



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**ESTUDO DA DISPERSÃO NA SECAGEM DE FRUTOS DE CAFÉ EM SECADOR
DE BANDEJAS VIBRADAS**

Uberlândia
2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Estudo da Dispersão na Secagem de Frutos de Café em Secador de Bandejas Vibradas

Marilia Assunta Sfredo

Engenheira de Alimentos

Mestre em Engenharia Química

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia - MG

2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

S523e Sfredo, Marilia Assunta, 1975-
Estudo da dispersão na secagem de frutos de café em secador de bandejas vibradas / Marilia Assunta Sfredo. - 2006.
319f. : il.
Orientador: José Roberto Delalibera Finzer.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.
1. Secagem - Teses. 2. Café - Secagem - Teses. I. Finzer, José Roberto Delalibera. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.047

TESE DE DOUTORADO DE MARILIA ASSUNTA SFREDO, SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 28 / 08 / 2006

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer
Orientador (PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. José Romário Limaverde
Co-orientador (PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. Javier Telis Romero
(DETA/UNESP)



Prof.ª Dr.ª Alice Tereza Valduga
(DEA/URI)



Prof. Dr. Mauro Marques Burjaili
(PPG-EQ/UFU)

Aos meus pais, Dirceu e Clarinha, e em especial, ao Jarbas, pelo amor e apoio dedicados nestes quatro anos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais essa conquista, pelas alegrias vividas e pelos inúmeros obstáculos vencidos nestes quatro anos, onde a esperança e a fé foram imprescindíveis para a superação dos momentos mais difíceis.

Ao Professor Dr. José Roberto Delalibera Finzer, pela orientação, pelo incentivo, pela imensa ajuda no desenvolvimento experimental e pela amizade dispensados nestes quatro anos. Sua presença, suas palavras e seu apoio foram muito importantes para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos Professores Dr. José Romário Limaverde, Dr. Mauro Marques Burjaili, Dr^a. Alice Tereza Valduga e Dr. Javier Telis Romero pela colaboração e pelas sugestões que contribuíram para a melhoria desse trabalho.

Ao Sr. Serafin Peres, ao Sr. José Apolinário de Sousa e à Sr. Aparecida Patussi pelo fornecimento dos frutos de café utilizados nos experimentos de secagem.

Ao Professor Dr. Humberto Molinar Henrique, da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, pelo auxílio na montagem do sistema de aquisição de dados.

Ao Professor Dr. Marcos Morais de Sousa, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pelo auxílio na utilização dos equipamentos para determinação da amplitude vibracional (acelerômetro piezoelétrico e osciloscópio analógico).

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, em especial, Professor Dr. Eloízio Júlio Ribeiro, Professor Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes, Professor Dr. Ubirajara Coutinho Filho, Édio José Alves, José Henrique Borges e Silvino Joaquim Corrêa.

Às graduandas Ákilla Brito Santos, Angela Harue Saito, Aziza Nunes Marú, Emilia Gonçalves da Mota, Gabriela, Gisele Duque Bernardes de Sousa, Gislaine Fernandes, Joicy Nara de Oliveira e Marcela Roseane Moroti pela colaboração em parte do trabalho experimental.

Aos funcionários da Divisão de Transporte e da Fazenda do Glória, da Universidade Federal de Uberlândia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro na forma de Bolsa de Estudo à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

Às amigas inseparáveis de doutorado: Fanny Ferreira Melo Fávero Fravet, Fernanda Ferreira Freitas, Patrícia Angélica Vieira e Sandra Faria.

Aos colegas que jamais serão esquecidos: Ailton, Ana Beatriz, Ana Paula, Andréia, Fábio, Fran, Juliana Franco, Líbia, Luis Gustavo, Marcelo, Manduca, Margarete, Miriam, Paula, Rebeca, Sandro e Tiago.

Aos amigos: Agapito e Rebeca, Angélica, Aurealice, Camila, Clécio, Frederico, Idalmo, Joana e Rogério, Lílian, Mariana, Mariana Furlanetto, Mayra Gil, Rafael, Thiago, Túlio, Volnei, Yone.

À Família Celante: Elvis, Ivani e Reli.

Às minhas eternas amigas Andresa Baccega, Elisa Schilke, Graziela Tasca, Lisete Garbin, Marines Angheben e Rosimar Godiensi.

Aos meus pais, Dirceu Domingos Sfredo e Clarinha Sfredo, por tudo o que sou, pela dedicação e pelo amor incansáveis.

Aos meus irmãos Mauricio Vitório Sfredo e Marta Luiza Sfredo, às minhas avós Lydia Rockembach e Amábile Sfredo e a toda minha família.

Ao Jarbas Celante, pelo amor, pelo apoio na realização dos meus sonhos, pela espera incansável, pela pessoa maravilhosa que é e por tudo o que representa em minha vida.

Enfim, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal, nestes quatro anos.

*“[...] Y’a bien des vies qu’on nourrit d’étude ou de science
Destins faits d’aventures, de records ou d’argent
Des vies d’écriture et de voyage
Ou de rêve de puissance
J’y pensais bien de temps en temps,
En écoutant le vent [...]”*

J. J. Goldman et E. Benzi

SUMÁRIO

NOMENCLATURA	i
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – ASPECTOS RELEVANTES DA PRODUÇÃO E DO CONSUMO DE CAFÉ	4
2.1 – Compostos Químicos do Café	6
2.1.1 – Água e Minerais	6
2.1.2 – Carboidratos	6
2.1.3 – Compostos Nitrogenados	6
2.1.4 – Ácidos Clorogênicos	8
2.1.5 – Ácidos Carboxílicos	8
2.1.6 – Ésteres	9
2.1.7 – Lipídios	9
2.2 – Aspectos Nutricionais do Café	10
2.3 – Processamento dos Frutos de Café	10
CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS DA SECAGEM DE SÓLIDOS	12
3.1 – Fundamentos de Secagem	12
3.1.1 – Mecanismos de Migração da Umidade	17
3.1.2 – Propriedades do Ar e do Sólido Úmido	19
3.1.2.1 – Propriedades do Ar	19
3.1.2.2 – Propriedades do Sólido Úmido	21
3.2 – Secadores	23
3.3 – Distribuição do Conteúdo de Umidade	26
3.4 – Tecnologia da Secagem de Café	27
3.4.1 – Caracterização do Fruto de Café.....	28
3.4.1.1 – Variedades de Café	29

3.4.2 – Colheita	30
3.4.3 – Secagem	32
3.4.4 – Beneficiamento	37
CAPÍTULO 4 – SECAGEM EXPERIMENTAL DE FRUTOS DE CAFÉ	40
4.1 – Secador de Bandejas Vibradas com Reciclo	40
4.2 – Planejamento Experimental	44
4.2.1 – Planejamentos Fatoriais a Três Níveis (3 ^k)	45
4.3 – Colheita e Seleção dos Frutos de Café	48
4.4 – Secagem dos Frutos de Café no Secador de Bandejas Vibradas com Reciclo ..	50
4.4.1 – Primeiro Planejamento de Secagem	50
4.4.1.1 – Curvas de Secagem	53
4.4.1.2 – Temperatura dos Frutos de Café e do Ar de Secagem	63
4.4.2 – Segundo Planejamento de Secagem	66
4.4.2.1 – Curvas de Secagem	67
4.4.2.2 – Temperatura dos Frutos de Café e do Ar de Secagem	75
4.4.2.3 – Distribuição do Conteúdo de Umidade	80
4.5 – Encolhimento	91
4.5.1 – Diâmetro da Esfera de Mesmo Volume do Fruto de Café	94
4.5.2 – Esfericidade	97
4.5.3 – Área Superficial Específica	99
4.6 – Densidade Aparente dos Frutos de Café	101
4.7 – Beneficiamento	106
4.7.1 – Descascamento dos Frutos de Café	106
4.7.2 – Classificação Quanto ao Tamanho e Conformação do Grão	108
4.7.2.1 – Estudo Qualitativo da Secagem	111
CAPÍTULO 5 – VIBRAÇÃO APLICADA À SECAGEM DOS FRUTOS DE CAFÉ	118
5.1 – Fundamentos da Vibração	119
5.2 – Instrumentos de Geração de Vibração	121
5.3 – Utilização da Vibração em Processos	123
5.4 – Determinação dos Parâmetros Vibracionais na Secagem de Frutos de Café	135

5.4.1 – Determinação da Amplitude de Vibração	136
5.4.1.1 – Acelerômetro Piezoelétrico e Osciloscópio Analógico	137
5.4.1.2 – Amplitude de Vibração Vertical em Função do Conteúdo de Umidade	140
5.4.1.3 – Determinação da Amplitude Vertical ao Longo da Bandeja	153
5.4.1.4 – Cálculo do Adimensional de Vibração	157
CAPÍTULO 6 – ESTUDO DA DISPERSÃO NA SECAGEM DE FRUTOS DE CAFÉ	168
6.1 – Fundamentos do Escoamento Não Ideal	168
6.1.1 – Distribuição do Tempo de Residência	169
6.1.2 – Determinação Experimental da Curva E	174
6.1.2.1 – Injeção e Detecção das Partículas Marcadas	174
6.2 – Modelos para o Escoamento Não Ideal	181
6.2.1 – O Modelo da Dispersão Axial	182
6.2.2 – Modelos e Correlações para a Distribuição do Tempo de Residência	188
6.3 – Dispersão no Escoamento de Sólidos	193
6.3.1 – Distribuição do Tempo de Residência de Sólidos Durante a Secagem	194
6.4 – Dispersão dos Frutos de Café no Secador de Bandejas Vibradas com Reciclo	195
6.4.1 – Vazão Mássica	195
6.4.2 – Distribuição do Tempo de Residência dos Frutos de Café Durante a Secagem	204
6.4.2.1 – Determinação do Coeficiente de Dispersão dos Frutos de Café	214
6.4.2.2 – Determinação do Número de Péclet	246
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	254
7.1 – Quanto à Secagem dos Frutos de Café	254
7.1.1 – Curvas de Secagem	254
7.1.2 – Temperatura dos Frutos de Café	254
7.1.3 – Distribuição do Conteúdo de Umidade dos Frutos de Café	255
7.1.4 – Encolhimento	255
7.1.5 – Beneficiamento	255
7.2 – Quanto à Vibração na Secagem dos Frutos de Café	256
7.3 – Quanto à Dispersão dos Frutos de Café no Secador de Bandejas Vibradas	257

7.3.1 – Vazão Mássica dos Frutos de Café	257
7.3.2 – Distribuição do Tempo de Residência (DTR)	258
7.3.3 – Coeficiente de Dispersão dos Frutos de Café	258
7.3.4 – Número de Péclet	259
7.4 – Sugestões para Trabalhos Futuros	260
APÊNDICE A – Montagem e programação do sistema de aquisição de dados	262
APÊNDICE B – Temperatura e umidade relativa do ar ambiente durante os experimentos de secagem	267
B.1 – Primeiro Planejamento de Secagem	267
B.2 – Segundo Planejamento de Secagem	275
APÊNDICE C – Curvas de secagem em escala logarítmica	281
C.1 – Primeiro Planejamento de Secagem	281
C.2 – Segundo Planejamento de Secagem	284
APÊNDICE D – Temperatura do ar de secagem	288
D.1 – Primeiro Planejamento de Secagem	288
D.2 – Segundo Planejamento de Secagem	294
APÊNDICE E – Massa média de um fruto de café	299
E.1 – Primeiro Planejamento de Secagem	299
E.2 – Segundo Planejamento de Secagem	304
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	309

NOMENCLATURA

a	Constante	[-]
a	Aceleração	[m/s ²]
A	Amplitude vibracional	[mm]
A _C	Área sob a curva C(t)	[kg s/m ³]
A' _p	Área superficial específica	[m ² /kg]
A _s	Área superficial de secagem	[m ²]
b	Constante	[-]
B1	Bandeja 1	
B2	Bandeja 2	
B3	Bandeja 3	
B4	Bandeja 4	
Bo	Número de Bodenstein	[-]
bs	Base seca	
bu	Base úmida	
c	Constante	[-]
c	Concentração adimensional, Capítulo 6	[-]
cs	Café seco, Tabela 4.16	[-]
C	Concentração	[g/L]
d	Diâmetro	[m]
D	Coefficiente de difusão molecular	[m ² /s]
D _{ef}	Coefficiente de difusão efetivo	[m ² /s]
DTR	Distribuição do tempo de residência	
e	Base neperiana (exponencial)	
E	Função de distribuição do tempo de residência na corrente de saída	[1/s]
E _x	Coefficiente de dispersão na direção horizontal	[m ² /s]
Exp.	Experimento	
E _y	Coefficiente de dispersão na direção vertical	[m ² /s]
E _z	Coefficiente de dispersão na direção axial	[m ² /s]
f	Frequência	Hz
f	Função	[-]

F	Distribuição F de Fischer (Capítulo 4)	[-]
F	Função de distribuição do tempo de residência na corrente de saída	[1/s]
g	Aceleração gravitacional	[m ² /s]
G	Vazão mássica de sólidos	[g/min]
G _A	Fluxo de circulação de sólidos	[kg/m ² s]
GL	Graus de liberdade	
h	Altura física da chaminé	[m]
h̄	Altura efetiva da chaminé	[m]
Δh	Elevação da corrente após a descarga da chaminé	[m]
H	Altura, Figura 2.3	[m]
H	<i>Hold up</i>	[kg]
I	Função de distribuição do tempo de residência retida no equipamento	[1/s]
k	Número de variáveis no planejamento experimental	[-]
K _L	Constante do Modelo da Dispersão Livre	[-]
K _n	Constante do Modelo da Dispersão Livre Modificado	[-]
K _T	Constante do Modelo da Dispersão de Taylor	[-]
L	Comprimento característico	[m]
L _D	Comprimento da trajetória no processo de difusão, Equação (2.6)	[m]
L _s	Dimensão característica do material em uma direção	[m]
m	Massa	[kg]
M	Massa de frutos de café alimentada no secador	[kg]
n	Número de amostras	[-]
N	Resposta verdadeira, Equação (4.2)	[-]
N	Força normal	[N]
Nu	Número de Nusselt	[-]
p	Pressão de vapor	[kPa]
Pe	Número de Péclet	[-]
ΔP	Queda de pressão	[cm H ₂ O]
q	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
Q	Vazão mássica de ar	[kg ar/min]
R	Raio da tubulação	[m]
ℝ	Conjunto dos números reais	[-]
R ²	Coefficiente de correlação	[-]

Re	Número de Reynolds	[-]
s	Variável independente no domínio de Laplace	[1/s]
Sh	Número de Sherwood	[-]
SQ	Soma dos quadrados	
t	Tempo	[s]
\bar{t}	Média aritmética de t_{\max} e t_{\min}	[min]
t_m	Tempo médio de residência	[min]
t_{\max}	Tempo máximo de residência	[min]
t_{\min}	Tempo mínimo de residência	[min]
t_o	Área da cauda da distribuição t	[-]
T	Temperatura	[°C]
T_{bs}	Temperatura de bulbo seco	[°C]
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido	[°C]
u	Velocidade do ar	[m/s]
U	Conteúdo de umidade	[kg H ₂ O/kg café úmido]
UR	Umidade relativa do ar	[%]
v	Velocidade do fluido	[m/s]
V	Volume	[m ³]
w	Fração mássica	[g/g]
W_D	Taxa de secagem	[kg/m ² s]
x	Direção do escoamento no interior do poro, Figura 2.3	[-]
x	Variáveis independentes. Equação (4.1)	[-]
x	Comprimento adimensional (Capítulo 6)	[-]
x	Deslocamento na direção horizontal (Capítulo 5)	[m]
\dot{x}	Velocidade vibracional	[m/s]
\ddot{x}	Aceleração vibracional	[m/s ²]
X	Conteúdo de umidade	[kg H ₂ O/kg café seco]
y	Resposta, Equação (4.1)	[-]
y	Deslocamento na direção vertical (Capítulo 5)	[m]
z	Comprimento do escoamento	[m]
∞	Infinito	[-]

Letras gregas

α_i	Raízes positivas da Equação (6.36)	[-]
β	Parâmetros de ajuste da superfície de resposta	[-]
γ	Ângulo entre o plano horizontal e a base plana	[°]
Γ	Adimensional de vibração	[-]
δ	Entrada pulso de Dirac	
ε	Porosidade	[-]
ζ	Excentricidade	[-]
η	Resposta média	
θ	Ângulo entre o plano horizontal e a direção da vibração	[°]
Θ	Tempo adimensional	[-]
ι	Fonte de variabilidade	[-]
κ	Curtose	[min ⁴]
Λ	Dimensão longitudinal do fruto de café	[m]
μ	Viscosidade	[kg/m s]
ξ	Tortuosidade	[-]
Ξ	Extensão percentual dos tempos de residência	[%]
π	3,1416	[-]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
ρ_a	Densidade aparente	[kg/m ³]
ρ_b	Densidade <i>bulk</i>	[kg/m ³]
σ	Desvio padrão amostral	
σ^2	Variância	[min ²]
τ	Período de oscilação	[s]
ϕ	Esfericidade	[-]
Φ	Espessura do fruto de café	[m]
χ	Distribuição cumulativa	[-]
ψ	Assimetria	[min ³]
ω	Frequência angular	[1/s]
Ω	Dimensão radial do fruto de café	[m]

Sub-índices

0 inicial

A	água
b	béquer
cr	crítico
e	esfera
eq	equilíbrio
f	final
fc	fruto de café
g	gás
i	experimento
j	período de secagem
long	longitudinal
L	líquido
m	mudança de período de secagem
mf	mínima de fluidização
mvf	mínima de vibro-fluidização
n	normal
p	partícula
s	sólido
v	vapor
V	vazios

RESUMO

Para estudar a dispersão dos frutos de café durante a secagem, utilizou-se um secador de bandejas vibradas com reciclo. O secador consiste basicamente de quatro seções: túnel vertical de secagem, sistema de vibração, sistema de injeção de ar aquecido no túnel de secagem e sistema de reciclo dos frutos de café. O túnel de secagem contém quatro bandejas perfuradas por onde escoam os frutos de café e o ar, em fluxo cruzado. A secagem dos frutos de café foi realizada utilizando-se dois planejamentos experimentais, onde as variáveis estudadas foram, para o primeiro planejamento de secagem: temperatura dos frutos de café (40; 45 e 50°C); massa de frutos de café alimentada (11,5; 12,5 e 13,5 kg) e vazão de ar de secagem (7; 8 e 9 kg ar/min), a variedade dos frutos de café foram: Acaia, Catuaí e Mundo Novo; e para o segundo planejamento de secagem: massa de frutos de café (10; 12 e 14 kg) e vazão de ar (7; 8 e 9 kg ar/min), mantendo-se a temperatura dos frutos em 45°C e a variedade Mundo Novo. Para o primeiro planejamento somente a temperatura dos frutos influenciou significativamente o tempo de secagem, onde o maior nível de temperatura reduz em 26,77 h o tempo de secagem. Para o segundo planejamento as variáveis estudadas não foram significativas para o tempo total de secagem dos frutos de café. Durante a secagem ocorre encolhimento dos frutos de café, diminuição da esfericidade, da pegajosidade, da densidade aparente e aumento da área superficial específica com a diminuição do conteúdo de umidade dos frutos de café. Em relação à qualidade do grão de café, as melhores condições operacionais foram obtidas com maior massa e maior vazão de ar de secagem. O escoamento do café no túnel de secagem é promovido pela vibração das bandejas acopladas a vibradores eletromagnéticos. A amplitude de vibração foi determinada por um acelerômetro acoplado a um condicionador de sinal e a um osciloscópio analógico. A amplitude vibracional diminuiu com a diminuição da umidade dos frutos de café devido ao encolhimento e à diminuição da massa, da pegajosidade, da densidade e do diâmetro dos frutos de café. Durante a secagem foram determinadas a vazão mássica dos frutos de café e a distribuição do tempo de residência (DTR). Ao final da secagem, o escoamento dos frutos de café ocorre com maior facilidade devido a: ausência de pegajosidade dos frutos de café; diminuição da massa das partículas e redução do amortecimento da vibração dos frutos de café devido à rigidez adquirida na secagem. O coeficiente de dispersão (E_z) foi determinado pelos modelos da Dispersão de Taylor, da Dispersão Livre e da Dispersão Livre Modificado. Para a grande maioria dos experimentos, o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais (maior coeficiente de correlação) foi o Modelo da Dispersão Livre Modificado. O coeficiente de dispersão dos frutos de café variou de $1,31 \times 10^{-4}$ a $68,67 \times 10^{-4}$ m²/s. O número de Péclet variou de 1,15 a 31,00.

Palavras-chave: secagem, frutos de café, vibração, distribuição do tempo de residência, coeficiente de dispersão, número de Péclet.

ABSTRACT

To study the dispersion of the coffee fruits during the drying, a vibrated tray drier with recycle was used. The dryer consists basically of four sections: drying vertical tunnel, vibration system, system of warm air supply to the drying tunnel and recycle system of coffee fruits. The drying tunnel contains four perforated trays through which the coffee fruits and air flow out, in cross flow. The coffee fruits drying was carried out using two experimental design, where the studied variables were, for the first design: coffee fruits temperature (40; 45 and 50°C); mass of coffee fruits (11.5; 12.5 and 13.5 kg) and air mass rate (7; 8 and 9 kg air/min); the varieties of coffee fruits were: *Acaiá*, *Catuaí* and *Mundo Novo*; and for the second design: mass of coffee fruits (10; 12 and 14 kg) and air mass rate (7; 8 and 9 kg air/min), with coffee fruits temperature around 45°C and the coffee variety *Mundo Novo*. For the first experimental design, the coffee fruits temperature only influenced significantly the drying time, where the largest temperature level reduces in 26.77 h the drying time. For the second experimental design, the studied variables were not significant on drying time. Coffee fruit sphericity, density, sticky decreased with the decrease of the moisture content. With reference to the quality of coffee grain, the best operational conditions were obtained with greater coffee fruits mass and air mass rate. The coffee fruits flow in the drying tunnel is promoted by vibration of the trays coupled to electromagnetic vibrators. The vibration amplitude was determined by an accelerometer connected to a signal conditioner and an analogical oscilloscope. The vibration amplitude decreased with the reduction of the coffee fruits moisture content due to the shrinkage and decrease of the mass, sticky, density and particle size coffee fruits. The coffee fruits mass rate and the residence time distribution were determined (RTD), during the drying. At the end of the drying, the flow occurs with easiness due to: absence of sticky of the coffee fruits; decrease of the particle mass and particle vibration damping decrease, due to particle rigidity acquired in the drying. The dispersion coefficient (E_z) was determined by Taylor Dispersion Model, Free Dispersion Model and Modified Free Dispersion Model. For the great majority of the experiments, the model that better fitted the experimental data (greater coefficient of correlation) was the model of the Modified Free Dispersion. The dispersion coefficient (Modified Free Dispersion) ranged from 1.31×10^{-4} to $68.67 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. The Péclet number ranged from 1.15 to 31.00.

Keywords: drying, coffee fruits, vibration, residence time distribution, dispersion coefficient, Péclet number.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A operação de secagem é uma etapa fundamental no processamento dos frutos de café. Contudo, na maioria das fazendas produtoras de café, no Brasil, a secagem é realizada em terreiros, com pouca mecanização, ocupando uma extensa área, dependendo das condições climáticas e demandando muita mão-de-obra para garantir uma secagem segura e que propicie um grão de café de qualidade.

A qualidade do grão tem fundamental importância para os produtores porque o café, diferentemente de outros grãos, é avaliado por prova de xícara (degustação da bebida), além das avaliações de conteúdo de umidade, tamanho da fava, porcentagem de impurezas e número de defeitos. A cotação do café depende da qualidade da bebida durante a prova de xícara, que é fundamental para categorizar o café tipo exportação. Esse café atinge preços muito acima do valor cotado para uma saca de 60 kg de café comum comercializado no mercado nacional. Por isso, além de cultivar as melhores variedades, em regiões propícias para o cultivo, os produtores necessitam ser extremamente cuidadosos durante a colheita e secagem dos frutos de café para garantir um produto de qualidade superior.

Apesar da importância da operação de secagem no processamento de frutos de café, poucas pesquisas são desenvolvidas, (comparado com a secagem de outros grãos) tendo como meta a melhoria da qualidade do café. Dessa forma, são de fundamental importância o estudo da secagem de frutos de café e o desenvolvimento de novas tecnologias que no futuro possam ser absorvidas pelos produtores, principalmente pelos grandes avanços tecnológicos que vêm ocorrendo na agricultura especializada.

O trabalho atual foi direcionado para a obtenção de cafés especiais, utilizando-se para isso um secador mecânico de bandejas vibradas, processando somente frutos de café selecionados, onde foi controlada a temperatura do café e determinada a distribuição do tempo de residência (DTR) das partículas durante a secagem.

O conhecimento da DTR é de grande importância no processamento asséptico de alimentos e pode ser estendido também para a secagem de café, visto que o tempo de

permanência dos frutos no secador relaciona-se com a rapidez com que a secagem é efetuada. Uma secagem muito lenta pode propiciar o desenvolvimento de fungos nos frutos de café, que prejudicam intensamente a qualidade dos grãos e da bebida.

Os estudos sobre a secagem de café na Universidade Federal de Uberlândia iniciaram-se em 1995, quando foi desenvolvida uma Dissertação de Mestrado por Menezes (1996), determinando-se os parâmetros operacionais adequados à secagem, como a velocidade e a temperatura do ar, assim como a taxa de escoamento de café pergaminho, utilizando um vibrador mecânico para efetuar o deslizamento das partículas.

Na segunda etapa foi implementado um sistema automático de recirculação dos frutos de café, consistindo em um elevador de canecas, tendo sido desenvolvida uma segunda Dissertação de Mestrado por Freitas (1998). Nas duas etapas foram efetuadas quantificações do tempo de secagem para se obter a umidade requerida para a armazenagem do café.

Na terceira etapa, desenvolvida por Banzatto (2000) em sua Dissertação de Mestrado, foi implementado um sistema de vibração eletromagnético para controlar a taxa de escoamento do café no interior do secador, com o objetivo de se conseguir um controle mais efetivo da secagem, além da obtenção de parâmetros de engenharia de processo, requeridos para efetuar o projeto ou a mudança de escala de secadores.

A quarta etapa, desenvolvida por Sfredo (2002) em sua Dissertação de Mestrado, consistiu no processamento dos frutos de café cereja em secador de leito fixo, com e sem vibração nas bandejas, com o intuito de analisar o efeito da vibração na qualidade dos grãos e da bebida, pela prova de xícara.

Como os resultados da pesquisa no estudo do efeito da vibração na qualidade do grão e da bebida, obtidos por Sfredo (2002), foram promissores, o presente trabalho objetiva o aperfeiçoamento de um secador de bandejas vibradas operando em batelada, com sistema de reciclo dos frutos de café e, estudo da dispersão, que inclui a determinação dos tempos de residência das partículas, do coeficiente de dispersão e do número de Péclét, relacionando esses parâmetros com a intensidade vibracional aplicada às bandejas do secador e ao conteúdo de umidade dos frutos de café.

No presente trabalho foi dada ênfase especial aos seguintes aspectos:

- ao estudo da secagem de frutos de café cereja em diferentes condições

operacionais e à determinação das melhores condições em função do tempo de secagem e parâmetros qualitativos do grão de café verde;

- à quantificação da intensidade vibracional das bandejas do secador no decorrer da secagem e à verificação da influência do conteúdo de umidade nos valores de amplitude vibracional e no adimensional de vibração;

- ao estudo do comportamento dos frutos de café em escoamento pela determinação da distribuição do tempo de residência das partículas no secador de bandejas vibradas com reciclo e à avaliação da influência da perda de umidade dos frutos de café e da intensidade vibracional no escoamento;

- à determinação do coeficiente de dispersão dos frutos de café e do número de Péclet com a finalidade de caracterizar o escoamento das partículas no secador durante a operação de secagem.

Para possibilitar que o objetivo deste estudo fosse alcançado, apresentam-se: os fundamentos teóricos da operação de secagem (Capítulo 3), que possibilitam um aprofundamento no estudo dos mecanismos envolvidos na secagem dos frutos de café; a descrição da secagem experimental de café (Capítulo 4), com ênfase no aperfeiçoamento do secador de bandejas vibradas, nas curvas de secagem e no estudo qualitativo do grão; a determinação da intensidade vibracional das bandejas (Capítulo 5); o estudo do comportamento do escoamento dos frutos de café no secador pela determinação da distribuição do tempo de residência das partículas (Capítulo 6), relacionado com a perda de umidade e com a intensidade vibracional; as conclusões obtidas após a realização dos experimentos e discussão dos resultados (Capítulo 7) e, finalmente, as sugestões para trabalhos futuros relacionados ao processamento de café.

O Capítulo 2, descrito a seguir, reporta os principais aspectos da produção e do consumo de café, introduzindo a importância do mesmo na economia brasileira e mundial, na dieta humana e a importância da operação de secagem para obtenção de um produto rentável economicamente e, seguro, do ponto de vista alimentício.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS RELEVANTES DA PRODUÇÃO E DO CONSUMO DE CAFÉ

A cafeicultura é uma importante atividade agrícola para o Brasil, pois representa o segundo lugar em divisas na pauta de exportações sendo fundamental para o equilíbrio da balança comercial. A atividade gera grandes receitas e empregos diretos e indiretos em todas as suas etapas. O interesse pela pesquisa na cafeicultura só tem aumentado e a maioria das publicações relacionadas ao café tem sido desenvolvida no sentido de melhorar a qualidade em atividades relacionadas ao cultivo da planta. São poucas as publicações técnicas relativas ao processamento pós-colheita: secagem dos frutos; torrefação; extração de solúveis; preparação das bebidas e degustação (DUTRA; OLIVEIRA; AFONSO, 1999).

Historicamente, o Brasil e a Colômbia sempre foram os maiores produtores de café do mundo. Entretanto, a situação mudou com o crescimento rápido da produção de café no Vietnã, o qual contribuiu para a forte queda dos preços internacionais, a partir da década de 90 (PONTE, 2002).

Apesar disso, o Brasil ainda é o maior produtor e exportador de café, com participação de 22% do mercado mundial, nos últimos sete anos (GOLLÜCKE; TANIWAKI; TAVARES, 2004). Cerca de sessenta países, com clima tropical, produzem café e cerca de 98% do café exportado por esses países é “café verde”, ou seja, café seco e descascado. Os países importadores processam o café verde e agregam mais valor ao grão com processos de torrefação, descafeinização e moagem (BRENES *et al.*, 1997).

Os preços do grão de café torrado podem variar extensivamente de acordo com o tipo de café, com preços inferiores a 13 dólares/kg até preços superiores a 44 dólares/kg, sendo que alguns cafés chegam a custar 110 dólares o quilograma, tais como o *Hawaiian Kona* e o *Jamaican Blue Mountain*, que são considerados cafés finos. Os cafés finos são cafés de alta qualidade, puros ou misturados (*blends*), disponíveis nas torrefações: clara, escura, descafeinada, aromatizada e específica para cafés expresso. Esses cafés são cultivados sob circunstâncias favoráveis e processados de acordo com padrões de alta qualidade (BRENES *et al.*, 1997). Os cafés especiais ou *gourmets* são produtos de qualidade diferenciada, ou seja,

corpo, sabor e aroma apreciados pelos mais exigentes consumidores do mundo. O produto especial deve ter as qualidades do café fino, ter origem comprovada e ainda ser produzido em fazendas que tenham respeito pelo meio ambiente e que dêem condições de qualidade de vida aos trabalhadores e famílias envolvidos na produção (REVISTA CAMPO & NEGÓCIO, 2003).

No mundo, a cada ano é consumido cerca de 80% (em massa) mais café do que chá, sendo que a média per capita de consumo (em massa) é dois terços maior do que o chá. Além disso, o café é a *commodity* agrícola mais valiosa no comércio mundial e participa em alta proporção do valor do total das exportações de vários países da América Latina (GRIGG, 2002).

Para se ter uma idéia do consumo, o primeiro *coffee shop* inglês foi inaugurado em 1650 na Inglaterra e em 1675 já existiam 3000 casas de café neste mesmo país (SMITH, 1985). Nos últimos dez anos, o número de *coffee shops* nos Estados Unidos aumentou de 500 para 10000, dos quais a maior rede americana, *Starbucks*, possui 2200 lojas. Segundo Nunes e Coimbra (1998), mais de 50 milhões de xícaras de café expresso são consumidas todos os dias no mundo. Alguns consumidores ingeriam cafés especiais desde os anos 50, mas muitas pessoas somente agora estão sendo incorporadas neste segmento. O aumento do consumo deste produto requer também um grande entendimento das bases de preferência dos diferentes consumidores (CRISTOVAM *et al.*, 2000). O café expresso, além de um fenômeno da moda, parece estar baseado na grande satisfação sensorial dada ao consumidor quando comparada a cafés preparados por outros métodos (NAVARINI *et al.*, 2004).

Para fazer um café expresso são necessários 50 a 55 grãos de café torrado. Se um grão estiver deteriorado toda a bebida será comprometida, devido às substâncias químicas presentes nos grãos defeituosos que, geralmente, possuem sabor e aroma muito desagradáveis (ILLY, 2002).

As substâncias que constituem o café verde são muito importantes para a qualidade da bebida, pois serão as precursoras das centenas de compostos formados durante a torrefação. As principais substâncias que constituem o café verde são: água, carboidratos, compostos nitrogenados, ácidos clorogênicos, ácidos carboxílicos, ésteres e lipídios. Já, no café torrado, os compostos de maior importância são os voláteis, responsáveis pelo aroma do café. Um breve resumo das principais substâncias encontradas no café é descrito a seguir.

2.1 – Compostos Químicos do Café

2.1.1 – Água e Minerais

O café verde contém de 10 a 13% de água (base úmida) enquanto o café torrado pode conter até 5% (bu). A água pode estar disposta na matriz sólida em forma de mono e múltