D3700W₈ grau diferença | 1,68 | 0,11 | 0,068 | 0,22 | 0,131 | 0,3772 | 4,35 | 0,1148 | 66,61 | 231.088.786,0 | 2648,03 | 9,60 |
| M3700W₆ grau diferença | 1,84 | 0,08 | 0,160 | 0,17 | 0,092 | 0,3789 | 3,21 | 0,1555 | 69,68 | 220.910.798,8 | 3008,27 | 15,60 |
| Média | 1,76 | 0,10 | 0,114 | 0,20 | 0,112 | 0,38 | 3,78 | 0,1352 | 68,15 | 225999792,4 | 2828,15 | 12,60 |
| DP | 0,11 | 0,02 | 0,07 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,81 | 0,03 | 2,17 | 7196923,8 | 254,73 | 4,24 |
| CV% | 6,43 | 18,13 | 57,06 | 18,13 | 24,44 | 0,32 | 21,33 | 21,29 | 3,19 | 3,18 | 9,01 | 33,67 |
| diferença (%) | 8,70 | 27,27 | 57,50 | 22,73 | 29,77 | 0,45 | 26,21 | 26,17 | 4,41 | 4,40 | 11,97 | 38,46 |
| D3850W₉ grau diferença | 1,56 | 0,11 | 0,070 | 0,22 | 0,141 | 0,3345 | 4,51 | 0,1106 | 64,21 | 239.749.663,2 | 2687,85 | 12,00 |
| M3850W₉ grau diferença | 1,68 | 0,11 | 0,065 | 0,22 | 0,131 | 0,3564 | 4,35 | 0,1148 | 66,61 | 231.088.786,0 | 2660,52 | 7,20 |
| Média | 1,62 | 0,11 | 0,0675 | 0,22 | 0,136 | 0,34 | 4,43 | 0,1127 | 65,41 | 235419224,6 | 2674,18 | 9,60 |
| DP | 0,08 | 0,00 | 0,0035 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,11 | 0,0030 | 1,70 | 6124165,0 | 19,32 | 3,39 |
| CV% | 5,24 | 0,00 | 5,24 | 0,00 | 5,25 | 4,48 | 2,55 | 2,64 | 2,59 | 2,60 | 0,72 | 35,35 |
| diferença (%) | 7,14 | 0,00 | 7,14 | 0,00 | 7,16 | 6,14 | 3,55 | 3,66 | 3,60 | 3,61 | 1,02 | 40,00 |

quando torrado a 3850W, uma menor fricção molecular em um menor dp (3,66%), e no café mole, uma maior CI em uma maior dp no grão verde, uma maior fricção molecular durante o processo de torração, de modo a resultar entre as suas qualidades de café, por um mecanismo de compensação, a mesma σ e $\varepsilon''_{\text{eff}}$, mas, diferente $\text{Tan } \delta_{\text{eff}}$ ($\varepsilon''_{\text{eff}} / \varepsilon'$) (7,16%) pelo diferente ε' (Tabelas 22 e 23 e Figura 21).

O café mole verde, com uma menor quantidade de massa por volume, estrutura de grão verde com menor compactação, e contendo uma menor α , maior dp , menor ε' , ε'' , β e $\text{Tan } \delta$, quando torrado a 3850W, desenvolveu uma menor velocidade de fase (Tabela 22), menor E_{rms} (2660,52 Volts/m no café mole e 2687,85 no café duro para melhor), menor P (212247,37 W/m^3 no mole e 216630,36 no duro para melhor), menor perda de peso (Tabelas 22 e 23).

O café mole torrado a 3500 e 3700 Watts pelo sistema de microondas, demonstrou em comparação ao café duro para melhor, um menor coeficiente de atenuação em uma maior profundidade de penetração, e daí, uma maior probabilidade de apresentar um maior grau de destruição térmica na parte interna do grão que na sua parte externa (Tabela 22). No entanto, pela análise do parâmetro de cor CIELAB ΔL^* pode-se observar, que os maiores valores de ΔL^* positivos (0,09 a 3500W e 0,81 a 3700W no mole) (3,97 a 3500W e 0,88 a 3700W no duro) ocorreram no café duro para melhor e os menores valores de ΔL^* positivo no café mole, o que significou que o café mole sofreu um maior grau de torração na sua superfície que no seu interior (L^* do café moído menor que o L^* do grão inteiro), e o café duro para melhor, um maior grau de torração na sua parte interna. Esta aparente contradição, foi devido a que nestas duas potências de microondas, a profundidade de penetração gerada em função do seu coeficiente de atenuação, foi maior que a proporcionalidade dimensional do grão de café. Em termos de uniformidade de tratamento térmico, o café mole em comparação ao café duro para melhor, foi o que reportou a maior uniformidade sob a ação do campo eletromagnético das microondas, pelos menores valores do fator "P" (- 0,49 a 3500W e 0,30 a 3700W, no café mole, e 3,42 a 3500W e 0,43 a 3700W, no café

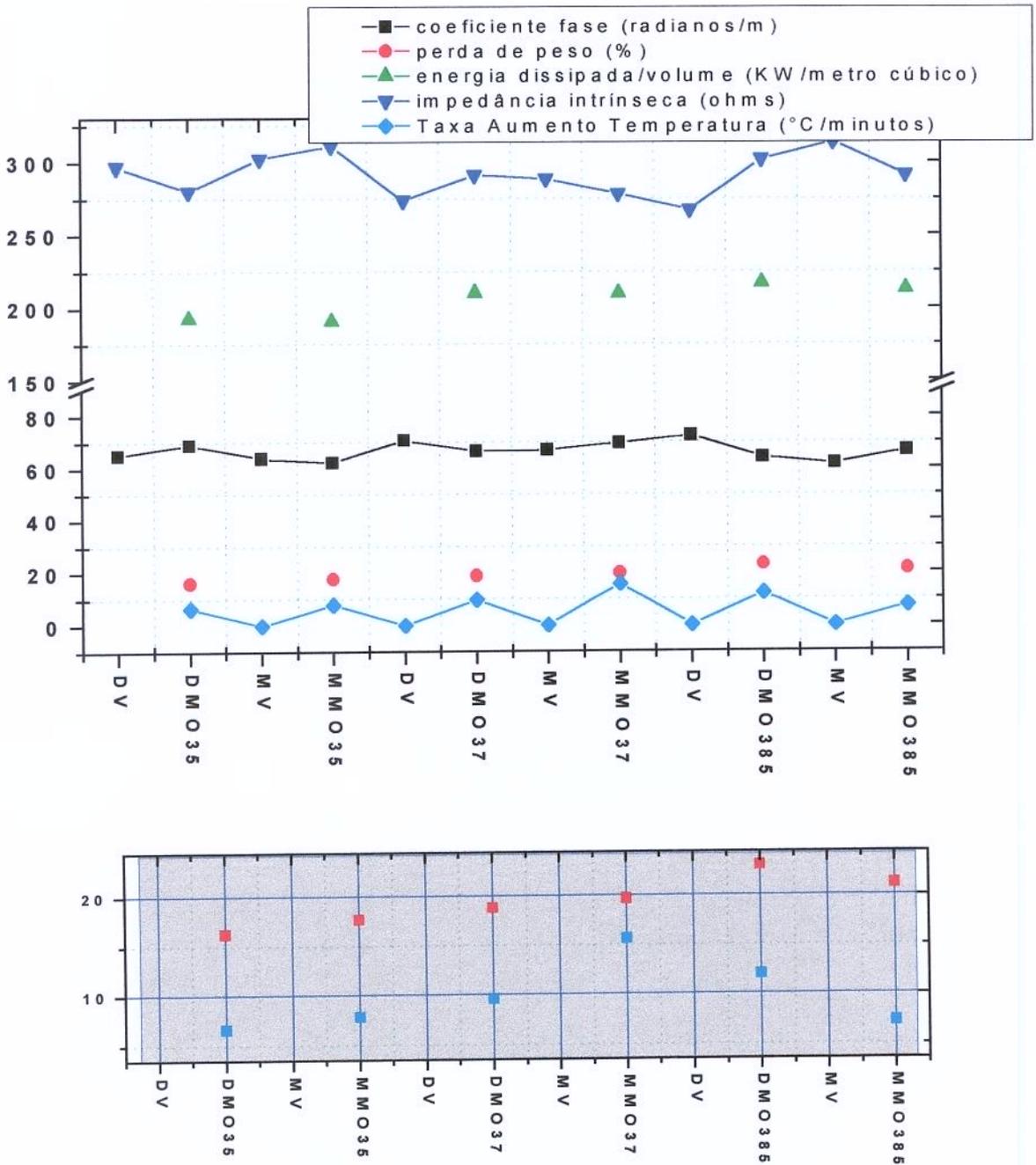


FIGURA 22: Propriedades dielétricas [coeficiente de fase (β) (radianos/m) e impedância intrínseca (η) (ohms)], taxa de aumento de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$), energia dissipada/volume (kW/m^3) e perda de peso (%), dos cafés, duro para melhor e mole, verde e torrado pelo sistema de microondas a 2450 MHz

duro para melhor).

A impedância intrínseca, no café mole em comparação ao café duro para melhor, foi maior a 3500W (menor reflexão e maior transmissão) (310,94 ohms no café mole e 280,22 no duro para melhor) e menor a 3700W (277,93 ohms no café mole e 290,86 no duro) (maior reflexão e menor transmissão) (Figura 22).

O café mole em comparação ao café duro para melhor, com uma maior quantidade de massa por volume (ϕ/ρ de 9,46 no café mole e 9,61 no duro para melhor) no seu grão verde, quando torrado por microondas a 3500W, apresentou um menor α em uma maior dp , em um menor ϵ' e ϵ'' , menor $\tan \delta$ e menor capacidade de armazenar energia elétrica de um campo eletromagnético aplicado a um período no espaço (β) (9,86%), todavia, em virtude da maior distância necessária para redução de 37% da energia elétrica absorvida (18,62%), a velocidade de fase da onda viajante no café foi maior (9,86%), maior a taxa de aumento de temperatura (7,8°C/minuto no café mole e 6,6°C/minuto no café duro para melhor) (15,38%) (T°C final: 127°C para o café mole e 129°C para o duro para melhor em 720 segundos) (diferença % da T°C final: 1,55%), maior a intensidade de campo elétrico (E_{rms}) gerada (13,93%), maior a perda de peso (grau de torração escura no café mole e de torração média no café duro para melhor) (8,10%), em uma menor energia dissipada por volume (P) (1,01%), perda dielétrica efetiva (ϵ''_{eff}) (26,67%) e $\tan \delta_{eff}$ (9,66%) (Tabelas 22, 23 e 24 e Figuras 21 e 22).

Em contrapartida, o café duro para melhor, torrado a 3500W, em uma menor quantidade de massa por volume de grão verde (ϕ/ρ) (Tabela 23), exibiu um alto valor de α (5,71 Neper/m no café duro e 4,64 Neper/m no café mole) (18,74%), menor dp , em um maior ϵ' (18,78%) e ϵ'' (26,67%), maior $\tan \delta$ (5%), maior β (9,86%), menor velocidade de fase (9,86%), menor E_{rms} , menor perda de peso, com maior P (W/m^3), ϵ''_{eff} e $\tan \delta_{eff}$ (Tabelas 22 e 23 e Figuras 21 e 22).

Na potência de 3700W, o café duro para melhor em comparação ao café mole, possuía no seu grão verde, uma maior quantidade de massa por volume (ϕ/ρ de 9,48 no café duro e 6,66 no mole), que em presença do campo eletromagnético gerado pelas microondas mostrou um maior α (26,21%) em uma menor dp (26,17%), e deste modo, uma probabilidade de mostrar uma menor densidade de potência no centro que na superfície do grão, maior destruição térmica na parte externa do grão (Tabelas 22 e 23 e Figura 21).

A maior quantidade de massa por volume do café duro para melhor verde, em comparação ao café mole, a 3700W, em uma menor capacidade para armazenar energia elétrica de um campo eletromagnético (ϵ') (8,70%), contudo, em uma maior resistência para a dissipação desta energia elétrica (ϵ'') (27,27%), menor capacidade para a conversão em calor ($\tan \delta$) (57,50%), menor β (4,41%), a velocidade de fase foi maior (4,40%) pelo maior α (26,21%) e menor dp (26,17%), menor taxa de aumento de temperatura (9,6 °C/minuto no café duro para melhor e 15,6°C/minuto no café mole) (38,46%) (T°C final: 137°C no café duro para melhor e 139°C no café mole em 720 segundos) (diferença % da T°C: 1,44), menor intensidade de campo elétrico (E_{rms}) (11,97%), menor perda de peso (menor grau de torração escura) (4,52%) (Tabela 23), em uma maior energia dissipada por volume (P) (0,27%), ϵ''_{eff} (22,73%) e $\tan \delta_{eff}$ (29,77%) (Tabelas 22 e 23 e Figuras 21 e 22).

O café mole, torrado a 3700W, em uma menor quantidade de massa por volume de grão verde, reportou um menor α , maior dp , em um maior ϵ' , menor ϵ'' , maior $\tan \delta$, maior β , menor velocidade de fase, maior E_{rms} (3008,27 Volts/m no mole e 2648,03 no duro para melhor), maior perda de peso, em uma menor P (W/m^3), ϵ''_{eff} e $\tan \delta_{eff}$.

No café mole, a maior concentração iônica em um menor α e maior dp no grão verde em comparação ao café duro para melhor, resultou quando torrado a

3500W e 3700W, em uma menor σ , menor dissipação de calor, menor $\varepsilon''_{\text{eff}}$ e $\text{Tan } \delta_{\text{eff}}$, contudo, quando torrado a 3850W, a σ foi a mesma do café duro para melhor, em uma também igual $\varepsilon''_{\text{eff}}$, mas menor $\text{Tan } \delta_{\text{eff}}$ ($\frac{\varepsilon''_{\text{eff}}}{\varepsilon'}$) (Tabelas 22 e 23). Este comportamento diferenciado a 3850W, ocorreu em razão da mesma perda dielétrica sofrida por ambas qualidades de café, pois pelo contrário, nas potências de 3500W e 3700W, no café mole, a perda dielétrica foi sempre menor que a do café duro para melhor. O que se pode concluir que a condutividade dielétrica, está relacionada fundamentalmente com a perda dielétrica, mas ainda com a concentração iônica, com o coeficiente de atenuação e a profundidade de penetração no café.

As características físicas e químicas do café duro para melhor e mole torrados pelo sistema de microondas nas potências de 3500W, 3700W e 3850W dependeram fundamentalmente da quantidade de massa em um dado volume (relação entre o diâmetro e a densidade aparente) do grão verde e das suas propriedades dielétricas. Pois estas características do grão, quando verde, determinaram a intensidade do campo elétrico (E_{rms}) gerado no interior do grão e a taxa de aumento de temperatura durante a torração, o grau de transformação térmica, e a perda de peso.

5.4.3. Fatores que Afetaram as Propriedades Dielétricas

5.4.3.1. Composição Química

Em termos de cafeína, a torração pelo sistema de microondas a potências de 3500W, 3700W e 3850W não proporcionou nenhuma perda de cafeína, tanto no café duro para melhor quanto no café mole, uma vez que a 3850W, a temperatura máxima atingida pelo café duro para melhor e mole foi de 139°C, a um tempo de torração de 12 minutos. A temperatura de sublimação da cafeína fica na faixa de 178°C e 180°C, segundo VITZTHUM (1976), WINDHOLZ et alii

TABELA 24: Resultados obtidos para as propriedades dielétricas (ϵ' , ϵ'' e $\tan \delta$), relação diâmetro (mm)/densidade aparente do grão verde (ρ) (g/mL) (ϕ_{GV}/ρ_{GV})(estrutura de compactação do grão verde), parâmetros de cor CIELAB [ΔL^* (uniformidade de cor) e L^* (luminosidade)], taxa de aumento de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$), E_{rms} (kVolts/m), ácido 5-cafeoil quinico (5-CQA) (g/100g café), ácido cafeico (AC) (g/100g café), cafeína (CF) (g/100g café) e perda de peso (%) nos cafés duro para melhor e mole, verde e torrado por microondas a 2450 MHz

| Café | ϵ' | ϵ'' | $\tan \delta$ | ϕ_{GV}/ρ_{GV} | ΔL^* | L^* | T | E_{rms} | 5-CQA | AC | CF | Pp |
|----------------------------|-------------|--------------|---------------|-----------------------|--------------|-------|-------|------------------|--------|--------|--------|-------|
| Duro Verde | | | | | | | | | | | | |
| grau diferença | 1,83 | 0,12 | 0,066 | | 13,40 | 43,04 | | | 2,5746 | 1,7662 | 1,0673 | - |
| | > | > | < | | < | < | | | > | > | < | - |
| Mole Verde | | | | | | | | | | | | |
| grau diferença | 1,56 | 0,11 | 0,069 | | 13,08 | 44,54 | | | 1,5690 | 1,1499 | 2,5431 | - |
| grau diferença | < | < | > | | > | > | | | < | < | > | - |
| diferença (%) | 14,75 | 8,33 | 4,35 | | 2,39 | 3,37 | | | 39,06 | 34,89 | 58,03 | - |
| D 3500W₆ | 1,81 | 0,15 | 0,080 | 9,61 | 3,97 | 31,49 | 6,60 | 2,172 | 0,9368 | 0,9512 | 1,0171 | 16,22 |
| grau diferença | > | > | > | < | > | > | < | < | > | > | < | < |
| M 3500W₈ | 1,47 | 0,11 | 0,076 | 9,46 | 0,09 | 33,53 | 7,80 | 2,523 | 0,7705 | 0,9464 | 2,5790 | 17,65 |
| grau diferença | < | < | < | > | < | < | > | > | < | < | > | > |
| diferença (%) | 18,78 | 26,67 | 5,00 | 1,56 | 97,73 | 6,08 | 15,38 | 13,93 | 17,75 | 0,50 | 60,56 | 8,10 |
| D 3700W₈ | 1,68 | 0,11 | 0,068 | 9,48 | 0,88 | 25,48 | 9,60 | 2,648 | 0,8468 | 0,5514 | 1,0844 | 18,81 |
| grau diferença | < | > | < | > | > | < | < | < | > | < | < | < |
| M 3700W₆ | 1,84 | 0,08 | 0,160 | 9,66 | 0,81 | 29,29 | 15,60 | 3,008 | 0,4943 | 0,8300 | 2,5458 | 19,70 |
| grau diferença | > | < | > | < | < | > | > | > | < | > | > | > |
| diferença (%) | 8,70 | 27,27 | 57,50 | 1,86 | 7,95 | 13,01 | 38,46 | 11,97 | 41,63 | 33,57 | 57,40 | 4,52 |
| D3850W₉ | 1,56 | 0,11 | 0,070 | 9,38 | -0,88 | 22,99 | 12,00 | 2,688 | 0,5762 | 0,3043 | 1,1003 | 23,08 |
| grau diferença | < | = | > | > | < | < | > | > | < | < | < | > |
| M3850W₉ | 1,68 | 0,11 | 0,065 | 9,45 | 0,04 | 24,81 | 7,20 | 2,660 | 0,6220 | 0,4753 | 2,5044 | 21,21 |
| grau diferença | > | = | < | < | > | > | < | < | > | > | > | < |
| diferença (%) | 7,14 | 0,00 | 7,14 | 0,74 | 2300 | 7,34 | 40,00 | 1,02 | 7,36 | 35,98 | 56,07 | 8,10 |

(1976) e TARKA (1982).

De acordo com o apêndice P, a cafeína mostrou diferenças significativas ($F_{\text{observado}} > F_{\text{crítico}}$) entre as qualidades de café torradas por microondas, devido a inexistência de perda por este sistema de aquecimento não convencional, e deste modo, manteve-se com a mesma concentração presente no café verde. Portanto, a perda de cafeína parece depender fundamentalmente da taxa de aquecimento para se atingir a temperatura de sublimação da cafeína, na torração por microondas, independente da perda de peso (Tabela 26).

Em termos da concentração dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico, houve perdas durante a torração por este tipo de sistema de aquecimento não convencional, de maneira que, o café duro para melhor exibiu uma maior perda destes dois ácidos, em uma maior capacidade para absorver a energia elétrica do campo eletromagnético gerado pelas microondas e em uma menor distância para a diminuição de 37% do seu valor na superfície do café (α maior e d_p menor), independente da potência de microondas usada neste estudo. O café mole, do contrário, demonstrou uma menor perda dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico, em um menor coeficiente de atenuação e maior profundidade de penetração, também independente da potência de microondas (Tabela 27).

A intensidade de campo elétrico (E_{rms}) gerada no café a 3500W e a 3700W produziu uma maior perda de 5-CQA e AC, quando esta era de menor intensidade, e uma menor perda destes ácidos, quando a E_{rms} era de maior intensidade (Tabela 23 e 27), ou seja, o café duro para melhor, a 3500W e a 3700W, sempre sofreu a ação de uma menor E_{rms} e o café mole, uma maior E_{rms} . Contudo, na potência de 3850W, esta situação em relação a E_{rms} nas duas qualidades de café em estudo, inverteu-se, de modo que o café duro para melhor foi o que reportou a maior E_{rms} , e o café mole, a menor E_{rms} , fazendo com que a maior perda de 5-CQA e AC ocorresse no café duro e a menor no café mole.

A menor concentração de ácido 5-cafeoil quínico no café torrado, esteve correlacionada a uma maior taxa de aumento de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$) durante o processo de torração por microondas, maior intensidade de campo elétrico e maior perda de peso (%), enquanto que um maior teor de 5-CQA no café torrado, estava relacionado a uma menor taxa de aumento de temperatura, menor E_{rms} e menor perda de peso (Tabela 24).

A maior concentração de ácido caféico presente nos cafés, tanto verde (duro para melhor) quanto torrado por microondas (duro a 3500W, mole a 3700W e mole a 3850W), ocorreu em um maior coeficiente dielétrico (maior ϵ'), isto é, uma maior capacidade do grão de café para armazenar energia elétrica de um campo eletromagnético. E a menor concentração deste ácido, tanto no café verde (mole) quanto torrado por microondas (cafés: mole a 3500W, e duro a 3700W e a 3850W), ocorreu em um menor coeficiente dielétrico (menor ϵ') (Tabela 24).

5.4.3.2. Temperatura

As propriedades dielétricas, influenciaram na temperatura de torração pelo processo por microondas, da seguinte maneira: uma maior taxa de aumento de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$), correspondeu a uma maior intensidade de campo elétrico (E_{rms}), maior perda de peso, assim como, uma menor taxa de aumento de temperatura proporcionou uma menor intensidade de campo elétrico, menor perda de peso no café torrado nas diferentes potências de microondas em análise (Tabelas 24)

5.4.3.3. Densidade

Segundo NELSON (1991 e 1994), a densidade (massa por unidade de volume) influencia o comportamento de um dielétrico em um sistema de microondas, pela quantidade de massa que estará interagindo com o campo eletromagnético, e desta maneira afetando as propriedades dielétricas.

A perda dielétrica é uma propriedade coligativa (isto é, não depende da natureza da substância, mas somente do número de partículas por unidade de massa), o que torna a densidade uma importante variável, onde uma variação na densidade aparente proporciona modificações nesta propriedade dielétrica (KENT & KRESS - ROGERS, 1987).

O café duro para melhor verde (ϵ' maior, ϵ'' maior, $\tan \delta$ menor e ϵ''_{eff} maior) (Tabelas 21 e 22) possuindo, em média, uma maior quantidade de massa por unidade de volume, estrutura de grão verde com maior compactação, proporcionou por ocasião do processo de torração por microondas, em média, uma maior capacidade de absorver energia elétrica do campo eletromagnético (α), em uma menor distância para a redução desta do seu valor de superfície (dp), uma maior capacidade para o armazenamento da energia elétrica do campo eletromagnético (ϵ'), assim como, uma maior resistência para a dissipação desta energia absorvida (ϵ''), entretanto, com uma menor capacidade para converter esta energia elétrica em energia calorífica ($\tan \delta$) e maior perda dielétrica efetiva (ϵ''_{eff}).

O café mole verde (ϵ' menor, ϵ'' menor, $\tan \delta$ maior e ϵ''_{eff} menor) (Tabelas 21 e 22), em termos médios, com uma menor quantidade de massa/volume, estrutura de grão verde com menor compactação, determinou em média, no grão que estava sendo torrado por esse sistema de aquecimento não convencional, uma menor absorção da energia elétrica do campo eletromagnético (α), em uma maior distância para a diminuição do aquecimento dielétrico a que medida que a onda eletromagnética penetra no café (dp), uma menor capacidade para o armazenamento desta energia elétrica (ϵ'), bem como, um menor fator de perda dielétrica (ϵ''), mas, maior capacidade para converter esta energia elétrica em calor, em uma menor perda dielétrica efetiva (ϵ''_{eff}).

O coeficiente de atenuação (α) e a profundidade de penetração (dp), reportaram o seguinte comportamento frente as duas qualidades de café, verde e torrado, nas três

potências de microondas em estudo, um maior α em uma menor dp, no café duro para melhor, e um menor α em uma maior dp, no café mole (Tabelas 22 e 23).

5.5. Cafeína, Ácidos 5-Cafeoil Quínico e Caféico

5.5.1. Grão Verde

5.5.1.1. Conteúdo

O café duro para melhor verde apresentou como valores médios, a menor concentração de cafeína (1,1652 g/100g café) e as maiores concentrações dos ácidos 5-cafeoil quínico (2,5671 g/100g café) e caféico (1,7869 g/100g café) em comparação ao café mole e estritamente mole. Em contrapartida, o café mole mostrou a maior concentração de cafeína (2,4999 g/100g café) e a menor concentração de ácido caféico (1,1603 g/100g café), e o café estritamente mole, a menor concentração do ácido 5-cafeoil quínico (1,3202 g/100g café). O maior percentual de diferença entre as 3 substâncias em estudo, foi da cafeína, respectivamente, 53,39% (entre o café mole e o duro), 48,65% (entre o ETM e o duro) e 9,24% (entre o ETM e o mole) (Tabela 22).

Os percentuais de diferença entre o café duro para melhor e o mole, foram de 53,39% para a cafeína, 38,88% para o ácido 5-cafeoil quínico e 35,07% para o ácido caféico. Estes mesmos percentuais, entre o café duro e o estritamente mole, foram de 48,65% para a cafeína, 48,57% para o 5-CQA, e 24,56% para o ácido caféico, e entre o café mole e o ETM, percentuais menores que os reportados entre o café duro e o mole e entre o café duro e o ETM, como 9,24% para a cafeína, 13,93% para o ácido caféico e 15,86% para o 5-CQA (Tabela 25).

De acordo com a Tabela 25, os maiores coeficientes de variação foram da cafeína (9,02% no café duro para melhor e 8,51% no ETM e 4,19% no mole) e os menores do 5-CQA (0,84%) no café duro para melhor e do ácido caféico (1,13%)

TABELA 25: Resultados encontrados nos grãos de café verde (duro para melhor, mole e ETM), para as concentrações dos ácidos 5-cafeoil quínico (5-CQA), e cafeíco (AC), e cafeína (CF) (g/100g café), diferença percentual entre as concentrações de 5-CQA e AC ($D_{5-CQA \text{ e } AC}$) (%), e para as relações 5-CQA/CF e 5-CQA/AC

| Qualidade | 5-CQA | CF | 5CQA/CF | AC | 5CQA/AC | $D_{5-CQA \text{ e } AC}$ |
|----------------------------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------------------|
| Café Duro para Melhor | | | | | | |
| Saca 1 | 2,5232 | 1,2876 | 1,960 | 1,8223 | 1,385 | 27,78 |
| Saca 2 | 2,5873 | 1,1596 | 2,231 | 1,7573 | 1,472 | 32,08 |
| Saca 4 | 2,5737 | 1,2919 | 1,992 | 1,8410 | 1,398 | 28,47 |
| Saca 5 | 2,5615 | 1,2155 | 2,107 | 1,7893 | 1,432 | 30,15 |
| Saca 6 | 2,5820 | 1,0171 | 2,539 | 1,8395 | 1,404 | 28,76 |
| Saca 8 | 2,5791 | 1,0844 | 2,378 | 1,7318 | 1,489 | 32,85 |
| Saca 9 | 2,5628 | 1,1003 | 2,329 | 1,7274 | 1,484 | 32,60 |
| Média | 2,5671 | 1,1652 | 2,219 | 1,7869 | 1,438 | 30,38 |
| DP | 0,0216 | 0,1051 | 0,213 | 0,0490 | 0,044 | 2,12 |
| CV (%) | 0,84 | 9,02 | 9,58 | 2,74 | 3,05 | 6,99 |
| grau diferença | > | < | > | > | > | > |
| Café Mole | | | | | | |
| Saca 1 | 1,5993 | 2,5295 | 0,632 | 1,1759 | 1,360 | 26,47 |
| Saca 2 | 1,5641 | 2,5587 | 0,611 | 1,1704 | 1,336 | 25,17 |
| Saca 4 | 1,5290 | 2,2699 | 0,674 | 1,1606 | 1,317 | 24,09 |
| Saca 5 | 1,5832 | 2,5122 | 0,630 | 1,1653 | 1,359 | 26,40 |
| Saca 6 | 1,5813 | 2,5458 | 0,621 | 1,1620 | 1,361 | 26,52 |
| Saca 8 | 1,5923 | 2,5790 | 0,617 | 1,1516 | 1,383 | 27,68 |
| Saca 9 | 1,5335 | 2,5044 | 0,612 | 1,1363 | 1,350 | 25,90 |
| Média | 1,5690 | 2,4999 | 0,628 | 1,1603 | 1,352 | 26,03 |
| DP | 0,0280 | 0,1047 | 0,022 | 0,0131 | 0,021 | 1,14 |
| CV (%) | 1,78 | 4,19 | 3,43 | 1,13 | 1,53 | 4,37 |
| grau diferença | ≡ | > | ≡ | < | ≡ | ≡ |
| diferença em relação ao Duro (%) | 38,88 | 53,39 | 71,70 | 35,07 | 5,98 | 14,32 |
| Café Estritamente Mole | | | | | | |
| Saca 1 | 1,2851 | 2,4913 | 0,516 | 1,3133 | 0,979 | 2,15 |
| Saca 2 | 1,3798 | 2,5034 | 0,551 | 1,4011 | 0,985 | 1,52 |
| Saca 4 | 1,2981 | 2,1140 | 0,614 | 1,3429 | 0,967 | 3,34 |
| Saca 5 | 1,2806 | 2,3810 | 0,538 | 1,3612 | 0,941 | 5,92 |
| Saca 6 | 1,2820 | 2,0033 | 0,640 | 1,3737 | 0,933 | 6,68 |
| Saca 8 | 1,4490 | 2,2213 | 0,652 | 1,3242 | 1,094 | 8,61 |
| Saca 9 | 1,2667 | 2,1689 | 0,584 | 1,3201 | 0,960 | 4,05 |
| Média | 1,3202 | 2,2690 | 0,585 | 1,3481 | 0,980 | 4,61 |
| Desvio Padrão | 0,0680 | 0,1931 | 0,053 | 0,0322 | 0,054 | 2,57 |
| Coefficiente de Variação (%) | 5,15 | 8,51 | 8,98 | 2,39 | 5,50 | 55,72 |
| grau diferença | < | ≡ | < | ≡ | < | < |
| diferença em relação ao Duro (%) | 48,57 | 48,65 | 73,64 | 24,56 | 31,85 | 84,82 |
| diferença em relação ao Mole (%) | 15,86 | 9,24 | 6,85 | 13,93 | 27,51 | 82,29 |

grau de diferença: menor (<), maior (>) e intermediária (≡) entre as qualidades de café

no café mole, entre as três qualidades de café verde estudadas. Esta maior variabilidade dos resultados em relação a cafeína no café verde já foi observada por CLARKE & MACRAE (1985), provavelmente por esta fazer parte do sistema de defesa da semente de café (RIZVI et alii, 1980 e 1981).

As diferentes qualidades de café verde foram caracterizadas da seguinte maneira: predomínio do ácido 5-cafeoil quínico e ácido caféico e uma menor concentração de cafeína no café duro para melhor; predomínio da cafeína e uma menor concentração de ácido caféico no café mole; predomínio da cafeína e uma menor concentração de 5-CQA e ácido caféico, no café ETM (Tabela 22).

Em virtude do predomínio do ácido 5-cafeoil quínico no café duro para melhor verde, pode-se ter substâncias como ácido quínico [que podem ainda produzir fenóis (catecóis, hidroquinona, pirogalol), ácido benzóico e todos os di- e trihidroxibenzeno], lactonas e aminoácidos presentes em uma maior proporção que nas outras qualidades de café, quando o mesmo sofrer o processo de torração. O maior conteúdo de 5-CQA no café duro para melhor verde, concorda com os resultados observados por AMORIM et alii (1973), que os cafés arábicas brasileiros moles possuem uma baixa concentração de ácidos clorogênicos em comparação aos de pior qualidade.

O ácido caféico também em predomínio no café duro para melhor verde, pode originar pelo processo de torração, uma maior concentração de catecóis (4-metil, 4-etil, e 4-vinil, e os difenóis: pirocatecol e o 4-etilpirocatecol) e 3,4 dihidroxicinamaldeído, além dos produtos de degradação do ácido cafeoil quínico, que também produzem ácido caféico, no grão torrado. Estes catecóis, conferem um forte odor de queimado fenólico com algum grau doçura, ao café torrado, de acordo com CLARKE & MACRAE (1985). E segundo TSUJI et alii (1991), o ácido

caféico por ocasião do processo de torração, originava uma significativa quantidade de peróxido de hidrogênio.

O predomínio do 5-CQA e ácido caféico no café duro para melhor verde, confirma as observações de CLIFFORD (1979) e CLARKE & MACRAE (1985), que a qualidade da bebida de café apresenta-se inversamente correlacionada com a concentração dos ácidos clorogênicos. Assim como, a ligação mais direta entre a fração de ácidos clorogênicos e a qualidade da bebida, encontra-se na influência dos produtos de degradação do ácido clorogênico no aroma da bebida (TRESSL, 1977), pois são organolepticamente significativos (OHIOKPEHAI et alii, 1982).

O café mole verde por possuir a maior concentração de cafeína, pode propiciar uma bebida mais amarga que a oriunda dos outros dois tipos de qualidade de café em estudo, embora que, de acordo com VIANI (1988) a cafeína contribua com apenas 10 a 30% do amargor percebido. A diminuição do teor de cafeína dependeu do grau de torração sofrido pelo grão, confirmando STENNERT & MAIER (1994), que essa parece depender unicamente da perda de peso e não do tempo de torração.

A concentração de 5-CQA, no café mole verde, menor que a do café duro para melhor, mas maior que a do café estritamente mole, pode propiciar no café torrado, uma menor quantidade de ácido quínico, lactonas, aminoácidos e fenóis, em comparação ao café duro para melhor, assim como, uma maior quantidade destes compostos, em comparação ao café ETM. A menor concentração de ácido caféico, no café mole verde em comparação as outras qualidades de café, pode ainda, traduzir-se no café torrado, em um menor conteúdo de catecóis, dihidroxicinamaldeído e peróxido de hidrogênio, que os cafés ETM e duro para melhor (Tabela 25).

O café ETM, possuindo a menor concentração de 5-CQA entre as qualidades de café verde em análise, poderá quando torrado, produzir uma menor quantidade de seus produtos de degradação térmica, como ácido quínico, lactonas, aminoácidos e fenóis, todavia, poderá formar uma maior quantidade dos produtos de degradação térmica do ácido caféico, pela sua maior concentração que a do café mole. Conseqüentemente, o café ETM, necessita de condições de torração ainda mais branda que a das outras qualidades de café em estudo, pela razão de sua, também, menor estrutura de compactação de grão verde, passível de uma maior transferência de calor.

5.5.2. Grão Torrado

5.5.2.1. Processo de Torração

5.5.2.1.1. Cafeína

Segundo PICTET & REHACEK (1982), a cafeína (CF), pode ser usada para monitorar a severidade do tratamento térmico na torração, por se constituir em um constituinte estável a torração. Neste estudo, a perda em cafeína mostrou a seguinte ordem crescente: microondas (0%) (não foi atingida a temperatura de sublimação da cafeína que é de 180°C) < R210 (café duro para melhor)(2,91%) < D210 (duro)(17,31%) < R210 (mole)(18,01%) < D210 (mole)(20,06%) < D210 (ETM)(24,04%) < D220 (duro)(24,89%) < R220 (duro)(34,20%) < R210 (ETM)(34,27%) < D220 (mole)(58,81%) < R220 (ETM)(68,06%) < D220 (ETM)(73,25%) < R220 (mole)(74,06%) (Tabela 26 e Figura 23).

No café duro para melhor, as menores perdas de cafeína nos diferentes processos de torração aconteceram, na R210 (2,90% em uma Pp de 15,22%) e na D210 (17,31% em uma Pp de 12,44%), onde as mesmas, dependeram em parte,

da estrutura de compactação do grão verde, de forma que, um menor grau de compactação, propiciou uma maior transferência de calor em um maior tempo de

TABELA 26: Média das concentrações de CF, AC e 5-CQA (g/100g café) obtidos para os cafés (duro para melhor, mole e ETM) torrados pelos sistemas, convencional e microondas, com as suas respectivas perdas (%), a uma determinada perda de peso (%)

| Torração | CF | Perda | AC | Perda | 5-CQA | Perda | Pp |
|--------------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| CAFÉ DURO PARA MELHOR | | | | | | | |
| CD210 | 1,0647 | 17,31 | 0,7726 | 57,60 | 0,7561 | 70,03 | 12,44 |
| GD220 | 0,8710 | 24,89 | 0,2827 | 83,91 | 0,5294 | 79,54 | 15,53 |
| CR210 | 1,2524 | 2,90 | 0,4110 | 77,56 | 0,5243 | 79,43 | 15,22 |
| CR220 | 0,8506 | 34,20 | 0,3670 | 80,07 | 0,4679 | 81,82 | 16,18 |
| Média | 1,0097 | 19,83 | 0,4583 | 74,79 | 0,5694 | 77,71 | 14,84 |
| MO3500W | 1,0171 | 0,00 | 0,9512 | 48,29 | 0,9368 | 63,72 | 16,22 |
| MO3700W | 1,0844 | 0,00 | 0,5514 | 68,16 | 0,8468 | 67,17 | 18,81 |
| MO3850W | 1,1003 | 0,00 | 0,3043 | 82,38 | 0,5762 | 77,52 | 23,08 |
| Média | 1,0673 | 0,00 | 0,6023 | 66,28 | 0,7866 | 69,47 | 19,37 |
| CAFÉ MOLE | | | | | | | |
| CD210 | 2,0335 | 20,06 | 0,6525 | 44,38 | 0,7021 | 55,61 | 13,19 |
| CD220 | 1,0541 | 58,81 | 0,2709 | 76,85 | 0,4790 | 69,38 | 16,24 |
| CR210 | 1,8611 | 18,01 | 0,3685 | 68,29 | 0,4904 | 67,93 | 15,36 |
| CR220 | 0,5766 | 74,60 | 0,2896 | 75,05 | 0,4443 | 70,94 | 17,47 |
| Média | 1,3813 | 42,87 | 0,3954 | 66,14 | 0,5290 | 65,97 | 15,57 |
| MO3500W | 2,5790 | 0,00 | 0,9464 | 17,82 | 0,7705 | 51,61 | 17,65 |
| MO3700W | 2,5485 | 0,00 | 0,8300 | 28,57 | 0,4943 | 68,74 | 19,70 |
| MO3850W | 2,5044 | 0,00 | 0,4753 | 58,17 | 0,6220 | 59,44 | 21,21 |
| Média | 2,5440 | 0,00 | 0,7506 | 34,85 | 0,6289 | 59,93 | 19,52 |
| CAFÉ ESTRITAMENTE MOLE | | | | | | | |
| CD210 | 1,8972 | 24,04 | 0,6855 | 49,49 | 0,6244 | 53,12 | 13,41 |
| GD220 | 0,6681 | 73,25 | 0,2086 | 84,63 | 0,3977 | 70,15 | 17,51 |
| CR210 | 1,3897 | 34,27 | 0,3724 | 72,27 | 0,4565 | 64,84 | 15,56 |
| CR220 | 0,6769 | 68,06 | 0,2122 | 84,20 | 0,4208 | 67,59 | 17,69 |
| Média | 1,1580 | 49,91 | 0,3697 | 72,65 | 0,4749 | 63,93 | 16,04 |
| Torração Convencional | | | | | | | |
| % dif. D e M | 26,91 | 53,76 | 13,73 | 11,56 | 7,11 | 15,11 | 4,64 |
| % dif. D e ETM | 12,81 | 60,27 | 19,34 | 2,86 | 16,61 | 17,73 | 7,48 |
| % dif. M e ETM | 16,17 | 14,10 | 6,50 | 8,95 | 10,23 | 3,09 | 2,98 |
| Torração por Microondas | | | | | | | |
| % dif. D e M - 3500W | 60,56 | 0,00 | 0,50 | 63,10 | 17,75 | 19,01 | 8,10 |
| % dif. D e M - 3700W | 57,45 | 0,00 | 33,57 | 58,08 | 41,63 | 2,28 | 4,52 |
| % dif. D e M - 3850W | 56,07 | 0,00 | 35,98 | 41,62 | 7,36 | 23,32 | 8,10 |

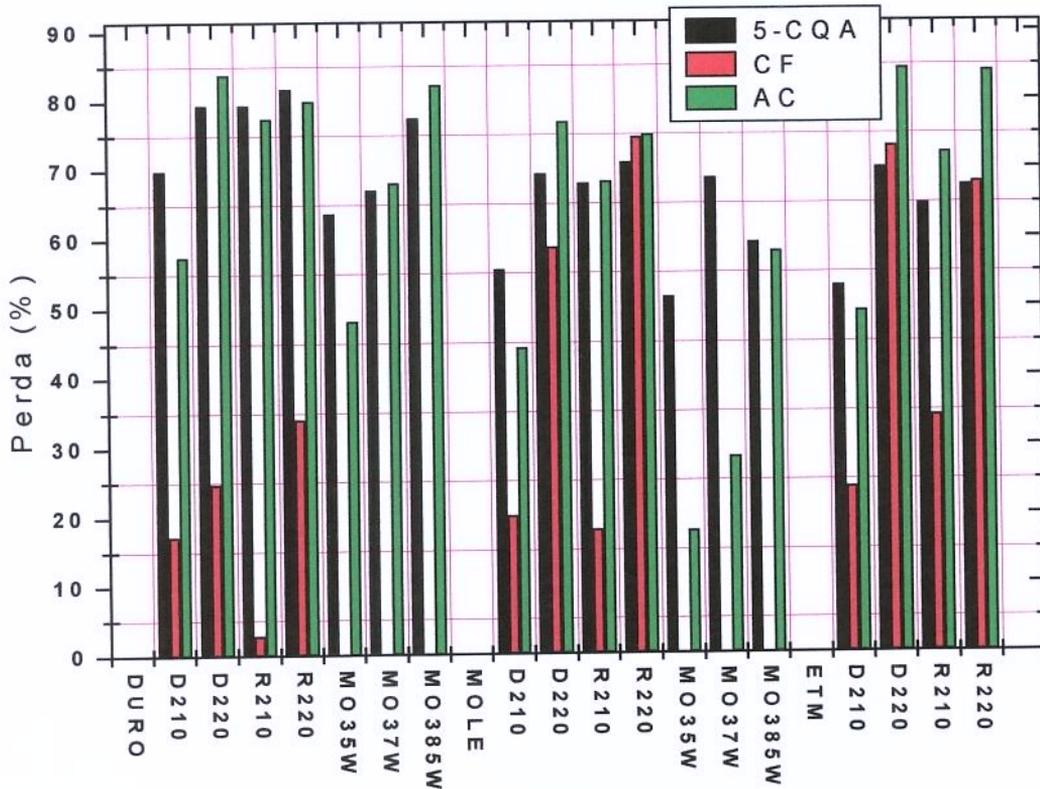


FIGURA 23: Efeito das perdas (%) de cafeína (CF) e dos ácidos 5-cafeoil quinico e caféico, durante os processos de torração convencional e microondas, nas diferentes qualidades de café (duro para melhor, mole e estritamente mole)

torração (10:13 minutos), maior a perda de CF (17,31%), maior o grau de transformação térmica, e em um maior grau de compactação do grão verde, uma menor transferência de calor em um menor tempo de torração (5:06 minutos), menor grau de transformação térmica, menor perda de CF (2,01%), independente da perda de peso, em uma mesma resposta sensorial (café duro para melhor com acidez forte) (Tabelas 26 e 17 e Figura 23).

No café mole, as menores perda de cafeína, ocorreram na R210 (18,01%) e na D210 (20,06%), e dependeram também, em parte, do grau de compactação do grão de café verde, para uma maior ou menor transferência de calor pelo sistema de aquecimento convencional, em um maior ou menor tempo de torração, independente da perda de peso. Pois, em uma menor compactação do grão de café verde, maior a transferência de calor em um menor tempo de torração, maior a perda de CF, maior o grau de transformação térmica, e vice-versa, em uma maior compactação no grão verde (Tabela 26). Nesta qualidade de café, a R210 produziu a menor destruição térmica de CF, maior a taxa de aumento gradativo da temperatura, em um menor tempo de torração (4:49 minutos), pior a resposta sensorial 'café 'queimado'. No entanto, uma maior perda de CF, pela D210, menor a taxa de aumento gradativo da temperatura em um maior tempo de torração (10:01 minutos), melhor a resposta sensorial 'café duro para melhor com forte acidez' (Tabelas 26 e 17 e Figura 23).

No café ETM, as mesmas relações foram estabelecidas, mas com uma relação direta com a perda de peso (%), menor perda de CF em uma menor perda de peso. Isto é, em uma estrutura de grão verde menos compacta, maior a transferência de calor em um maior tempo de torração (10:04 minutos na D210 e 4:47 minutos na R210), menor a perda de CF (24,04% no D210 e 34,27% na R210), menor o grau de transformação térmica. Na D210, a menor taxa de aumento gradativo da temperatura em um maior tempo de torração, promoveu uma melhor resposta sensorial (duro para melhor com acidez forte), que na R210, com uma maior taxa de aumento de temperatura em um menor tempo de torração, maior a perda de CF, com uma pior resposta sensorial 'café queimado' (Tabelas 26 e 17 e Figura 23).

Conseqüentemente, a estrutura de compactação do grão verde, entre outros fatores, determinou a maior ou menor perda de CF, dependendo da maior

ou menor transferência de calor no sistema convencional, e a melhor ou pior resposta sensorial, pela menor ou maior taxa de aumento de temperatura, entre outros fatores. De modo que, uma menor taxa de aumento de temperatura de torração convencional, em um maior tempo de torração, levou a uma melhor resposta sensorial no café torrado, neste estudo.

SULISTYOWATI et alii (1996), estudando o efeito do tamanho do grão de café e o tempo de torração, em algumas características físico-químicas do café torrado, observaram que os mesmos, estavam relacionados com a qualidade da bebida de café. Onde, o tamanho do grão e o tempo de torração, haviam influenciado a perda de peso, a densidade aparente, o pH e a acidez total do café, contudo, o tamanho do grão, não tinha afetado a densidade óptica do café, embora existisse uma interação com o tamanho do grão e a duração da torração. O tamanho do grão, também, não interferiu no sabor e na preferência dos degustadores pela bebida de café, entretanto, a duração da torração, havia influenciado o sabor, o corpo e a preferência dos degustadores, pela bebida de café.

O parâmetro de cor CIELAB L*, neste estudo, revelou uma relação direta com a resposta sensorial, de maneira que, sempre um valor de L* de maior luminosidade (tonalidade mais clara), levou a uma melhor resposta sensorial, e o inverso verdadeiro a uma pior resposta sensorial no café torrado (Tabelas 16, 17 e 19).

Em termos gerais, o café duro para melhor, com uma estrutura de grão verde de maior compactação, sofreu a menor transferência de calor, menor perda de CF, e o café ETM, com a estrutura de grão verde menos compactada dentre as qualidade de café, reportou a maior transferência de calor, maior a perda de CF. O café mole, possuindo em termos médios, uma estrutura de grão verde menos compactada que o café duro para melhor e mais compactada que a do

café ETM, mostrou também, uma transferência de calor e uma perda de CF, maior que a do café duro para melhor e menor que a do café ETM (Tabela 16). O que demonstra, que as características físicas do grão de café verde, influenciam a qualidade do café torrado obtido, de modo que, a escolha de um processo e temperatura de torração, para uma determinada qualidade de café, pode estar diminuindo ou aumentando a sua qualidade.

De acordo com o apêndice O e P, a cafeína apresentou diferenças significativas ($F_{\text{observado}} > F_{\text{crítico}}$) a 5% de significância ($p < 0,05$), entre os diferentes tipos de torração convencional (doméstica e rápida a 210°C e 220°C), mas estas não diferiram significativamente entre as qualidades de café. No entanto, a cafeína mostrou diferenças significativas entre as qualidades de café, quando sofreu torração pelo sistema de microondas, por este, não produzir perdas durante o processo, mantendo-se com a mesma concentração existente no café verde. Portanto, avaliando os resultados obtidos pelo processo de torração convencional e microondas (3500W, 3700W e 3850 W), evidencia-se, que a perda de cafeína parece depender fundamentalmente da taxa de aquecimento, para se atingir a temperatura de sublimação da cafeína, independente da perda de peso.

5.5.2.1.2. Ácido 5-Cafeoil Quínico

TRUGO & MACRAE (1984) estudando os efeitos da torração na composição de ácido clorogênico no café reportaram uma perda de aproximadamente 60% em condições de torração média (15 a 16,9% de perda de peso) e quase 100% após torrações mais severas. Os valores de perda de 5-CQA, encontrados neste estudo, para uma perda de peso correspondente a um grau de torração média, segundo SIVETZ & DESROSIER (1979) (Tabela 1) foram: 63,72% a uma Pp de 16,22% no café duro pela MO3500W, 64,84% a uma Pp de 15,56% no café ETM pela R210, 67,93% a uma Pp de 15,36% no café mole

na R210, 79,43% a uma Pp de 15,22% no café duro pela R210, e 81,82% a uma Pp de 16,18% também no café duro para melhor (Tabela 26). Estas duas maiores perdas de 5-CQA, no café duro para melhor, torrados pela R210 e R220, corresponderam a uma resposta sensorial de 'café duro para melhor com acidez forte' e 'queimado', respectivamente, o que evidencia, o excessivo tratamento térmico (excessiva destruição térmica) sofrido por este café, pela torração rápida a 220°C, mesmo a uma perda de peso de 16,18%.

O comportamento do 5-CQA sob condições de torração por microondas a 3500W, 3700W e 3850W demonstrou uma perda média a cada 1% de perda de peso, no café duro para melhor de 3,62% e de 3,07% no café mole. Onde as perdas de 5-CQA a cada 1% de redução de peso, de maior variação em torno do valor médio ocorreram a 3500W, no café duro (3,93%) e a 3700W no café mole (3,49%), em virtude de suas propriedades dielétricas. O coeficiente dielétrico do café verde (capacidade de um dielétrico de armazenar energia elétrica de um campo eletromagnético), dentre as propriedades dielétricas, reproduziu uma relação com a perda de 5-CQA a cada 1% de perda de peso, de maneira que, a um maior ϵ' (1,61 a perda foi de 3,93%, 1,09 a perda foi de 3,57% e 1,99 a perda foi de 3,36%) reportado pelo café duro para melhor, maior foi a perda de 5-CQA a cada 1% de redução de peso, e em um ϵ' menor (1,55 a perda foi de 2,92%, 1,70 a perda foi de 3,49%, 1,99 a perda foi de 3,36%), menor a perda de 5-CQA no café mole, independente da potência de microondas aplicada ao café, para a sua torração (Tabelas 22 e 27 e Figura 24).

O processo de torração de café pelo sistema de microondas na faixa de potência em estudo e nas duas diferentes qualidades de café, produziu uma menor destruição do 5-CQA (perda % a cada 1% de perda de peso) em comparação aos processos de torração convencional (Tabela 27). Pois, de acordo com SCHIFFMANN (1975), a energia de microondas pode produzir alimentos com

mais sabor, assim como, reter em níveis mais elevados os componentes nutricionais que outros tipos de tratamento térmico.

TABELA 27: Perda (%) de 5-CQA (ácido 5-cafeoil quínico) e AC (ácido caféico) a cada 1% de redução de peso, nos cafés torrados (duro para melhor, mole, e estritamente mole) pelos sistemas, convencional e microondas

| | | 5-CQA | | | AC | | |
|---------------------------------------|--------|-------|--------------|-------|------|--------------|-------|
| Convencional Doméstico a 210°C | | | | | | | |
| | Duro | 5,63 | | | 4,63 | | |
| | Mole | 4,22 | | | 3,36 | | |
| | ETMole | 3,96 | | | 3,69 | | |
| Convencional Doméstico a 220°C | | | | | | | |
| | Duro | 5,12 | | | 5,40 | | |
| | Mole | 4,27 | | | 4,73 | | |
| | ETMole | 4,01 | | | 4,83 | | |
| Convencional Rápido a 210°C | | | | | | | |
| | Duro | 5,22 | | | 5,10 | | |
| | Mole | 4,42 | | | 4,45 | | |
| | ETMole | 4,17 | | | 4,64 | | |
| Convencional Rápido a 220°C | | | | | | | |
| | Duro | 5,06 | | | 4,95 | | |
| | Mole | 4,06 | | | 4,30 | | |
| | ETMole | 3,82 | | | 4,76 | | |
| Convencional Total | | DP | Média | CV% | DP | Média | CV% |
| | Duro | 0,26 | 5,26 | 4,89 | 0,32 | 5,02 | 6,38 |
| | Mole | 0,15 | 4,24 | 3,50 | 0,59 | 4,21 | 14,11 |
| | ETMole | 0,14 | 3,99 | 3,62 | 0,53 | 4,48 | 11,89 |
| Microondas a 3500W | | | | | | | |
| | Duro | 3,93 | | | 2,98 | | |
| | Mole | 2,92 | | | 1,01 | | |
| Microondas a 3700W | | | | | | | |
| | Duro | 3,57 | | | 3,62 | | |
| | Mole | 3,49 | | | 1,45 | | |
| Microondas a 3850W | | | | | | | |
| | Duro | 3,36 | | | 3,57 | | |
| | Mole | 2,80 | | | 2,74 | | |
| Microondas Total | | DP | Média | CV% | DP | Média | CV% |
| | Duro | 0,29 | 3,62 | 7,96 | 0,36 | 3,39 | 10,50 |
| | Mole | 0,37 | 3,07 | 12,00 | 0,90 | 1,73 | 51,97 |

O processo de torração convencional proporcionou diferenças significativas entre os seus diferentes tipos de processo (doméstico e rápido a 210°C e 220°C) sobre as concentrações de 5-CQA, e estas se refletiram significativamente na qualidade do café torrado. O sistema de microondas

quando comparado ao convencional, também, originou diferenças significativas a nível de 5% de significância ($p < 0,05$) na quantidade de 5-CQA, contudo, estas diferenças não foram extrapoladas para a qualidade de café torrado (apêndice Q).

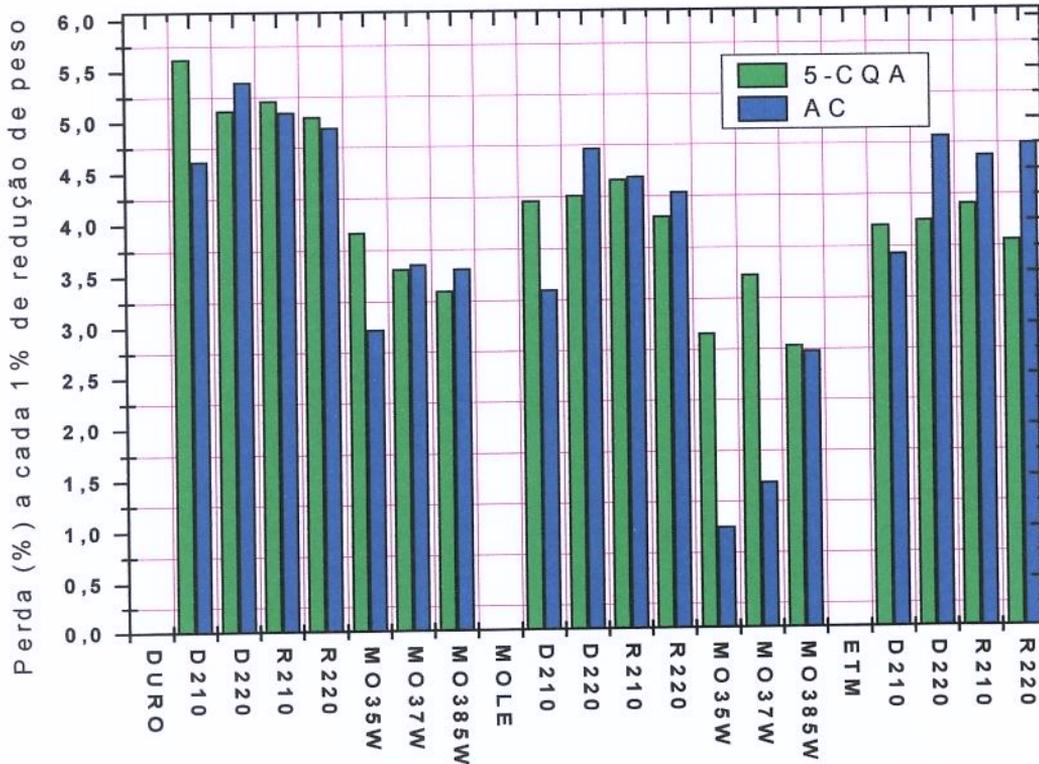


FIGURA 24: Efeito da perda dos ácidos 5-cafeoil quínico (5-CQA) e caféico (AC) a cada 1% de redução de peso, nos cafés (duro para melhor, mole e estritamente mole) torrados pelos sistemas, convencional e microondas

A maior concentração de 5-CQA em comparação a do ácido caféico no café duro para melhor verde, foi mantido no café torrado pelo sistema de aquecimento por microondas a 3700W (resposta sensorial mole com acidez considerável) e a 3850W (queimado), e na potência de 3500W, as concentrações de 5-CQA e AC tornaram-se semelhantes entre si (0,9368g de 5-CQA /100g café e 0,9512 g de AC/100g de café) (mole com acidez considerável). No café mole

verde, concentrações de 5-CQA e ácido caféico, semelhantes entre si, não foram reportadas para o café torrado, em nenhuma das potências de microondas em estudo, nestes, o 5-CQA esteve presente em menor concentração (e o ácido caféico em maior concentração) pelas potências de 3500W (mole com acidez considerável) e 3700W (duro para melhor com acidez forte), e na potência de 3850W, o 5-CQA passou a estar presente em maior concentração e o AC em menor teor (queimado) (Tabelas 17 e 26 e Figuras 23 e 24).

No café duro para melhor, a resposta sensorial superior a sua qualidade de café verde, isto é, 'café mole com acidez considerável', foi evidenciada, a uma faixa de concentração de 5-CQA de 0,85 a 0,94 g/100g café, e de ácido caféico a uma concentração de 0,55 a 0,95 g/100g café, apenas com um equilíbrio entre os teores destes dois compostos a 3500W, e um predomínio em 5-CQA e AC a 3700W. No café mole, a manutenção da qualidade deste café, isto é, uma resposta sensorial mole com acidez considerável, foi traduzida em uma concentração de 5-CQA de 0,77 g/100g café e de 0,95 g/100g café para o ácido caféico (teor de 5-CQA menor que o do AC), dentro da faixa de concentração observada para o café duro para melhor com a mesma resposta sensorial. O que se pode concluir, que a faixa de concentração dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico, foi mais importante para a resposta sensorial de maior qualidade no café torrado, que a relação de maior ou menor concentração de 5-CQA e AC.

5.5.2.1.3. Ácido Caféico

O comportamento do ácido caféico durante os processos de torração convencional [D210 e R210 (industrial)] do café, mostraram uma relação com a perda de peso, da seguinte maneira: uma maior concentração no grão verde (café duro para melhor) (1,7869 g/100g café) originou uma maior perda de ácido caféico (57,60% na D210 e 77,56% na R210) em uma menor perda de peso (12,44% e 15,22%). A menor perda de ácido caféico aconteceu no café mole

(44,38% na D210 e 68,29% na R210), a uma menor concentração no café verde (1,1603 g/100g café) e maior perda de peso que a do café duro para melhor (13,19% e 15,36%). Esta maior e menor perda de ácido caféico, entre estas duas qualidades de café, duro para melhor e mole, não modificou no café torrado a relação existente no café verde, de forma que, o mole manteve a sua presença em uma menor concentração (mesmo em comparação ao café ETM) e o café duro para melhor, em uma maior concentração, no café torrado (Figuras 23 e 24).

O comportamento do ácido caféico, na torração por microondas a 3500W, reportou entre os cafés mole e duro para melhor, praticamente as mesmas concentrações no café torrado (0,50% de diferença) (Tabela 26), e a 3700W, a maior concentração ocorreu no café mole, a uma diferença percentual de 33,57%, invertendo a presença de menor concentração no café mole verde (Tabela 25), devido fundamentalmente a uma menor perda (1,01% no mole e 2,98% no duro a 3500W, e 1,45% no mole e 3,62% no duro a 3700W) (Tabela 27 e Figura 24), durante o aquecimento por microondas, nessas duas potências de microondas.

Os coeficientes de variação superiores a 10%, que se reproduziram na perda média de ácido caféico a cada 1% de redução de peso pela torração convencional (14,11% no café mole e 11,89% no ETM) e microondas (10,50% para o café duro para melhor e 51,97% para o mole), foram promovidos pela torração doméstica a 210°C e pelo sistema de microondas a 3850 W (Tabela 27 e Figura 24).

LELOUP et alii (1995) investigando a cinética de degradação do ácido clorogênico durante um processo de torração industrial em café arábica, observaram que a um tempo curto, os ácidos di-cafeoil quínico (diCQA) eram hidrolisados a ácido cafeoil quínico (CQA) e a ácido caféico (AC). Concomitantemente, os isômeros do 5-CQA sofriam rápida esterificação, conduzindo a formação de ácido 5-cafeoil quínico esterificado com carboidratos

ou proteínas. A um tempo de torração longo, o ácido caféico e os isômeros do ácido quínico, em qualquer forma de ocorrência, começaram a se degradar gerando compostos fenólicos diversos (Figura 7).

Quando a perda de ácido caféico a cada 1% de redução de peso (Tabela 27) foi superior a do 5-CQA, como nos cafés: duro, mole e ETM pela D220; cafés, mole e ETM na R210; cafés duro, mole e ETM pela R220; café duro a MO3850W, houve provavelmente uma maior formação de fenóis pela degradação térmica do 5-CQA, com formação de ácido quínico e ácido caféico, e estes em fenóis [4 etil catecol e catecol pelo AC e hidroquinona, catecol, fenol, e pirogalol pelo ácido quínico, de acordo com LELOUP et alii (1995)], bem como, pela própria degradação do ácido caféico. Estes fenóis, segundo TRESS et alii (1979), propiciam ao café torrado, um forte odor de queimado fenólico com algum grau de doçura, e esta característica organoléptica foi comprovada pela análise sensorial desses cafés (Tabela 17 e Figura 24).

O ácido caféico apresentou uma diferença significativa a 5% de significância ($p < 0,05$) entre os tipos de torração convencional (doméstico e rápido a 210°C e 220°C), refletindo significativamente na qualidade de café torrado obtido (apêndice R). Entre os sistemas de torração convencional e microondas as diferenças foram significativas, mas estas não se reportaram a diferenciação entre as qualidade de café torrado, duro para melhor e mole (apêndice S).

5.5.2.1.4. Relação com a Qualidade do Café

O café duro para melhor, com a mesma resposta sensorial para o seu respectivo grau de qualidade, torrado pelos processos convencionais (D210 e R210), mostrou em comparação ao café mole (D210) e ETM (D210), também com a resposta sensorial 'duro para melhor com acidez forte', uma menor

concentração de cafeína (1,1585 g/100g café no duro e 2,0335 no mole e 1,8972 no ETM), uma menor concentração de ácido caféico (0,5918 g/100g café no duro, 0,6525 no mole e 0,6585 no ETM), e uma concentração de 5-CQA, maior que a do ETM e menor que a do mole (0,6402 g/100g café no duro, 0,7021 no mole e 0,6244 no ETM), em uma maior perda de peso (17,51% no duro, 13,19% no mole e 13,41% no ETM). O que nos demonstra, que o café duro para melhor, em comparação aos outros cafés que diminuíram a sua qualidade pelo processo de torração D210, mas ainda, se mantiveram como uma bebida palatável, um maior grau de destruição térmica dos ácidos 5-cafeoil quínico e AC (Tabela 27 e Figura 24), todavia, em uma maior estrutura de compactação de seus grãos verdes.

Na torração do café, pelos sistemas, de microondas (3500W e 3700W) e convencional (D210 e R210), as melhores respostas sensoriais, 'café mole com acidez considerável' e 'café duro para melhor com acidez forte', ocorreram pelo sistema de aquecimento por microondas e convencional, respectivamente. Onde o café duro para melhor, apresentou, uma menor concentração média de CF (1,0575 g/100g café por microondas e 1,1585 pelo convencional), uma maior concentração média de AC (0,7513 g/100g café por microondas e 0,5918 no convencional) e 5-CQA (0,8918 g/100g café por microondas e 0,6402 no convencional), no café torrado. O que significou, possivelmente, uma menor presença de fenóis e peróxido de hidrogênio no café torrado, oriundos da degradação térmica destes dois ácidos, em uma maior perda de peso (17,51% por microondas e 13,83% no convencional).

Os cafés, mole e ETM, torrados pelo sistema de aquecimento convencional (D210), exibiram uma mesma resposta sensorial (duro para melhor com acidez forte), correspondente a um menor grau de qualidade de ambos. Estes cafés, sofreram relevantes perdas em termos de 5-CQA e AC, onde a maior perda de 5-CQA aconteceu no café mole (4,22% no mole e 3,96% no ETM), e a maior perda de AC (3,36% no mole e 3,69% no ETM), no ETM, o que

provavelmente deve ter levado ao café ETM, a uma maior concentração de fenóis e peróxido de hidrogênio, que no café mole, oriundos da degradação térmica destes dois ácidos, em uma menor estrutura de compactação de grão verde em

TABELA 28: Valores médios encontrados para as concentrações de CF, 5-CQA e AC (g/100g café), percentual de diferença entre as concentrações de 5-CQA e AC ($D_{5CQA \text{ e } AC}$) (%), perda de peso (%) e as relações 5-CQA/CF e 5-CQA/AC nos processos de torração convencional e por microondas

| Qualidade | 5CQA | CF | 5CQA/CF | AC | 5CQA/AC | $D_{5CQA \text{ e } AC}$ | Pp |
|-------------------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|--------------------------|-------|
| Convencional Doméstico 210°C | | | | | | | |
| Duro | 0,7561 | 1,0647 | 0,710 | 0,7726 | 0,979 | 2,14 | 12,44 |
| Mole | 0,7021 | 2,0335 | 0,345 | 0,6525 | 1,076 | 7,06 | 13,19 |
| ETM | 0,6244 | 1,8972 | 0,329 | 0,6855 | 0,911 | 8,91 | 13,41 |
| Convencional Doméstico 220°C | | | | | | | |
| Duro | 0,5294 | 0,8710 | 0,608 | 0,2827 | 1,872 | 46,60 | 15,53 |
| Mole | 0,4790 | 1,0541 | 0,454 | 0,2709 | 1,768 | 43,44 | 16,24 |
| ETM | 0,3977 | 0,6681 | 0,595 | 0,2086 | 1,907 | 47,55 | 17,51 |
| Convencional Rápido 210°C | | | | | | | |
| Duro | 0,5243 | 1,2524 | 0,419 | 0,4110 | 1,276 | 21,61 | 15,22 |
| Mole | 0,4904 | 1,8611 | 0,263 | 0,3685 | 1,331 | 24,86 | 15,36 |
| ETM | 0,4565 | 1,3897 | 0,328 | 0,3724 | 1,226 | 18,42 | 15,56 |
| Convencional Rápido 220°C | | | | | | | |
| Duro | 0,4679 | 0,8506 | 0,550 | 0,3670 | 1,275 | 21,56 | 16,18 |
| Mole | 0,4443 | 0,5766 | 0,771 | 0,2896 | 1,534 | 34,82 | 17,47 |
| ETM | 0,4208 | 0,6769 | 0,622 | 0,2122 | 1,983 | 49,57 | 17,69 |
| Microondas a 3500 W | | | | | | | |
| Duro | 0,9368 | 1,0171 | 0,921 | 0,9512 | 0,985 | 1,51 | 16,22 |
| Mole | 0,7705 | 2,5790 | 0,299 | 0,9464 | 0,814 | 18,59 | 17,65 |
| Microondas a 3700 W | | | | | | | |
| Duro | 0,8468 | 1,0844 | 0,781 | 0,5514 | 1,536 | 34,88 | 18,81 |
| Mole | 0,4943 | 2,5485 | 0,194 | 0,8300 | 0,596 | 40,45 | 19,70 |
| Microondas a 3850 W | | | | | | | |
| Duro | 0,5762 | 1,1003 | 0,524 | 0,3043 | 1,894 | 47,19 | 23,08 |
| Mole | 0,6220 | 2,5044 | 0,248 | 0,4753 | 1,309 | 23,59 | 21,21 |

comparação a do café mole (maior transferência de calor convencional) (Tabela 16). Pois, para TRESSL (1977), MAGA (1978), TRESSL et alii (1979) e BICCHI et alii (1995), os ácidos clorogênicos e seus produtos de degradação (como o ácido caféico) apresentam uma ligação direta com a caracterização da qualidade do café por serem organolepticamente significativos (OHIOKPEHAI et alii, 1982).

Os percentuais de diferença entre os cafés, duro e o mole, torrados pelo sistema convencional e por microondas (média entre as 3 potências), foram os seguintes: 26,91% e 58,03% para a CF, 13,73% e 23,35% para o AC, 7,11% e 22,25% para o 5-CQA, respectivamente; entre o duro e o ETM torrados pelo sistema convencional: 12,81% para a CF, 19,34% para o AC, 16,61% para o 5-CQA ; e entre o café mole e o ETM torrados pelo sistema convencional: 16,17% para a CF, 6,50% para o AC e de 10,23% para o 5-CQA (Tabela 26). O sistema de aquecimento por microondas, foi o que promoveu as maiores diferenças percentuais entre o café duro e o mole, nas concentrações de CF, 5-CQA e AC. Pelo aquecimento convencional, as maiores diferenças percentuais entre estas duas qualidades de café, ocorreram na concentração de CF, evidenciando as diferentes transformações térmicas proporcionadas pelos diferentes processos de torração convencional em estudo. Nos cafés, mole e ETM, torrados pelo sistema convencional, as menores diferenças percentuais, foram exibidas entre as concentrações dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico (Tabela 26 e Figura 23).

A cafeína, estando presente em menor concentração no grão de café duro para melhor torrado de modo convencional, em comparação as outras qualidades de café, reportou o maior percentual de diferença entre o café mole (26,91%) e o ETM (12,81%), e entre o café mole e o ETM (16,17%). O café duro para melhor, reportou em comparação com o café ETM (60,27%), uma maior diferença percentual na perda de CF, e uma menor diferença entre o café mole (53,76%), pela menor perda média de cafeína (19,83% no duro para melhor, 42,87% no mole e 49,91% no ETM). A menor diferença percentual entre as perdas de cafeína, ocorreram entre os cafés ETM e mole, 14,10%, em razão das maiores perdas percentuais de cafeína, quando da torração pelo sistema convencional (Tabela 26 e Figura 23). Todavia, como a torração pelo sistema de microondas não proporcionou perda de cafeína, manteve os mesmos percentuais de diferença exibidos pelo café verde.

O ácido caféico, traduziu-se em uma maior diferença percentual média, entre os cafés, duro para melhor e o ETM (19,34%), e em uma menor diferença percentual entre os cafés mole e o ETM (6,50%), na torração pelo sistema convencional, devido a presença de uma maior e menor concentração no café torrado, respectivamente, no café duro para melhor (0,46 g/100g café) e ETM (0,37 g/100g café) (Tabela 26). Estas duas qualidades de café, foram as que também sofreram, as maiores perdas percentuais médias de ácido caféico (74,79% no café duro e 72,65% no ETM), e por isto, a menor diferença percentual (2,86%). Na torração por microondas, as potências de 3700W e 3850W, foram as que proporcionaram as maiores diferenças percentuais entre os cafés, duro para melhor e o mole (33,57% a 3700W e 35,98% a 3850W), em uma diferença percentual de perda de 58,08% a 3700W e de 41,62% a 3850W (Tabela 26 e Figura 24).

Para o 5-CQA, no processo de torração convencional, a maior diferença percentual média em relação ao seu teor, ocorreu entre os cafés, duro para melhor e ETM (16,61%), a uma maior diferença percentual de perda (17,75%). A menor diferença percentual de perda desta substância, foi de 3,09%, entre os cafés, mole e ETM. Na torração por microondas, a maior diferença percentual aconteceu a 3700W (41,63%), entre os cafés duro para melhor e mole, em uma diferença percentual de perda de 5-CQA de 2,28%. De modo que, uma maior concentração de 5-CQA, no café verde, originou uma menor perda pela torração a 3700W e maior perda a 3500W, em comparação ao café mole. A 3850W, o 5-CQA demonstrou uma diferença percentual de 7,36%, entre a sua concentração no café duro para melhor e a no mole, a uma diferença percentual de perda de 23,32% (77,52% e 59,44%), de maneira que, a esta potência de microondas produziu uma maior destruição do ácido 5-cafeoil quínico, no café duro para melhor em comparação ao café mole, pela maior intensidade de campo elétrico (E_{rms}) gerada no café durante a torração, maior o grau de destruição térmica, em

uma maior perda de peso (23,08% no duro e 21,21% no mole) (Tabela 24). Embora que, a esta potência de microondas as reações térmicas produzidas envolviam fundamentalmente a carbonização do grão, com a inexistência de palatabilidade na sua bebida (resposta sensorial de café 'queimado') (Tabela 17).

Analisando a característica organoléptica 'queimado' nos cafés torrados ETM (D220, R210 e R220), mole (D220, R210 e R220 e MO3850W) e duro para melhor (D220, R220 e MO3850W), observou-se que os mesmos, reportavam para D_{5-CQA} e AC uma faixa de 18,42% a 49,57% (Tabela 28), e de 2,74% a 5,40% para a perda de ácido caféico (AC) a cada 1% de redução de peso (Tabela 27 e Figura 24). Esta maior perda (%) de AC a cada 1% de redução de peso, em comparação a de 5-CQA por ocasião da torração, originou provavelmente, uma maior concentração de fenóis responsáveis pelo odor de queimado fenólico no café torrado e peróxido de hidrogênio, o que provocou a diminuição da sua qualidade.

A característica 'duro para melhor com forte acidez' nos cafés torrados ETM (D210), mole (D210 e MO3700W) e duro para melhor (D210 e R210), com uma D_{5-CQA} e AC na faixa de 2,14% a 8,91% (D210) e de 21,61 a 40,45% (R210 e MO3700W) (Tabela 28), e uma faixa para a perda de AC a cada 1% de redução de peso de 1,45% a 5,10% (Tabela 27 e Figura 24). Esta perda de ácido caféico foi sempre menor que a de 5-CQA, a cada 1% de redução de peso, o que traduz no café torrado, provavelmente, um menor teor de fenóis e peróxido de hidrogênio, e a ausência de reações de carbonização (Tabela 17).

A característica sensorial 'mole com acidez considerável' nos cafés torrados, duro para melhor (MO3500W e MO3700W) e mole (MO3500W), aconteceu na presença de uma faixa de D_{5-CQA} e AC de 1,51% a 34,88% (Tabela 28), e a uma perda de ácido caféico a cada 1% de redução de peso de 1,01% a 3,62% (Tabela 27 e Figura 24).

O café duro para melhor, quando torrado a 3700W, mesmo exibindo uma perda de AC a cada 1% de redução de peso (3,62%) (Tabela 27) maior que a perda de 5-CQA (3,57%), e uma relevante maior $D_{5-CQA \text{ e } AC}$ (34,88%) (Tabela 28), apresentou a característica 'café mole com acidez considerável'. Segundo CLARKE & MACRAE (1985), o grão de café inicia o processo de pirólise (reações exotérmicas) a cerca de 185°C, e até este momento, a perda de peso é proporcionada pela eliminação de água do grão, na ordem de $\pm 10\%$ em relação ao seu peso verde (a uma umidade de 12%).

O café mole, torrado a 3500W, produziu uma resposta sensorial 'mole com acidez considerável' e quando torrado a 3700W, uma resposta 'duro para melhor com acidez forte', onde a possível explicação deste fenômeno possa estar nas propriedades dielétricas apresentadas por estes dois cafés, mole, frente a diferentes potências de microondas. O grão de café verde submetido a torração por microondas a 3700W em comparação ao torrado a 3500W, possuía como características: uma menor quantidade de massa/volume (2,07%) (Tabela 24), com uma maior capacidade para absorver energia elétrica de um campo eletromagnético(α) em uma menor distância para a diminuição desta energia (dp), e possuindo uma maior capacidade para armazenar a energia elétrica absorvida (ϵ') em uma maior resistência para a dissipação desta energia (ϵ''), assim como, uma maior capacidade para converter a energia elétrica estocada em calor ($\tan \delta$), entretanto com uma maior perda dielétrica efetiva (ϵ''_{eff}). Quando torrado a 3700W, deu origem a uma menor diferença percentual na intensidade de campo elétrico gerada (16,13%) (Tabela 22), todavia, em uma maior diferença percentual na taxa de aumento de temperatura (50%) (15,60°C/minuto a 3700W e 7,80°C/minuto a 3500W) (Tabela 24), pela menor perda dielétrica efetiva (diferença de 26,67%) originada durante a torração a 3700W, maior grau de

transformação térmica durante a torração, maior a perda de 5-CQA a cada 1% de redução de peso em comparação a perda de ácido caféico (3,49% de 5-CQA e 1,45% de AC a 3700W e 2,92% de 5-CQA e 1,01% de AC a 3500W), e com isso, uma concentração de 5-CQA menor e maior de AC (0,49 % de 5-CQA e 0,83% de AC a 3700W, e 0,77% de 5-CQA e 0,95% de AC a 3500W), neste café. A maior perda de 5-CQA e de AC a cada 1% de redução de peso, no café torrado a 3700W, em comparação a mesma qualidade de café torrada a 3500W, deve ter propiciado, provavelmente, uma maior formação de fenóis oriundos da degradação térmica do 5-CQA e ácido caféico, e uma maior concentração de peróxido de hidrogênio, e desta forma diminuindo a sua qualidade.

Se compararmos, as propriedades dielétricas dos cafés duro para melhor, torrados a 3500W e a 3700W, com a mesma resposta sensorial 'mole com acidez considerável', equivalente a um maior grau de qualidade, verificamos, que aquele torrado a 3700W, apresentava como características dielétricas, quando verde, o seguinte: um menor α em uma maior d_p (Tabela 22), numa estrutura de grão de maior compactação (diferença de 1,35%), maior quantidade de massa/volume (Tabela 24), maior capacidade de armazenar energia elétrica de um campo eletromagnético (ϵ'), todavia, em uma mesma resistência para a dissipação desta energia absorvida (ϵ'') que aquele torrado a 3500W, e ainda, menor capacidade de converter esta energia elétrica em calor ($\tan \delta$), o que determinou, uma maior diferença percentual entre os campos elétricos gerados a diferentes potências de microondas (17,99%), mas com uma menor diferença percentual na taxa de aumento de temperatura (31,25%) (9,60°C/minuto a 3700W e 6,60°C/minuto a 3500W) (Tabela 24), e igual perda dielétrica efetiva (ϵ''_{eff}), de tal maneira que o café torrado a 3700W, sofreu uma menor diferença percentual (9,16% para o 5-CQA e 17,68% para o AC) entre as perdas de 5-CQA e AC a cada 1% de redução de peso (Tabela 27 e Figura 24) entre as duas potências, comportamento semelhante na análise sensorial de suas bebidas, e em presença de maiores

concentrações de 5-CQA (0,85% a 3700W e 0,94% a 3500W) (Tabela 26 e Figura 23), menor grau de destruição térmica, menor formação de compostos com características sensoriais indesejáveis.

5.5.3. Avaliação da Metodologia de Análise

Com o objetivo de avaliar a precisão dos resultados obtidos pela leitura da área dos picos em relação às concentrações ($\mu\text{g/mL}$) de cafeína e dos ácidos 5-cafeoil quínico e caféico, as análises de variância (Tabela 29) a um nível de probabilidade de 95% ($p < 0,05$) apresentaram os seguintes modelos lineares: $y = 0,0363609 + 0,0008497x$ e $y = -0,0267233 + 0,0008502x$ para a cafeína; $y = -0,0464895 + 0,0024862x$ e $y = -0,0318026 + 0,0024670x$ para o ácido 5-cafeoil quínico; $y = -0,0053396 + 0,0000871x$ e $y = -0,0069372 + 0,0000869x$ para o ácido caféico, estatisticamente significativos. Pela análise de regressão (Tabela 30) pode-se observar que os coeficientes de determinação (R^2) para a cafeína e os ácidos 5-cafeoil quínico e caféico foram 99,9% da variação explicada pelo modelo. Revelando-se uma ótima reprodutibilidade dos dados e com um erro experimental inferior a 10%, como preconizado por HENIKA & PALMER (1976).

A capacidade de recuperação para a cafeína e para os ácidos 5-cafeoil quínico e caféico, foi de 100%, a partir de uma solução com 0,0421 g/100 mL de cafeína, 0,0047 g/mL de ácido 5-cafeoil quínico e de 0,0266 g/mL de ácido caféico.

TABELA 29: Análise de variância ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$), em relação a concentração de cafeína, e dos ácidos cafeoil quínico e caféico ($\mu\text{g/mL}$), e a área do pico cromatográfico obtido por CLAE

| | Fonte Variação | Regressão | Erro Experimental | Total |
|--------------------------------|------------------------|--|-----------------------|---------|
| Cafeína | | | | |
| Padrão para Café Verde | gl | 1 | 2 | 3 |
| | SQ | 634,30 | 0,0166 | 634,32 |
| | QM | 634,30 | 0,0083 | |
| | $F_{\text{observado}}$ | 76373,98* | | |
| | F_{tabelado} | $1,31 \times 10^{-5}$ | | |
| Padrão para Café Torrado | gl | 1 | 4 | 5 |
| | SQ | 6405,84 | 0,0352 | 6405,88 |
| | QM | 6405,84 | 0,0088 | |
| | $F_{\text{observado}}$ | 728185,42* | | |
| | F_{tabelado} | $1,13 \times 10^{-11}$ | | |
| Ácido 5-Cafeoil Quínico | | | | |
| Padrão para Café Verde | gl | 1 | 2 | 3 |
| | SQ | 21,22 | 0,0193 | 21,24 |
| | QM | 21,22 | 0,0097 | |
| | $F_{\text{observado}}$ | 2193,56* | | |
| | F_{tabelado} | $4,56 \times 10^{-4}$ | | |
| Padrão para Café Torrado | gl | 1 | 2 | 3 |
| | SQ | 103,98 | 0,0037 | 103,99 |
| | QM | 103,98 | 0,0018 | |
| | $F_{\text{observado}}$ | 56781,48* | | |
| | F_{tabelado} | $1,76 \times 10^{-5}$ | | |
| Ácido Caféico | | | | |
| Padrão para Café Verde | gl | 1 | 1 | 2 |
| | SQ | 553,94 | $2,61 \times 10^{-5}$ | 553,94 |
| | QM | 553,94 | $2,61 \times 10^{-5}$ | |
| | $F_{\text{observado}}$ | 21225475,19* | | |
| | F_{tabelado} | $1,38 \times 10^{-4}$ | | |
| Padrão para Café Torrado | gl | 1 | 4 | 5 |
| | SQ | 3574,68 | 0,0109 | 3574,69 |
| | QM | 3574,68 | 0,0027 | |
| | $F_{\text{observado}}$ | 1306394,2* | | |
| | F_{tabelado} | $3,52 \times 10^{-12}$ | | |

(*): significativo ao nível de 95% de probabilidade ($p < 0,05$)

TABELA 30: Análise de regressão ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$), em relação a concentração de cafeína e ácidos 5-cafeoil quínico e caféico ($\mu\text{g/mL}$), e a área do pico cromatográfico obtido por CLAE

| | Regressão | Resultados |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------|
| Cafeína | | |
| | Padrão para Café Verde | |
| | Erro Padrão | 0,0911 |
| | R-Quadrado | 0,9999 |
| | Padrão para Café Torrado | |
| | Erro Padrão | 0,0938 |
| | R-Quadrado | 0,9999 |
| Ácido 5-Cafeoil Quínico | | |
| | Padrão para Café Verde | |
| | Erro Padrão | 0,0984 |
| | R-Quadrado | 0,9991 |
| | Padrão para Café Torrado | |
| | Erro Padrão | 0,0428 |
| | R-Quadrado | 0,9999 |
| Ácido Caféico | | |
| | Padrão para Café Verde | |
| | Erro Padrão | 0,0051 |
| | R-Quadrado | 0,9999 |
| | Padrão para Café Torrado | |
| | Erro Padrão | 0,0523 |
| | R-Quadrado | 0,9999 |

6. CONCLUSÕES

O estudo aqui apresentado englobou a utilização de uma tecnologia não convencional em comparação ao sistema de aquecimento convencional para a torração do café. Os resultados obtidos com os experimentos permitiram chegar as seguintes conclusões:

O sistema de aquecimento por microondas promoveu um aumento de qualidade no café duro para melhor, menor qualidade de café usado neste estudo, quando torrado à potências de 3500W e de 3700W, passando de uma resposta sensorial duro para melhor com acidez forte para mole com acidez considerável. No café mole, as microondas apenas proporcionaram a manutenção desta mesma qualidade na potência de 3500W, e uma diminuição desta a 3700W. Deste modo, a tecnologia de microondas, desponta como um potencial de desenvolvimento, principalmente para a aplicação em cafés verdes de menor qualidade.

A utilização das propriedades dielétricas para a avaliação do processo de microondas permitiu uma maior compreensão dos fenômenos que ocorreram durante a torração do café, e desta maneira prever e avaliar o comportamento do café, frente a um determinado campo eletromagnético.

7. SUGESTÕES

Constado o potencial do uso de microondas para a torração do café, em grãos de café de menor qualidade, e tendo-se condições de se avaliar o processo de microondas, sugere-se:

1. Otimizar as condições de torração do café duro para melhor, pelo método convencional e de microondas à baixas potências, seguido da avaliação de suas características físicas, químicas e sensoriais. A matéria-prima deverá ser de uma única procedência e homogênea.
2. Realizar a avaliação econômica do processo de microondas em comparação ao convencional, após a otimização das condições de torração, para a sua possível aplicação industrial.

8. BIBLIOGRAFIA

- AMORIM, H.V.; MALAVOLTA, E.; TEIXEIRA, A.A.; CRUZ, V.F.; MELO, M.; GUERCIO, M.A.; FOSSA, E.; BRERIGLIERI, O.; FERRARI, S.E.; SILVA, D.M. Relationship between some organic compounds of Brazilian green coffee with the quality of the beverage. **Proc. 6 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris: 113-27, 1973
- ANDRAGE, J.B.; PINHEIRO, H.L.C.; LOPES, A.; MARTINS, S.; AMORIN, A.M.M.; BRANDAO, A.M. Determination of caffeine in beverages by high performance liquid chromatography (HPLC). **Quim. Nova** 18 (4):379, 1995
- ABIC (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ). 15 milhões de sacas no ano 2000. **Jornal do Café** nº 57, maio, 1996
- ABIC (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ). Uma radiografia da indústria. **Jornal do Café** nº 90, fevereiro, 1999_a
- ABIC (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ). O mercado cafeeiro no contexto da crise global. **Jornal do Café** nº 91, março, 1999_b
- ABIC (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ). Tendências para os cafés especiais. **Jornal do Café** nº 105, maio 2000. pp. 9
- BALTES, W. Effect of roasting on the composition of coffee. **Proc. 8 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 85, 1977
- BELL, L.N. & LABUZA, T.P. pH of low-moisture solids. **Trends in Food Science & Technology** 3: 271-4, 1992

- BENNAT, C.; ENGELHARDT, U.H.; KIEHNE, A.; WIRRIES, F.M.; MAIER, H.G. HPLC analysis of chlorogenic acid lactones in roasted coffee. **Z. Lebensm. Unters. Forsch.** (1): 17, 1994
- BERG, R.; MURTA, A.L.M.; KUGLER, W.; OLIVEIRA, P.L.C. Determinação de cafeína em alguns cafés solúveis brasileiros por cromatografia líquida de alta eficiência. **Ciência e Tecnologia de Alimentos** 4 (2): 116-21, 1984
- BEZJIAN, A. Choosing a coffee grinder. **Tea and Coffee Trade Journal** 167 (4): 62,64, 1995
- BIANCHINE, J.R. **Caffeine**. Colliers Encyclopedia. Vol 5, 1996
- BIRCH, G.G. & LINDLEY, M.G. Structural functions of taste in the sugar series: cyclohexane polyols as sweet analogues of the sugars. **Journal of Food Science** 38 (7): 1179-81, 1973
- BLAUCH, J.L. & TARKA, S.M. HPLC determination of caffeine and theobromine in coffee, tea and instant hot cocoa mixture. **Journal of Food Science** 48: 745-7, 750, 1983
- BOSCH, E.; BOU, P.; ALLEMANN, H.; ROSÉS, M. Retention of ionizable compounds on HPLC. pH scale in methanol-water and the p_k and pH values of buffers. **Analytical Chemistry** 68 (20): 3651-57, 1996
- BUCK, D.E. **The dielectric spectra of ethanol-water mixtures in the microwave region**. Cambridge, MA, 1965. Ph.D. Thesis - Massachusetts Institute of Technology

- BUFFLER, C.R. & STANFORD, M.A. Effects of dielectric and thermal properties on the microwave heating of foods. **Microwave World** 12 (4): 15-23, 1991
- BUNKER, M.L. & McWILLIAMS, M. Caffeine content of common beverages. **Journal of the American Dietetic Association**, USA 74 (1): 28-32, 1979
- BURG, A.W. Effects of caffeine on the human system. **Tea and Coffee Trade Journal** 147 (1): 42-48, 88, 1975
- BÜRGIN, E. Unbehandelter und behandelter kaffee unter dem mikroskop. **Proc. 4 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp 63-74, 1970
- CALDAS, F.P. Experimental high frequency dryer for granular materials. **American Society of Agricultural Engineers** 35(4): 1275- 82, 1992
- CAMPOS, M.S. **Influência da energia de microondas na qualidade tecnológica do trigo**. Campinas, 1986. 120p. Tese (Mestrado) Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, UNICAMP
- CHARRIER, A. Variation de la teneur en caféine chez les caféiers. **Proc. 7 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris: 295-302, 1975
- CHASSEVENT, F.; VINCENT, J.C.; HAHN, D.; POUGNEAUD, S.; WILBAUX, R. Etude de relations éventuelles gustatives ou chimiques en fonction de la préparation du café robusta au stade primaire. **Proc. 4 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 179-85, 1969
- CLARKE, R.J. International coffee standartisation and legislation. **Food Chemistry** 4: 81-96, 1979

- CLARKE, R.J. Roasted coffee grinding techniques. **Food Processing and Marketing** 26: 9-12, 1965
- CLARKE, R.J. The shelf life of coffee. **Dev. Food Sci.** 33 (Shelf Life Studies of Foods and Beverages): 801, 1993
- CLARKE, R.J. & MACRAE, R. **Coffee: Chemistry**. Volume 1. Essex, England, Elsevier Science Publishers LTD, 1985. 306 p.
- CLARKE, R.J. & MACRAE, R. **Coffee: Technology**. Volume 2. Essex, England, Elsevier Science Publishers LTD, 1989. 321 p.
- CLIFFORD, M.N. Chlorogenic acids - their complex nature and routine determination in coffee beans. **Food Chemistry** 4: 63-71, 1979
- CLIFFORD, M.N. Coffee bean dicaffeoylquinic acids. **Phytochemistry** 25 (7): 1767-69, 1986
- CLIFFORD, M.N. **The phenolic compounds of green and roasted coffee beans**. PhD Thesis, University of Strathclyde, Glasgow, 1972
- CLIFFORD, M.N. What factors determine the intensity of coffee's sensory attributes? **Tea & Coffee Trade Journal** 159 (9): 34-36, 1987
- CLIFFORD, M.N. What factors determine the intensity of coffee's sensory attributes. **Tea & Coffee Trade Journal** 160 (12): 8-9, 1988
- CLIFFORD, M.N. & JARVIS, T. The chlorogenic acids content of green robusta coffee beans as a possible index of geographic origin. **Food Chemistry** 29: 291-98, 1988

- CLIFFORD, M.N. & OHIOKPEHAI, O. Coffee astringency. **Analytical Proceedings** 20: 83-6, 1983
- CLIFFORD, M.N. & WIGHT, J. The measurement of feruloylquinic acids and caffeoylquinic acids in coffee beans. Development of the technique and its preliminary application to green coffee beans. **Journal of the Science Food Agriculture** 27: 73-84, 1976
- CLIFFORD, M.N. & WILLIAMS, T.; BRIDSON, D. Chlorogenic acid and caffeine as possible taxonomic criteria in *Coffea* and *Psilanthus*. **Phytochemistry** 28: 829-38, 1989
- CLIFFORD, M.N. & WILLSON, K.C. **Coffee, Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage**. Westport, Connecticut, The Avi Publishing Company, Inc, 1985. 450 p.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L' ECLAIRAGE (CIE). Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychrometric color terms. Supplement n° 2 to CIE Publications n° 15, Colorimetry Bureau Central de la CIE, Paris, 1978
- DAGLIA, M.; CUZZONI, M.T.; DACARRO, C. Antibacterial activity of coffee. **J. Agric. Food Chem.** 42 (10): 2270-72, 1994_a
- DAGLIA, M.; CUZZONI, M.T.; DACARRO, C. Antibacterial activity of coffee: relationship between biological activity and chemical markers. **J. Agric. Food Chem.** 42 (10): 2273-77, 1994_b
- DALLA ROSA, M.; LERICI, C.R.; PIVA, M.; FINI, P. Coffee processing: chemical, physical and technological aspects. V. Evaluation of some physical

- characteristics of coffee during heat treatment at constant temperature. **Industrie delle Bevande** 50: 466-72, 1980
- D'AMICIS, A. & VIANI, R. **The consumption of coffee**. In: Caffeine, Coffee and Health. Ed. S. Garattini. Raven Press, Ltda, New York, 1993
- DATTA, A.K. & HU, W. Optimization of quality in microwave heating. **Food Technology** 46 (12): 53-6, 1992
- DAVIDS, K. **The Coffee Book**. Whittet Books, Weybridge, England, pp 21-59, 1980
- DECAREAU, R.V. & PETERSON, R.A. **Microwave processing and engineering**. Chichester, England, 1986. p.49
- de LOOR, G.P. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water. **Journal Microwave Power** 3: 67-73, 1968
- de LOOR, G.P. & MEIJBOOM, R.W. The dielectric constant of foods and other materials with high water contents at microwave frequencies. **Journal Food Technology** 1: 313-22, 1966
- 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^o ed. Westport, Connecticut, The AVI Publishing Company, Inc., 1985. pp. 284-04
- DIAZ, J.S.; GOMEZ, G.S.; FELSNER, G.; FRITSCH, G. Estudio de la señal ancha resonancia magnetica nuclear (resonancia de protones) en muestras de café colombiano preparado en diferentes condiciones. Proc. **6 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 172-7, 1973

- DUPLATRE, A.; ARZOUYAN, C.; TISSE, Ch.; GUERERE, M.; ESTIENNE, J. Essai de différenciation entre café a torréfaction conventionnelle et café a torréfaction rapide. **Ann. Fals. Exp. Chim.** 80 (856): 139-53, 1987
- ENGELDER, D. & BUFFLER, C. Measuring dielectric properties of food products at microwave frequencies. **Microwave World** 12 (2): 6-15, 1991
- ENGELHARDT, U.H. & MAIER, H.G. Acids of coffee. XI. Proportion of individual acids in the total titratable acid. **Z. Lebensm. Unters. Forsch.** 181 (1): 20-3, 1985
- FELDMAN, J.R.; RYDER, W.S.; KUNG, J.T. Importance of non-volatile compounds to the flavour of coffee. **J. Agric. Food Chem.** 17: 733-9, 1969
- FELLOWS, P. **Tecnología del Procesado de los Alimentos: Principios y Prácticas**. Editorial Acribia, S.A., Zaragoza, 1992. p.325-40 e p. 355-69
- FENNEMA, O.R. Water and ice. In: FENNEMA, O.R. **Principles of Food Science**, Part 1-Food Chemistry. Ed., Marcel Dekker Inc, New York, 1976. p.32
- FRANCIS, F.J. & CLYDESDALE, F.M. Food colorimetry: theory and applications. AVI Publications Company, Westport, Connecticut, 1975. pp. 152-59
- GAL, S.; WINDERMAN, P.; BAUMGARTNER, E. Untersuchungen über die vorgänge beim dämpfen von kaffeebohnen. **Chimia** 30: 68-71, 1976
- GARNERO, J. Heterocyclic aroma compounds precursors. In: VERNIN, G. **The chemistry of heterocyclic flavoring and aroma compounds**. West Sussex, England, Ellis Horwood Ltd., 1982. p.7

- GERLING, J.E.; & O'MEARA, J.P. **Apparatus for microwave roasting of coffee beans**. Int. Cl³. H056 6/78. United States Patent (US) 4.326.114. 14 oct. 1980, 20 abr. 1982
- GILBERT, R.M.; MARSHMAN, J.A.; SCHWIEDER, M.; BERG, R. Caffeine content of beverages as consumed. **Can. Med. Assoc. Journal** 114: 205-8, 1976
- GILKEY, R.; SHEELEY, R.M.; HURST, W.J.; MARTIN, R.A. Dimerization of xanthine alkaloids as an explanation of extreme solubility differences, 16 **MARM**, 1984
- GOODMAN, B.A.; GLIDEWELL, S.M.; DEIGHTON, N.; MORRICE, A.E. Free radical reactions involving coffee. **Food Chemistry** 51 (4): 399, 1994
- GOYETTE, J.; CHAHINE, R.; BOSE, T.K. Importance of the dielectric properties of materials for microwave heating. **Drying Technology** 8 (5): 1111-21, 1990
- GUTIÉRREZ, C.; ORTOLÁ, M.D.; CHIRALT, A.; FITO, P. Análisis por meb de la porosidad del café tostado. **Proc. 15 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 661-71, 1993
- HAYAKAWA, K.I.; MATAS, J.; HWANG, M.P. Moisture sorption isotherms of coffee products. **Journal of Food Science** 43: 1026-7, 1978
- HEISS, R. & RADTKE, R. Packaging and marketing of roasted coffee. **Proc. 8 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**, ASIC, Paris, pp 163-74, 1977
- HENIKA, R.G. & PALMER, G.M. Response surface methodology: revited . In: American Association of Cereal Chemistry, 1976. New Orleans, Annual Meeting, 1976. 14 p.

- HEUMAN, J. The art and science of coffee brewing. **Tea & Coffee trade Journal** (12): 54-7, 1994
- HIBI, H. & YAMANASHI, H. NAGOYASEIRAKU, Co., LTD. **Method of manufacturing rich -flavored roasted coffee beans and ground roasted coffee beans**. Int. Cl⁵. A23F 5/04, A23F 5/10, A 23F 5/08. European Patent Application (EU) 0 534 051A1. 08.04.1992; 31.03.1993
- HOCKFIELD, H.S.; FULLOM, C.L.; ROPER, G.C.; SHEELEY, R.M.; HURST, W.J.; MARTIN, R.A. Thermochemical investigations of the dimerization of theobromine, 14 **MARM**, 1982
- HOLZMINDEN, T.V.E. Technical considerations for microwave flavours. **Food Tec 2**: 11-18, 1991
- HORMAN, I. & VIANI, R. The caffeine-chlorogenate complex of coffee. An NMR study. **Proc. 5 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 102-11, 1971
- HUGHES, W.J. & THORPE, T.M. Determination of organic acids and sucrose in roasted coffee by capillary gas chromatography. **Journal of Food Science** 52 (4): 1078-83, 1987
- HUNTER ASSOCIATES LABORATORY, Inc. **Instrument working standards**. EUA, Reston, 1996.
- IGLESIAS, J. & WESTPHAL, W.B. Supplementary dielectric constant and loss measurements on high temperature materials. **Technical report 203**, Laboratory for Insulation Research, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 1967

- IKEYA, M.; BAFFA, F.O.; MASCARENHAS, S. Quality assessment of coffee beans with ESR and gamma-ray irradiation. **Appl. Radiat. Isot.** 40: 1219-22, 1989
- ITO, H.; SHIMODA, M.; OSAJIMA, Y. Head space gas chromatographic method using the internal standard for determination of aroma of roast and ground coffee - effect of particle size and roasting degree. (Studies on aroma of coffee - part II). **Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi** 30 (3): 133-39, 1983
- IWAHASHI, H.; ISHII, T.; SUGATA, R.; KIDO, R. The effects of caffeic acid and its related catechols on hydroxyl radical formation by 3-hydroxyanthranilic acid, ferric chloride, and hydrogen peroxide. **Archives of Biochemistry and Biophysics** 276 (1): 242-47, 1990
- KAREL, M. Physicochemical modification of the state of water in foods. In: DUCKWORTH, R.B. **Water Relations in Foods**. New York, Academic Press, 1975
- KIRKPATRICK, S. J.; BERTAGNA, R.W.; GUTWEIN, R.W. PROCTER & GAMBLE COMPANY. **Process for making reduced density coffee**. Int. Cl.⁵ A23F 5/04. United States Patent (US) 5.160.757. 26.07.91; 03.11.92
- KÖNIG, W.A. & STÜRM, R. Gas chromatography and mass spectrometry as an aid for the investigation of high boiling coffee constituents. Proc. 10 th **International Colloquium on Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 271-8, 1982
- KRESS-ROGERS, E. & KENT, M. Microwave measurement of powder, moisture and density. **Journal of Food Engineering** 6: 345-76, 1987

- KUNG, J.J.; McNAUGHT, R.P.; YERANSIAN, J.A. Determining volatile acids in coffee beverages by NMR and gas chromatography. **Journal Food Science** 32: 455-8, 1967
- LEINO, M.; LAPVETELÄINEN, A.; MENCHERO, P.; MALM, H.; KAITARANTA, J.; KALLIO, H. Characterization of stored arabica and robusta coffees by headspace GC and sensory analyses. **Food Quality and Preference** 3 (2): 115-25, 1992
- LEITE, I.P. **Influência do local de cultivo e do tipo de colheita nas características físicas, composição química do grão e qualidade do café (*Coffea arabica* L.)**. Lavras, 1991. 131 p. Tese (Mestre em Ciência dos Alimentos) - Escola Superior de Agricultura de Lavras
- LELOUP, V.; LOUVRIER, A.; LIARDON, R. Degradation mechanisms of chlorogenic acids during roasting. Proc. 16 th **International Colloquium on Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 192-8, 1995
- LENTNER, C. & DEATHERAGE, F.E. Organic acids in coffee in relation to the degree of roast. **Food Research** 24: 483-92, 1959
- LERICI, C.R.; DALLA ROSA, M.; MAGNANINI, E.; FINI, P. Processi di trasformazione del caffè: aspetti chimici, fisici e tecnologici. Note 4: Evoluzione di alcuni caratteri fisici del caffè durante la torrefazione. **Industrie delle Bevande** 10: 375-81, 1980
- LERICI, C.R.; LERCKER, G.; MATASSA, P.; DALLA ROSA, M. Processi di trasformazione del caffè: aspetti chimici, fisici e tecnologici. Nota 1: Modificazioni in alcuni caratteri chimici e fisici. **Industrie delle Bevande** 37: 345-51, 1978

- LERICI, C.R.; LERCKER, G.; MINGUZZI, A.; MATASSA, P. Processi di trasformazione del caffè: aspetti chimici, fisici e tecnologici. Nota 3: Effetti della torrefazione sulla composizione chimica di alcune miscele di caffè. **Industrie delle Bevande** 9: 232-38, 1980
- LE-VIET, T. & TRUCHEMENT, B. NESTLÉ S.A., SOCIÉTÉ DES PRODUITS. **Process and device for control of the degree of roasting of products especially coffee.** Int. Cl⁴. A23F 5/04, A23N 12/08. European Patent Office (EP) 0.222.124A1. 27.09.86; 20.05.1987. Swiss Patent (CH) 665.754A5.21.10. 1985; 15.06.1988
- LIN, Y.E.; ANANTHESWARAN, R.C.; PURI, V.M. Finite element analysis of microwave heating of solid foods. **Journal of Food Engineering** 25: 85-112, 1995
- LINGUERT, H. & ERIKSSON, C.E. Antioxidative effect of Maillard reaction products. In: ERIKSSON, C.E. **Progress in Food and Nutrition Science. Maillard reaction in Food.** U.k., Pergamon Press, 1981. 453 - 66 p.
- MAGA, J.A. Simple phenol and phenolic compounds in food flavour. **CRC Crit. Rev. Food Science Nutrition** 10: 323-72, 1978
- MAHLMANN, J.P.; SCHECTER, S.M.; SCHER, L. GENERAL FOODS CORPORATION. **Controlled coffee roasting.** Int. Cl³. A23F 5/04. United States Patent (US) 4.501.761. 10.12.82; 26.02.1985.
- MAIER, H.G. Les acides du café. **Café Cacao Thé** 31 (1): 49-58, 1987

- MAIER, H.G. Zur bestimmung der extraktionsausbeute von kaffee-extraktion. **Proc. 9 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 113-24, 1980
- MAIER, H.G. & GRIMSEHL, A. Die säuren des kaffee III. Chlorogensäuren im röstkaffee. **Kaffee und Tee Markt** 32 (21): 3-6, 1982
- MARSAIOLI Jr., A. **Desenvolvimento da tecnologia de aplicação de microondas em secador cilíndrico-rotativo combinado com ar quente para produtos granulados**. Campinas, 1991. 197 p. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas
- MELLO, M.R.P.A.; MINAZZI-RODRIGUES, R.S.; CARVALHO, J.B.; SHIROSE, I. Estudo comparativo de métodos de extração para a determinação de cafeína em café. **Rev. Inst. Adolfo Lutz** 52 (1/2): 89-95, 1992
- MELO, M.; FAZUOLI, L.C.; TEIXEIRA, A.A.; AMORIM, H.V. Chemical, physical and organoleptic alterations on storage of coffee beans. **Ciência e Cultura**, São Paulo, 32: 468-71, 1980
- MENCHU, J.F. & IBARRA, E. The chemical composition and the quality of Guatemala coffee. **Proc. 3 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 146-54, 1967
- MENEZES, H.C. The relationship between the state of maturity of raw coffee beans and the isomers of caffeoylquinic acid. **Food Chemistry** 50: 293-96, 1994
- MERRIT, M.C. & PROCTOR, B.E. Effect of temperature during roasting cycle on select components of whole bean coffee. **Food Research** 24: 672-80, 1959

- METAXAS, A.C. & MEREDITH, R.J. **Industrial microwave heating**. IEE Power Engineering, Serie 4, Peter Peregrinus Ltd, London, 1988. 357 p.
- MINOLTA, Co., Ltd. **Precise color communications - color control from feeling to instrumentation**. Japão, IEBAN, 1994. 49 p.
- MÖLLER, B. & HERRMANN, K. Quinic acid esters of hydroxycinnamic acids in stone and pome fruit. **Phytochemistry** 22: 477-81, 1983
- MORISHITA, H. & KIDO, R. Antioxidant activities of chlorogenic acids. **Proc. 16 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, vol.1, pp. 119, 1995
- MUDGETT, R.E. **A physical-chemical basis for prediction of dielectric properties in liquid and solid foods at ultrahigh and microwave frequencies**. Cambridge, Mass., 1974. Ph.D. Thesis - Massachusetts Institute of Technology
- MUDGETT, R.E. Developments in microwave food processing. In: SCHWARTZBERG, H.G. & RAO, M.A.. **Biotechnology and Food Process Engineering**. New York, Marcel Dekker, 1990. pp. 359-404
- MUDGETT, R.E. Electrical properties of foods in microwave processing. **Food Technology** 36 (2): 109-15, 1982
- MUDGETT, R.E. Electrical properties of foods. In: RAO, M.A. & RIZVI, S.S.H. **Engineering Properties of Foods**. New York, Marcel Dekker, Inc., 1986. pp. 329-90

- MUDGETT, R.E. Electrical properties of foods. In: RAO, M.A. & RIZVI, S.S.H. **Engineering Properties of Foods**. New York, Marcel Dekker, Inc., 1995. pp. 389-55
- MUDGETT, R.E. Microwave food processing. **Food Technology** 43: 117-26, 1989
- MUNARI, M.; MASTROCOLA, D.; NICOLI, M.C.; SEVERINI, C. Cinetiche di formazione delle sostanze volatili durante la tostatura del café. **Industrie Alimentari** XXXVI (4): 454-59, 1997
- NAKABAYASHI, T. Changes of organic acids and pH roast of coffee. **J. Jap. Soc. Food Science Tech.** 25: 142-46, 1978
- NAKAYAMA, T. Protective effects of caffeic acid esters against hydrogen peroxide-induced cell damage. **Proc. 16 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, vol.1, pp. 372, 1995
- NAKABAYASHI, T. & KOJIMA, Y. Changes in the quinic acid contents of coffee beans during roasting process. **Nippon Shokuhin kogyo Gakkaishi** 27: 108, 1980
- NAKABAYASHI, T. & MASANO, M. Changes of the trigonelina and caffein contents in coffee beans during the course of roast. **Nippon Shokuhin kogyo Gakkaishi** 33 (10): 725-28, 1986
- NAKABAYASHI, T. & SUZUKI, K. Transformação do tecido dos grãos de café no curso da torração. **Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi** 33 (11): 779-82, 1986

- NAKABAYASHI, T. & YAMADA, K. Formation process of coffee brown pigments during roast. **Nippon Shokuhin kogyo Gakkaishi** 34 (4): 211-15, 1987
- NEHRING, U.P. & MAIER, H.G. Indirect determination of the degree of roast in coffee. **Lebensm. Unters. Forsch.** 195: 39-42, 1992
- NELSON, S.O. A review and assessment of microwave energy for soil treatment to control pests. **Transactions of the ASAE** 39 (1): 281-89, 1996_a
- NELSON, S.O. Dielectric properties of agricultural products measurements and applications. **IEEE Transactions on Electrical Insulation** 26 (5): 845-69, 1991
- NELSON, S.O. Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of high-moisture corn. **Journal of Microwave Power** 13 (2): 213-18, 1978
- NELSON, S.O. Measurements of Microwave Dielectric properties of particulate materials. **Journal of Food Engineering** 21: 365-84, 1994
- NELSON, S.O. & KRASZEWSKI, A.W. Dielectric properties of materials and measurement techniques. **Drying Technology** 8 (5): 1123-42, 1990
- NELSON, S.O. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. **Transactions of the ASAE** 39 (4): 1475-1484, 1996_b

- NELSON, S.O. & YOU, T.S. Microwave dielectric properties of corn and wheat kernels and soybeans. **Transactions of the ASAE** 32 (1): 242-49, 1989
- NDJOUENKEU, R.; CLO,G.; VOILLEY, A. Effect of coffee-brew extraction parameters on the concentration of methylxanthines measured by HPLC. **Sciences des Aliments** 1: 365-75, 1981
- NICHIFORESCO, E. Sur la composition des dérivés caféylquiniques des feuilles d'artichaut (*Cynara scolymus*). **Plantes Médicinales et Phytotherapie** 4: 56-62, 1979
- NICOLI, M.C.; DALLA ROSA, M.; LERICI, C.R.; BONORA, R. Caratteristiche chimiche del caffè. Nota III. Cinetica di invecchiamento ed influenza di alcuni interventi tecnologici sulla stabilità della bevande. **Industrie Alimentari** 28: 706, 1989
- NISHIDA, Y. Inhibition of lipid peroxidation by methylated analogues of uric acid. **J. Pharm. Pharmacol.** 43: 885-87, 1991
- NORTHMORE, J.M. **Raws beans colours and chlorogenic acid**. E.A.A. F.R.O. Specialist Meeting on Coffee Research. Coffee Research Station, Ruiru, Kenya, 1966. 12 p.
- NORTHMORE, J.M. Raw bean colours and the quality of Kenya arabica coffee. **Proc. 3 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 405-14, 1967
- NOTES ÉCONOMIQUES. Première estimation de la production mondiale de café em 1992-1993 and situation caféière au Brésil. **Café Cacao Thé** 36 (3): 230, 1992

- NUNES, R. Os desafios e ações para a competitividade do agribusiness cafeeiro. Programa de Estudos dos Negócios do Sistema Agroindustrial (PRENSA), Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 1999. Publicados no **Jornal do Café** nº 90, fevereiro, 1999
- NYFORS, E. & VAINIKAINEN, P. **Industrial microwave sensors**. Artech House, Norwood, 1989
- OHIOKPEHAI, O. **Chlorogenic acid content of green coffee beans**. PhD Thesis, University of Surrey, 1982
- OHIOKPEHAI, O.; BRUMEN, G.; CLIFFORD, M.N. The chlorogenic acids content of some peculiar green coffee beans and the implications for beverages quality. **Proc. 10 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 177-86, 1982
- OHLSSON, T.; BENGTSSON, N.E.; RISMAN, P.O. The frequencies and temperature dependence of dielectric food data as determined by a cavity perturbation technique. **Journal Microwave Power** 9: 129-45, 1974
- OHLSSON, T. & RISMAN, P.O. Temperature distribution of microwave heating – spheres and cylinders. **Journal of Microwave Power** 13 (4): 303-10, 1978
- ORTOLÁ, M.D.; LONDOÑO, L.; GUTIÉRREZ, C.L.; CHIRALT, A. Influence of roasting temperature on physicochemical properties of different coffees. **Food Science and Technology International** 4 (1): 59-66, 1998

- PEZOA-GARCIA, N.H. **Contribution a l'estude d'un capteur pour controler encontinu le procedè de torrefaction.** Compiègne, 1989. 170p. Thèse (Docteur Genie Enzymatique, Bioconversion, Microbiologique) - Université de Technologie de Compiègne
- PFAFFMANN, C.; BARTOSHUK, L.M.; McBURNEY, D.H. Taste psychophysics. In: **Handbook of Sensory Physiology. IV. Chemical Senses. 2. Taste.** Ed. L.M. Beidler, Springer-Verlag, Berlin, pp. 75-101, 1971
- PICTET, G. & REHACEK, J. Contrôles analytique du degré de torrefaction. **Proc. 10 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee.** ASIC, Paris, pp. 219-34, 1982
- PITTIA, P.; ROSA, M.D.; PINNAVAIA, G.; MASSINI, R. Evoluzione di alcune caratteristiche fisiche del caffè durante la torrefazione. **Industrie Alimentari** XXXV (9): 945-50, 1996
- PIVA, M.; DALLA ROSA, M.; PINI, P.; LERICI, C.R. Processi di trasformazione del caffè: aspetti chimici, fisici e tecnologici. Nota 7: Fenomeni di disidratazione del caffè verde durante la torrefazione. **Industrie delle Bevande** 60: 274-77, 1982
- PIZZIRANI, S.; ROMANI, S.; ANESE, M.; BARBANTI, D. Studio sulle caratteristiche chimiche e chimico-fisiche del caffè torrefatto e della bevanda di estrazione. **Industrie Alimentari** 35 (6): 658-63, 1996
- POMERANZ, Y. & MELOAN, C.E. **Food Analysis: Theory and Practice.** New York, Van Reinhold Nostrand Co., 1987

- PORTO, C.; NICOLI, M.C.; SEVERINI, C.; SENSIDONI, A.; LERICI, C.R. Study on physical and physicochemical changes in coffee beans during roasting. Note 2. Italian Journal of Food Science 3: 197-07, 1991
- POTTER, N.N. & HOTCHKISS, J.H. **Food Science**. Chapman & Hall, New York, 1986. P. 256-59
- PULTINAS, E.P. **Coffee product and process**. Int. Cl⁴. A23F 5/10. United States Patent (US) 4.591.508. 09 apr. 1982, 27 may 1986
- PURDON, M.P. & McCAMEY, D.A. Use of a 5-caffeoylquinic acid/caffeine ratio to monitor the coffee roasting process. **Journal of Food Science** 52 (6): 1680-83, 1987
- RADTKE, R. Das problem der CO₂ - Desorption von röstkaffee unter dem gesichtspunkt einer neuen packstoffentwicklung. **Proc. 7 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**, ASIC, Paris, pp 323-33, 1975
- RAEMY, A. Differential thermal analysis and heat flow calorimetry of coffee and chicory products. **Thermochemica Acta** 43: 229-36, 1981
- RAEMY, A. & LAMBELET, P. A calorimetric study of self-heating in coffee and chicory. **Journal of Food Technology** (UK) 17: 451-60, 1982
- REES, D.I. & THEAKER, P.D. HPLC of chlorogenic acid isomers in coffee. **Proc. 8 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 79-84, 1977
- RIEDEL, L. Calorimetric measurements on the system coffee extract / water. **Chemie, Mikrobiologie, Technologie der Lebensmittel** 3: 108-12, 1974

- RIZVI, S.J.H.; JAISWAL, V.; MUKERJI, D.; MATHER, S.N. Antifungal properties of 1,3,7 trimethylxanthine isolated from *Coffea arabica*. **Naturwissenschaften** 67: 459, 1980
- RIZVI, S.J.H.; MUKERJI, D.; MATHER, S.N. Selective phytotoxicity of 1,3,7 trimethylxanthine between *Phaseolus mungo* and some weeds. **Agric. Biol. Chem.** 45: 1255, 1981
- RIZVI, S.J.H.; PANDLEY, S.K.; MUKERJI, D.; MATHER, S.N. 1,3,7 trimethylxanthine a new chemosterilant for stored grain pest, *Callosobruchus chinensis* (L). **Z. Angew. Entomol.** 90: 378, 1980_b
- ROEBUCK, B.D.; GOLDBLITH, S.A.; WESTPHAL, W.B.J. Dielectric properties of carbohydrate water mixtures at microwave frequencies. **Journal of Food Science** 37 (2): 199-204, 1972
- ROFFI, J.; SANTOS, A.C.; MEXIA, J.T.; BUSSON, F.; MAIGROT, M. Cafés verts et torréties de l'Angola. Etude chimique. **Proc. 5 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 179-00, 1971
- ROTHFOS, J.B. & OESTREICH-JANZEN, S.H. Color measurements in coffee and coffee brew. **Proc. 14 th International Scientific Colloquium on Coffee**. Paris, ASIC, pp. 277-85, 1991
- RUBACH, K. **Beitrag zur anatylik der hydroxyzimtsäureester des kaffees**. Dissertation, Techn. Univ. Berlin, 1969
- RUBACH, K. & KIRCHHOFF, E. Comparative investigation of conventional and short time roasted coffee. **Kaffee Tee Markt** 34 (4): 3-6, 1984

- RYYNÄNEN, S. The electromagnetic properties of food materials: a review of the basic principles. **Journal of Food Engineering** 26:409-29, 1995
- SANTANILLA, J.D.; FRITSCH, G.; MÜLLER-WARMUTH, W. Electron spin resonance experiments on raw and roast coffee samples. **Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und Forschung** 172: 81-6, 1981
- SANTANILLA, J.D.; FRITSCH, G.; MÜELLER-WARMUTH, W. NMR investigation of the internal movement of binding of water in green and roasted coffee beans. **Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und Forschung** 172: 173-7, 1981
- SCHARDT, D. & SCHMIDT, S. Caffeine: The Inside Scoop. Washington, D.C., Center for Science in the Public Interest. **Nutrition Action Health Letter** 23 (10): december, 1996
- SCHIFFMANN, R.F. Microwave and dielectric drying. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. New York, Marcel Dekker, Inc., 1987. p. 327-56
- SCHIFFMANN, R.F. Microwave and dielectric drying. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. Marcel Dekker, New York, 1995. p. 345-72
- SEVERINI, C.; NICOLI, M.C.; MASTROCOLA, D.; LERICI, C.R. Influence of heating rate on some physical and physico-chemical properties of coffee beans during the roasting process. **Proc. 14 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp 641-7, 1991

- SHUKLA, T.P. Hydrocolloids for microwavable food formulations. **MW Food's 89, 2nd Int. Conf. on Formulating Foods for the microwave Oven.** Milltown, NJ, The Packaging Group, Inc., 1989. march 14-15
- SIVETZ, M. How acidity affects coffee flavour. **Food Technology**, Champaign 26: 70-7, 1972
- SIVETZ, M. & DESROSIER, N.W. **Coffee Technology.** The AVI Publishing Company, Inc., Westport, Connecticut, 1979
- SMALL, L.E. & HORRELL, R.S. High yield coffee technology. **Proc. 15th International Colloquium on the Chemistry of Coffee.** ASIC, Paris,. pp. 719-26, 1993
- SMIT, J. **Microondas.** Érica Ed. Ltda., 1987. 135p.
- SONDHEIMER, E.; COVITZ, F.; MARQUISEE, M.J. Association of naturally occurring compounds, the chlorogenic acid-caffeine complex. **Arch. Biochem. Biophys.** 93: 63, 1961
- SPILLER, G.A. **Caffeine.** CRC Press LLC, U.S.A., 1998. 374 p.
- STADLER, R.H. & FAY, L.B. Antioxidative reactions of caffeine: formation of 8-oxocaffeine (1,3,7 trimethyluric acid) in coffee subjected to oxidative stress. **J. Agric. Food Chem.** 43 (5): 1332-38, 1995
- STADLER, R.H. & WELTI, D.H.; STÄMPFLI, A.A.; FAY, L.B. Thermal decomposition of caffeic acid in models systems: identification of novel tetraoxygenated phenylindan isomers and their stability in aqueous solution. **J. Agric. Food Chem.** 44 (3): 898-05, 1996

- STENNERT, A. & MAIER, G.H. Trigonelline in coffee. II. Content of green, roasted and instant coffee. **Z. Lebensm. Unters. Forsch** 199: 198-200, 1994
- SULISTYOWATI; SUMARTONO, B.; ISMAYADI, C. The influence of bean size and roasting duration on some physico-chemicals and organoleptic characteristic of robusta coffee. **Pelita Perkebunan** 12 (1): 48-60, 1996
- TARKA, S.M.Jr. The toxicology of cocoa and methylxantines: A review of the literature. **CRC Crit. Rev. Toxicol.** 9: 275, 1982
- TARKA, S.M.Jr. & HURST, W.J. **Introduction to the chemistry, isolation, and biosynthesis of methylxanthines**. In: Caffeine. SPILLER, G.A. CRC PRESS LLC, 1998. 374 p.
- THAKKAR, A.L. Self association of caffeine in aqueous solution: IH nuclear magnetic resonance study. **J. Chem. Soc. Chem. Commun.** 9: 524, 1970
- THALER, H. Studies of coffees and coffee substitutes XIV. Polysaccharides of the raw beans of *Coffea canephora var. robusta*. **Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und Forschung** 143: 342-8, 1970
- THALER, H. & ARNETH, W. Untersuchungen an kaffee und kaffee-ersatz. XI. Polysaccharide der grünen bohren von *Coffea arabica*. **Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und Forschung** 138: 26-35, 1968
- TOLEDO, R.T. **Fundamentals of Food Process Engineering**. Maryland, Gaithersburg, Aspen Publication, 1999
- TRESSL, R.; BAHRI, D.; KÖPPLER, H.; JENSEN, A. Diphenols and caramel compounds in roasted coffees of different varieties, II. **Z. Lebensm. Unters. Forsch.** 167: 111, 1978

- TRESSL, R.; GRÜNEWALD, K.G.; KAMPERSCHROER, H.; SILWAR, R.
Behaviour of some minor volatile aroma components during coffee staling.
Chemie Mikrobiologie Technologie der Lebensmittel 6 (2): 52-7, 1979
- TRESSL, R.; KOSSA, T.; RENNER, R.; KÖPPLER, H. Gas chromatographic-mass spectrometric investigations on the formation of phenolic and aromatic hydrocarbons in food. **Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und Forschung** 162: 123-30, 1976
- TRUGO, L.C. & MACRAE, R. Application of high performance liquid chromatography to the analysis of some nonvolatile coffee components. **Arch Latinoamericanos Nutricion** 39: 96-07, 1989
- TRUGO, L.C. & MACRAE, R. A study of the effect of roasting on the chlorogenic acid composition of coffee using HPLC. **Food Chemistry** 15: 219-27, 1984
- TRUGO, L.C. & MACRAE, R.; DICK, J. Determination of purine alkaloids and trigonelline in instant coffee and other beverages using high performance liquid chromatography. **J. Sci. Food Agric.** 34: 300-6, 1983
- TS'O, P.O.P.; MELVIN, I.S.; OLSON, A.C. Interaction and association of bases and nucleosides in aqueous solution. **J. Chem. Soc.** 85: 1289, 1963
- TSUJI, A.; OKA, S.; SANO, Y.; MATSUSHITA, R.; TAKADA, J.; SAKURAI, H.
Superoxide scavenging activity and metal contents of coffee. **Biomed. Res. Trace Elem.** 6 (2): 101, 1995
- TSUJI, S.; SHIBATA, T.; OHARA, K. Studies on the factors affecting the formation of hydrogen peroxide in coffee. **Nippon Shokuhin kogyo Gakkaishi** 32 (6): 504-12, 1991

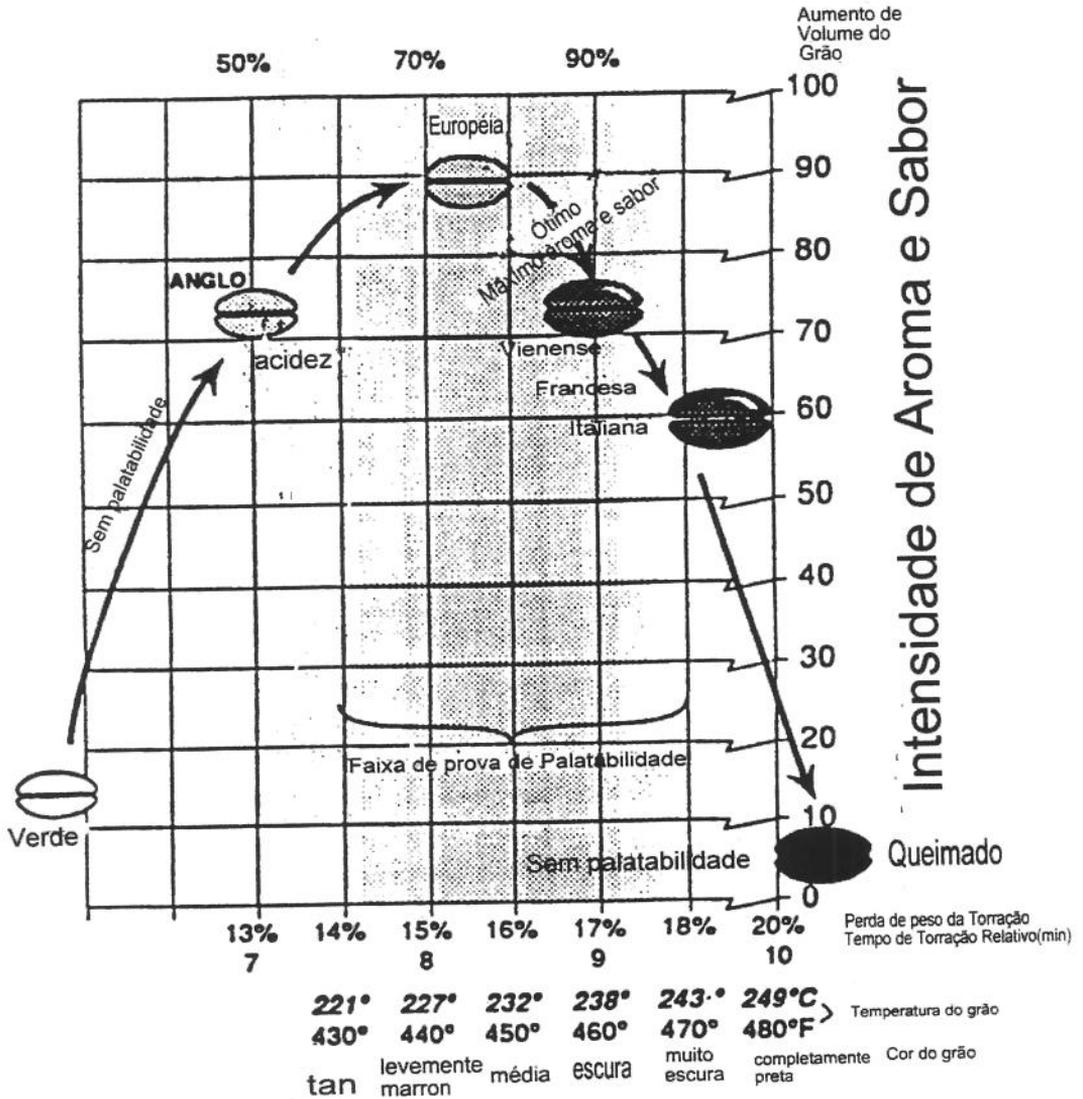
- TU, A.T. & REINOSA, J.A. The interaction of silver ion with guanosine, guanosine monophosphate and related compounds: Determination of possible sites of complexing. **Biochemistry** 5: 3375, 1966
- VAN der STEGEN, G.H.D. & VAN DUJIN, J. Analysis of chlorogenic acids in coffee. **Proc. 9 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 107-12, 1980
- VAN REMMEN, H.H.J.; PONNE, C.T.; NIJHUIS, H.H.; BARTELS, P.V.; KERKHOF, P.J.A.M. Microwave heating distributions in slabs, spheres and cylinders with relation to food processing. **Journal Food Science** 61 (6): 1105-13, 1996
- VIANI, R. Physiological active substances in coffee. In: CLARKE, R.J. & MACRAE, R. **Coffee: Physiology**. Volume 3. London, Elsevier Applied Science, 1988. p. 1 - 25
- VINCENT, J.C.; ARONJA, J.L.; RIOS, G.; GILBERT, H.; ROCHE, G. Roasting of coffee in a fluidized bed. **Proc. 8 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp 217-26, 1977
- VINCENT, J.C.; GUERNOT, M.C.; PERRIOT, J.J.; HAHN, J.; GUEULE, D. Influence de différents traitements technologiques sur les caractéristiques chimiques et organoleptiques des cafés robusta et arabusta. **Proc. 8 th International Colloquium on the Chemistry of Coffee**. ASIC, Paris, pp. 271-84, 1977
- VITZTHUM, O.G. Chemie und bearbeitung des kaffees. In: EICHLER, O. **Kaffee und Coffeine**. Heidelberg, Springer-Verlag, 1976

- VON HIPPEL, A. R. **Dielectric and Waves**. New York, The Technology Press of M.I.T. and John Wiley & Sons, 1954
- WILHELM, R.K. & WILFRIED, S. TCHIBO FRISCH - RÖST - KAFEE GmbH. **Verfahren zum kühlen und befeuchten von gerösteten kaffeebohnen oder ähnlichen grobteiligen röstprodukten sowie hierfür geeignete vorrichtung**. Int. Cl.⁵. A23F 5/04. Deutsches Patentamt (DE) 40.28.111 A1. 5.09.90; 12.03.92
- WINDHOLZ, M.; BUNDAVARI, S.; STROUMTSOS, L.; FERTIG, M. **The Merck Index**. 9 th ed., Rahway, Merck & Co., 1976
- WOLFROM, M.L.; LAVER, M.L.; PATIN, D.L. Carbohydrates of the coffee bean. II. Isolation and characterisation of mannan. **Journal of Organic Chemistry** 26: 4533-5, 1961
- WOLMAN, W. Instant and decaffeinated coffee. **JAMA** 159: 250, 1955
- WURZIGER, J. Coffee oil and the quality of roasted coffee. **Fette Seifen Anstrich**. 87: 82, 1985
- YESAIR, D.W.; BRANFMAN, A.R.; CALLAHAN, M.M. Human disposition and some biochemical aspects of methylxanthines. In: SPILLER, G.A & LISS, A. R. **The methylxanthine beverages and foods: chemistry, consumption, and health effects**. New York, 1984. p. 215-35
- ZENG, H.; LI, J.; FENG, Y.; GUI, Y. Food antioxidant and caffeine extracted from useless coffee beans. **Huanan Ligong Daxue Xuebao Ziran Kexueban** 21 (2): 31, 1993

APÊNDICE A

Gráfico simplificado por Sivetz, 1991

Compreendendo a Torração dos Grãos de Café Grau de Torração vs Intensidade de Aroma e Desenvolvimento de Sabor



Grau de Torração

APÊNDICE B

EFEITO DO TEMPO DE TORRAÇÃO NOS PROCESSOS DOMÉSTICO A 210°C E 220°C EM RELAÇÃO AS DIFERENTES QUALIDADES DE CAFÉ

| | D210 | D220 |
|------------------------|-------------|-------------|
| Café Duro para Melhor | 10:34 | 11:19 |
| Café Mole | 10:33 | 11:00 |
| Café Estritamente Mole | 10:39 | 11:08 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variação |
|------------------------|-----------------|-------------|--------------|-----------------|
| Café Duro para Melhor | 2 | 0,9118 | 0,4559 | 0,00049 |
| Café Mole | 2 | 0,8979 | 0,4490 | 0,00018 |
| Café Estritamente Mole | 2 | 0,9076 | 0,4538 | 0,00020 |
| D210 | 3 | 1,3236 | 0,4412 | 0,00000 |
| D220 | 3 | 1,3938 | 0,4646 | 0,00004 |

| ANOVA | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|--------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| | Qualidade do Café | 5,080E-05 | 2 | 2,5E-05 | 1,0822 | 0,4803 | 19,0000 |
| | Torração D210 e D220 | 8,199E-04 | 1 | 8,2E-04 | 34,9349 | 0,0275 | 18,5128 |
| | Erro | 4,694E-05 | 2 | 2,3E-05 | | | |
| | Total | 9,176E-04 | 5 | | | | |

APÊNDICE C

EFEITO DA PERDA DE PESO (%) SOBRE A TORRAÇÃO CONVENCIONAL DOMÉSTICA E A QUALIDADE DO CAFÉ

| | D210 | D220 |
|-----------------------|-------------|-------------|
| Café Duro para Melhor | 12,44 | 15,53 |
| Café Mole | 13,19 | 16,24 |
| Café ETM | 13,41 | 17,51 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | | | | |
|-----------------------|----------|--------------|--------------|---------------|
| | Contagem | Soma | Média | Variância |
| Café Duro para Melhor | 2 | 27,97 | 13,98 | 4,7586 |
| Café Mole | 2 | 29,42 | 14,71 | 4,6512 |
| Café ETM | 2 | 30,92 | 15,46 | 8,3845 |
| D210 | 3 | 39,04 | 13,01 | 0,2578 |
| L220 | 3 | 49,27 | 16,42 | 1,0062 |

| ANOVA | | | | | | |
|--------------------|----------------|----------|---------|---------|---------|-----------|
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Qualidade do Café | 2,1758 | 2 | 1,0879 | 6,1772 | 0,1393 | 19,0000 |
| Torração Doméstica | 17,4422 | 1 | 17,4422 | 99,0398 | 0,0099 | 18,5128 |
| Erro | 0,3522 | 2 | 0,1761 | | | |
| Total | 19,9701 | 5 | | | | |

APÊNDICE D

NO PROCESSO DE TORRAÇÃO CONVENCIONAL RÁPIDO O EFEITO DO TEMPO PARA ATINGIR A TEMPERATURA DESEJADA E A QUALIDADE DO CAFÉ

| | minutos | |
|-----------------------|---------|------|
| | R210 | R220 |
| Café Duro para Melhor | 4,56 | 4,31 |
| Café Mole | 4,46 | 5,25 |
| Café ETM | 4,49 | 4,49 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variancia |
|-----------------------|----------|-------|--------|-----------|
| Café Duro para Melhor | 2 | 8,87 | 4,4350 | 0,0313 |
| Café Mole | 2 | 9,71 | 4,8550 | 0,3120 |
| Café ETM | 2 | 8,98 | 4,4900 | 0,0000 |
| R210 | 3 | 13,51 | 4,5033 | 0,0026 |
| R220 | 3 | 14,05 | 4,6833 | 0,2489 |

| ANOVA | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-------------------|--------|----|--------|--------|---------|-----------|
| Fonte da variação | | | | | | |
| Qualidade do Café | 0,2084 | 2 | 0,1042 | 0,7073 | 0,5857 | 19,0000 |
| Torração Rápida | 0,0486 | 1 | 0,0486 | 0,3298 | 0,6237 | 18,5128 |
| Erro | 0,2947 | 2 | 0,1474 | | | |
| Total | 0,5517 | 5 | | | | |

APÊNDICE E

EFEITO DA PERDA DE PESO (%) SOBRE A TORRAÇÃO CONVENCIONAL RÁPIDA E A QUALIDADE DO CAFÉ

| | R210 | R220 |
|-----------------------|-------|-------|
| Café Duro para Melhor | 15,22 | 16,18 |
| Café Mole | 15,36 | 17,47 |
| Café ETM | 15,56 | 17,69 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variância |
|-----------------------|----------|-------|-------|-----------|
| Café Duro para Melhor | 2 | 31,4 | 15,7 | 0,4608 |
| Café Mole | 2 | 32,83 | 16,42 | 2,2260 |
| Café ETM | 2 | 33,25 | 16,62 | 2,2578 |
| R210 | 3 | 46,14 | 15,38 | 0,0292 |
| R220 | 3 | 51,34 | 17,11 | 0,6626 |

| ANOVA | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-------------------|------|----|--------|---------|---------|-----------|
| Fonte da variação | | | | | | |
| Qualidade do Café | 0,94 | 2 | 0,4684 | 2,0975 | 0,3228 | 19,0000 |
| Torração Rápida | 4,50 | 1 | 4,4980 | 20,1407 | 0,0462 | 18,5128 |
| Erro | 0,45 | 2 | 0,2233 | | | |
| Total | 5,88 | 5 | | | | |

APÊNDICE F

EFEITO DA PERDA DE PESO (%) SOBRE OS DIFERENTES TIPOS DE TORRAÇÃO CONVENCIONAL E A QUALIDADE DO CAFÉ

| | D210 | D220 | R210 | R220 |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Café Duro para Melhor | 12,44 | 15,53 | 15,22 | 16,18 |
| Café Mole | 13,19 | 16,24 | 15,36 | 17,47 |
| Café ETM | 13,41 | 17,51 | 15,56 | 17,69 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Confagem | Soma | Média | Variância |
|------------------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| Café Duro para Melhor | 4 | 59,37 | 14,84 | 2,7231 |
| Café Mole | 4 | 62,25 | 15,56 | 3,2614 |
| Café ETM | 4 | 64,16 | 16,04 | 3,9999 |
| D210 | 3 | 39,04 | 13,01 | 0,2578 |
| D220 | 3 | 49,27 | 16,42 | 1,0062 |
| R210 | 3 | 46,14 | 15,38 | 0,0292 |
| R220 | 3 | 51,34 | 17,11 | 0,6626 |

| ANOVA | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|--------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|------------------|
| | Qualidade do Café | 2,9136 | 2 | 1,4568 | 8,7593 | 0,0166 | 5,1432 |
| | Torração Convencional | 28,9552 | 3 | 9,6517 | 58,0330 | 0,0001 | 4,7571 |
| | Erro | 0,9979 | 6 | 0,1663 | | | |
| | Total | 32,8667 | 11 | | | | |

APÊNDICE G

NO PROCESSO DE TORRAÇÃO POR MICROONDAS O EFEITO DA POTÊNCIA NA TEMPERATURA/TEMPO DE TORRAÇÃO E NA QUALIDADE DO CAFÉ

Café Duro para Melhor

| | 3500W | | 3700W | | 3850W | |
|--|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| | T°C | minutos | T°C | minutos | T°C | minutos |
| | 87 | 3,00 | 100 | 2,00 | 120 | 3,00 |
| | 103 | 4,00 | 126 | 4,00 | 126 | 4,00 |
| | 110 | 5,00 | 128 | 5,20 | 128 | 5,00 |
| | 113 | 8,00 | 133 | 6,50 | 133 | 6,00 |
| | 120 | 9,00 | 135 | 9,50 | 135 | 8,00 |
| | 127 | 10,00 | 136 | 11,00 | 136 | 10,00 |
| | 129 | 12,00 | 137 | 12,00 | 139 | 12,00 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variancia |
|--------|----------|-------|--------|-----------|
| 103 | 5 | 264 | 52,8 | 4465,2 |
| 110 | 5 | 271,2 | 54,24 | 4533,79 |
| 113 | 5 | 286,5 | 57,3 | 4775,95 |
| 120 | 5 | 296,5 | 59,3 | 4775,7 |
| 127 | 5 | 303 | 60,6 | 4737,8 |
| 129 | 5 | 312 | 62,4 | 4763,3 |
| 3 | 6 | 48 | 8 | 9,2 |
| 100 | 6 | 795 | 132,5 | 20,3 |
| 2 | 6 | 48,2 | 8,03 | 10,667 |
| 120 | 6 | 797 | 132,83 | 24,567 |
| 3 | 6 | 45 | 7,5 | 9,5 |

ANOVA

| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-------------------|----------|----|----------|---------|----------|-----------|
| Temperatura/Tempo | 345,8467 | 5 | 69,16933 | 54,64 | 5,62E-11 | 2,7109 |
| Potência de MO | 112181,6 | 4 | 28045,41 | 22152,8 | 3,76E-36 | 2,8661 |
| Erro | 25,32 | 20 | 1,266 | | | |
| Total | 112552,8 | 29 | | | | |

APÊNDICE H

NO PROCESSO DE TORRAÇÃO POR MICROONDAS O EFEITO DA POTÊNCIA NA TEMPERATURA/TEMPO DE TORRAÇÃO E NA QUALIDADE DO CAFÉ

Café Mole

| | 3500W | | 3700W | | 3850W | |
|--|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| | T°C | minutos | T°C | minutos | T°C | minutos |
| | 94 | 1,00 | 83 | 1,00 | 104 | 3,40 |
| | 98 | 3,00 | 99 | 3,30 | 123 | 4,00 |
| | 111 | 5,00 | 122 | 5,00 | 134 | 5,00 |
| | 116 | 6,00 | 130 | 6,00 | 135 | 6,00 |
| | 124 | 8,00 | 133 | 8,00 | 136 | 8,00 |
| | 125 | 10,00 | 136 | 10,15 | 137 | 10,00 |
| | 127 | 12,00 | 139 | 12,00 | 139 | 12,00 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variação |
|----------|----------|--------|--------|----------|
| Linha 1 | 6 | 286,4 | 47,733 | 2576,75 |
| Linha 2 | 6 | 330,3 | 55,05 | 3277,38 |
| Linha 3 | 6 | 382 | 63,667 | 4183,07 |
| Linha 4 | 6 | 399 | 66,5 | 4431,10 |
| Linha 5 | 6 | 417 | 69,5 | 4554,30 |
| Linha 6 | 6 | 428,15 | 71,358 | 4528,19 |
| Linha 7 | 6 | 441 | 73,5 | 4557,90 |
| Coluna 1 | 7 | 795 | 113,57 | 176,29 |
| Coluna 2 | 7 | 45 | 6,43 | 14,95 |
| Coluna 3 | 7 | 842 | 120,29 | 449,90 |
| Coluna 4 | 7 | 45,45 | 6,49 | 14,80 |
| Coluna 5 | 7 | 908 | 129,71 | 155,24 |
| Coluna 6 | 7 | 48,4 | 6,91 | 10,32 |

ANOVA

| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-------------------|----------|----|----------|----------|----------|-----------|
| Temperatura/Tempo | 3153,869 | 6 | 525,6448 | 8,8834 | 1,33E-05 | 2,4205 |
| Potência de MO | 138768,3 | 5 | 27753,65 | 469,0394 | 1,61E-27 | 2,5336 |
| Erro | 1775,138 | 30 | 59,17126 | | | |
| Total | 143697,3 | 41 | | | | |

APÊNDICE I

EFEITO DA PERDA DE PESO (%) NO PROCESSO DE TORRAÇÃO POR MICROONDAS A DIFERENTES POTÊNCIAS E QUALIDADE DO CAFÉ

| | 3500W | 3700W | 3850W |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| Café Duro para Melhor | 16,22 | 18,81 | 23,08 |
| Café Mole | 17,65 | 19,70 | 21,21 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variância |
|--------|----------|-------|--------|-----------|
| Duro | 3 | 58,11 | 19,37 | 12,00 |
| Mole | 3 | 58,56 | 19,52 | 3,19 |
| 3500W | 2 | 33,87 | 16,935 | 1,02 |
| 3700W | 2 | 38,51 | 19,255 | 0,40 |
| 3850W | 2 | 44,29 | 22,145 | 1,75 |

| ANOVA | | | | | | |
|-------------------|----------|----|---------|--------|----------|-----------|
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Qualidade do Café | 0,03375 | 1 | 0,03375 | 0,0215 | 0,896768 | 18,5128 |
| Potência de MO | 27,2524 | 2 | 13,6262 | 8,6979 | 0,103115 | 19,0000 |
| Erro | 3,1332 | 2 | 1,5666 | | | |
| Total | 30,41935 | 5 | | | | |

APÊNDICE J

EFEITO DA PERDA DE PESO (%) SOBRE OS DIFERENTES TIPOS DE TORRAÇÃO CONVENCIONAL E MICROONDAS E A QUALIDADE DO CAFÉ

| | D210 | D220 | R210 | R220 | MO3500 | MO3700 | MO3850 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Café Duro para Melhor | 12,44 | 15,53 | 15,22 | 16,18 | 16,22 | 18,81 | 23,08 |
| Café Mole | 13,19 | 16,24 | 15,36 | 17,47 | 17,65 | 19,70 | 21,21 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variancia |
|-----------------------|----------|--------|---------|-----------|
| Café Duro para Melhor | 7 | 117,48 | 16,7821 | 11,2214 |
| Café Mole | 7 | 120,81 | 17,2586 | 7,1698 |
| D210 | 2 | 25,625 | 12,8125 | 0,2775 |
| D220 | 2 | 31,76 | 15,8800 | 0,2521 |
| R210 | 2 | 30,58 | 15,2900 | 0,0098 |
| R220 | 2 | 33,65 | 16,8250 | 0,8320 |
| MO3500 | 2 | 33,87 | 16,9350 | 1,0224 |
| MO3700 | 2 | 38,51 | 19,2550 | 0,3960 |
| MO3850 | 2 | 44,29 | 22,1450 | 1,7485 |

| ANOVA | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-------|----------------------------|----------|----|---------|---------|---------|------------|
| | Qualidade do Café | 0,7944 | 1 | 0,7944 | 1,2732 | 0,3023 | 5,98737415 |
| | Torração Convencional e MO | 106,6033 | 6 | 17,7672 | 28,4737 | 0,0004 | 4,28386215 |
| | Erro | 3,7439 | 6 | 0,6240 | | | |
| | Total | 111,1417 | 13 | | | | |

APÊNDICE K

EFEITO DO pH SOBRE OS DIFERENTES TIPOS DE TORRAÇÃO E QUALIDADE DO CAFÉ

| | D 210 | D220 | R210 | R220 | MO3500W | MO3700W | MO3850W |
|-----------------------|-----------|----------|-----------------|----------|-----------|-------------|----------|
| Café Duro para Melhor | 5,47 | 5,79 | 5,75 | 5,81 | 5,62 | 5,74 | 6,03 |
| Café Mole | 5,54 | 5,88 | 5,92 | 6,16 | 5,65 | 5,70 | 5,92 |
| Análise Sensorial | Café Duro | Queimado | Duro e Queimado | Queimado | Café Mole | Mole e Duro | Queimado |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variância |
|-----------------------|----------|-------|-------------|-------------|
| Café Duro para Melhor | 7 | 40,21 | 5,744285714 | 0,029795238 |
| Café Mole | 7 | 40,77 | 5,824285714 | 0,043461905 |
| D210 | 2 | 11,01 | 5,505 | 0,00245 |
| D220 | 2 | 11,67 | 5,835 | 0,00405 |
| R210 | 2 | 11,67 | 5,835 | 0,01445 |
| R220 | 2 | 11,97 | 5,985 | 0,06125 |
| MO3500W | 2 | 11,27 | 5,635 | 0,00045 |
| MO3700W | 2 | 11,44 | 5,72 | 0,0008 |
| MO3850W | 2 | 11,95 | 5,975 | 0,00605 |

| ANOVA | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|----------------------------|-------------------|----|-------------|--------|--------|---------|-----------|
| Qualidade do Café | 0,0224 | 1 | 0,0224 | 2,0030 | 0,2067 | 5,9874 | |
| Torração Convencional e MO | 0,37244286 | 6 | 0,06207381 | 5,5506 | 0,0279 | 4,2839 | |
| Erro | 0,0671 | 6 | 0,011183333 | | | | |
| Total | 0,46194286 | 13 | | | | | |

APÊNDICE L

EFEITO DO pH SOBRE OS DIFERENTES TIPOS DE TORRAÇÃO E QUALIDADE DO CAFÉ

| | D210 | D220 | R210 | R220 |
|-----------------------|-----------|----------|-----------------|----------|
| Café Duro para Melhor | 5,47 | 5,79 | 5,75 | 5,81 |
| Café Mole | 5,54 | 5,88 | 5,92 | 6,16 |
| Análise Sensorial | Café Duro | Queimado | Duro e Queimado | Queimado |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variância |
|-----------------------|----------|-------|-------|-------------|
| Café Duro para Melhor | 4 | 22,82 | 5,705 | 0,025166667 |
| Café Mole | 4 | 23,5 | 5,875 | 0,065166667 |
| Café ETM | 2 | 11,01 | 5,505 | 0,00245 |
| | 2 | 11,67 | 5,835 | 0,00405 |
| D210 | 2 | 11,67 | 5,835 | 0,01445 |
| D220 | 2 | 11,97 | 5,985 | 0,06125 |

| ANOVA | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-----------------------|--------|----|-------------|---------|-------------|-----------|
| Fonte da variação | | | | | | |
| Qualidade do Café | 0,0578 | 1 | 0,0578 | 7,1066 | 0,075961015 | 10,1280 |
| Torração Convencional | 0,2466 | 3 | 0,0822 | 10,1066 | 0,044605309 | 9,2766 |
| Erro | 0,0244 | 3 | 0,008133333 | | | |
| Total | 0,3288 | 7 | | | | |

APÊNDICE M

EFEITO DA CONCENTRAÇÃO IÔNICA (mV) SOBRE OS DIFERENTES TIPOS DE TORRAÇÃO E QUALIDADE DO CAFÉ

| | L210 | L220 | R210 | R220 |
|-----------------------|-----------|----------|-----------------|----------|
| Café Duro para Melhor | 96,08 | 78,35 | 78,75 | 74,05 |
| Café Mole | 90,51 | 69,09 | 70,91 | 53,20 |
| Café ETM | 91,49 | 56,18 | 74,53 | 53,59 |
| Análise Sensorial | Café Duro | Queimado | Duro e Queimado | Queimado |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variação |
|-----------------------|----------|--------|-------------|-------------|
| Café Duro para Melhor | 4 | 327,23 | 81,8075 | 95,06189167 |
| Café Mole | 4 | 283,71 | 70,9275 | 233,7050917 |
| Café ETM | 4 | 275,79 | 68,9475 | 312,7301583 |
| D210 | 3 | 278,08 | 92,69333333 | 8,842233333 |
| D220 | 3 | 203,62 | 67,87333333 | 123,9874333 |
| R210 | 3 | 224,19 | 74,73 | 15,3964 |
| R220 | 3 | 180,84 | 60,28 | 142,2477 |

| ANOVA | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-----------------------|-------------------|------------|----|-------------|---------|-------------|-----------|
| Qualidade do Café | | 383,565867 | 2 | 191,7829333 | 5,8298 | 0,039220191 | 5,1432 |
| Torração Convencional | | 1727,10976 | 3 | 575,7032528 | 17,5002 | 0,00226733 | 4,7571 |
| Erro | | 197,381667 | 6 | 32,89694444 | | | |
| Total | | 2308,05729 | 11 | | | | |

APÊNDICE N

EFEITO DA CONCENTRAÇÃO IÔNICA (mV) SOBRE OS DIFERENTES TIPOS DE TORRAÇÃO E QUALIDADE DO CAFÉ

| | D210 | D220 | R210 | R220 | MO3500W | MO3700W | MO3850W |
|-----------------------|-----------|----------|-----------------|----------|-----------|-------------|----------|
| Café Duro para Melhor | 96,08 | 78,35 | 78,75 | 74,05 | 86,60 | 78,20 | 60,95 |
| Café Mole | 90,51 | 69,09 | 70,91 | 53,20 | 83,90 | 80,60 | 67,50 |
| Análise Sensorial | Café Duro | Queimado | Duro e Queimado | Queimado | Café Mole | Mole e Duro | Queimado |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variância |
|-----------------------|----------|--------|-------------|-------------|
| Café Duro para Melhor | 7 | 552,98 | 78,99714286 | 116,8193905 |
| Café Mole | 7 | 515,71 | 73,67285714 | 153,6578571 |
| D210 | 2 | 186,59 | 93,295 | 15,51245 |
| D220 | 2 | 147,44 | 73,72 | 42,8738 |
| R210 | 2 | 149,66 | 74,83 | 30,7328 |
| R220 | 2 | 127,25 | 63,625 | 217,36125 |
| MO3500W | 2 | 170,5 | 85,25 | 3,645 |
| MO3700W | 2 | 158,8 | 79,4 | 2,88 |
| MO3850W | 2 | 128,45 | 64,225 | 21,45125 |

| ANOVA | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|----------------------------|------------|----|-------------|--------|---------|-----------|
| Fonte da variação | 99,2180643 | 1 | 99,21806429 | 2,5307 | 0,1628 | 5,9874 |
| Qualidade do Café | 1387,625 | 6 | 231,2708333 | 5,8988 | 0,0242 | 4,2839 |
| Torração Convencional e MO | 235,238486 | 6 | 39,20641429 | | | |
| Erro | | | | | | |
| Total | 1722,08155 | 13 | | | | |

APÊNDICE O

EFEITO SOBRE A CAFEÍNA NOS DIFERENTES TIPOS DE TORRAÇÃO CONVENCIONAL E NA QUALIDADE DO CAFÉ

| | g/100 g café | | | |
|-----------------------|--------------|--------|--------|--------|
| | D210 | D220 | R210 | R220 |
| Café Duro para Melhor | 1,0647 | 0,8710 | 1,2524 | 0,8506 |
| Café Mole | 2,0335 | 1,0541 | 1,8611 | 0,5766 |
| Café ETM | 1,8972 | 0,6681 | 1,3897 | 0,6769 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variância |
|-----------------------|----------|--------|--------|-----------|
| Café Duro para Melhor | 4 | 4,0387 | 1,0097 | 0,0355 |
| Café Mole | 4 | 5,5253 | 1,3813 | 0,4701 |
| Café ETM | 4 | 4,6319 | 1,1580 | 0,3572 |
| D210 | 3 | 4,9954 | 1,6651 | 0,2750 |
| D220 | 3 | 2,5932 | 0,8644 | 0,0373 |
| R210 | 3 | 4,5032 | 1,5011 | 0,1019 |
| R220 | 3 | 2,1041 | 0,7014 | 0,0192 |

| ANOVA | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-----------------------|--------|----|--------|--------|---------|-----------|
| Fonte da variação | | | | | | |
| Qualidade do Café | 0,2800 | 2 | 0,1400 | 1,4312 | 0,3103 | 5,1432 |
| Torração Convencional | 2,0013 | 3 | 0,6671 | 6,8195 | 0,0232 | 4,7571 |
| Erro | 0,5869 | 6 | 0,0978 | | | |
| Total | 2,8682 | 11 | | | | |

APÊNDICE P

EFEITO SOBRE A CAFEÍNA NOS DIFERENTES TIPOS DE TORRAÇÃO CONVENCIONAL E MICROONDAS EM RELAÇÃO A QUALIDADE DO CAFÉ

| | D210 | D220 | R210 | R220 | MO3500 | MO3700 | MO3850 |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| Duro | 1,0647 | 0,8710 | 1,2524 | 0,8506 | 1,0171 | 1,0844 | 1,1003 |
| Mole | 2,0335 | 1,0541 | 1,8611 | 0,5766 | 2,579 | 2,5458 | 2,5044 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança
g/100 g café

| RESUMO | | | | | | | |
|-----------------------|----------|---------|--------|-----------|--|--|--|
| | Contagem | Soma | Média | Variancia | | | |
| Café Duro para Melhor | 7 | 7,2405 | 1,034 | 0,0193 | | | |
| Café Mole | 7 | 13,1545 | 1,879 | 0,6211 | | | |
| D210 | 2 | 3,0982 | 1,5491 | 0,4693 | | | |
| D220 | 2 | 1,9251 | 0,9626 | 0,0168 | | | |
| R210 | 2 | 3,1135 | 1,5568 | 0,1853 | | | |
| R220 | 2 | 1,4272 | 0,7136 | 0,0375 | | | |
| MO3500 | 2 | 3,5961 | 1,7981 | 1,2198 | | | |
| MO3700 | 2 | 3,6302 | 1,8151 | 1,0678 | | | |
| MO3850 | 2 | 3,6047 | 1,8024 | 0,9857 | | | |

| ANOVA | | | | | | |
|----------------------------|--------|----|--------|---------|---------|-----------|
| Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
| Qualidade do Café | 2,4982 | 1 | 2,4982 | 10,1010 | 0,0191 | 5,9874 |
| Torração Convencional e MO | 2,3587 | 6 | 0,3931 | 1,5895 | 0,2938 | 4,2839 |
| Erro | 1,4840 | 6 | 0,2473 | | | |
| Total | 6,3410 | 13 | | | | |

APÊNDICE Q

EFEITO DO ÁCIDO 5-CQA NOS DIFERENTES TIPOS DE TORRAÇÃO CONVENCIONAL E MICROONDAS E NA QUALIDADE DO CAFÉ

| | D210 | D220 | R210 | R220 | MO3500W | MO3700W | MO3850W |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|
| Café Duro para Melhor | 0,7561 | 0,5294 | 0,5243 | 0,4679 | 0,9368 | 0,8468 | 0,5762 |
| Café Mole | 0,7021 | 0,4790 | 0,4904 | 0,4443 | 0,7705 | 0,4943 | 0,6220 |

g/100 g café

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variância |
|-----------------------|----------|--------|--------|-----------|
| Café Duro para Melhor | 7 | 4,6374 | 0,6625 | 0,0334 |
| Café Mole | 7 | 4,0025 | 0,5718 | 0,0161 |
| D210 | 2 | 1,4582 | 0,7291 | 0,0015 |
| D220 | 2 | 1,0083 | 0,5042 | 0,0013 |
| R210 | 2 | 1,0146 | 0,5073 | 0,0006 |
| R220 | 2 | 0,9122 | 0,4561 | 0,0003 |
| MO3500W | 2 | 1,7073 | 0,8537 | 0,0138 |
| MO3700W | 2 | 1,3411 | 0,6706 | 0,0621 |
| MO3850W | 2 | 1,1982 | 0,5991 | 0,0010 |

| ANOVA | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|----------------------------|--------|----|--------|-------------|---------|-----------|
| Fonte da variação | | | | | | |
| Qualidade do Café | 0,0288 | 1 | 0,0288 | 3,335498803 | 0,1176 | 5,9874 |
| Torração Convencional e MO | 0,2448 | 6 | 0,0408 | 4,727085565 | 0,0403 | 4,2839 |
| Erro | 0,0518 | 6 | 0,0086 | | | |
| Total | 0,3254 | 13 | | | | |

APÊNDICE R

EFEITO DO ÁCIDO CAFÉICO NOS DIFERENTES TIPOS DE TORRAÇÃO CONVENCIONAL E NA QUALIDADE DO CAFÉ

| | g/100 g café | | | |
|-----------------------|--------------|--------|--------|--------|
| | D210 | D220 | R210 | R220 |
| Café Duro para Melhor | 0,7726 | 0,2827 | 0,4110 | 0,3670 |
| Café Mole | 0,6525 | 0,2709 | 0,3680 | 0,2896 |
| Café ETM | 0,6855 | 0,2086 | 0,3724 | 0,2122 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variancia |
|-----------------------|----------|---------|--------|-----------|
| Café Duro para Melhor | 4 | 1,8333 | 0,4583 | 0,0467 |
| Café Mole | 4 | 1,581 | 0,3953 | 0,0312 |
| Café ETM | 4 | 1,47865 | 0,3697 | 0,0502 |
| D210 | 3 | 2,1106 | 0,7035 | 0,0038 |
| D220 | 3 | 0,76215 | 0,2541 | 0,0016 |
| R210 | 3 | 1,1514 | 0,3838 | 0,0006 |
| R220 | 3 | 0,8688 | 0,2896 | 0,0060 |

| ANOVA | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|-----------------------|-------------------|--------|----|--------|----------|---------|------------|
| Qualidade do Café | | 0,0167 | 2 | 0,0083 | 6,8304 | 0,0284 | 5,14324938 |
| Torração Convencional | | 0,3769 | 3 | 0,1256 | 103,0322 | 0,0000 | 4,75705519 |
| Erro | | 0,0073 | 6 | 0,0012 | | | |
| Total | | 0,4009 | 11 | | | | |

APÊNDICE S

EFEITO DO ÁCIDO CAFÉICO NOS DIFERENTES TIPOS DE TORRAÇÃO CONVENCIONAL E MICROONDAS E NA QUALIDADE DO CAFÉ

| | D210 | D220 | R210 | R220 | MO3500 | MO3700 | MO3850 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Café Duro para Melhor | 0,7726 | 0,2827 | 0,4110 | 0,3670 | 0,9512 | 0,5514 | 0,3043 |
| Café Mole | 0,6525 | 0,2709 | 0,3680 | 0,2896 | 0,9464 | 0,8300 | 0,4753 |

Anova: fator duplo sem repetição a um nível de 95% de confiança

| RESUMO | Contagem | Soma | Média | Variancia |
|-----------------------|----------|--------|--------|-----------|
| Café Duro para Melhor | 7 | 3,6402 | 0,5200 | 0,0648 |
| Café Mole | 7 | 3,8327 | 0,5475 | 0,0717 |
| D210 | 2 | 1,4251 | 0,7126 | 0,0072 |
| D220 | 2 | 0,5536 | 0,2768 | 0,0001 |
| R210 | 2 | 0,779 | 0,3895 | 0,0009 |
| R220 | 2 | 0,6566 | 0,3283 | 0,0030 |
| MO3500 | 2 | 1,8976 | 0,9488 | 0,0000 |
| MO3700 | 2 | 1,3814 | 0,6907 | 0,0388 |
| MO3850 | 2 | 0,7796 | 0,3898 | 0,0146 |

| ANOVA | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | valor-P | F crítico |
|----------------------------|-------------------|-------------|----|--------|-------------|---------|------------|
| Qualidade do Café | | 0,002646875 | 1 | 0,0026 | 0,256167249 | 0,6308 | 5,98737415 |
| Torração Convencional e MO | | 0,757263819 | 6 | 0,1262 | 12,2148 | 0,0039 | 4,28386215 |
| Erro | | 0,06199563 | 6 | 0,0103 | | | |
| Total | | 0,821906324 | 13 | | | | |

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE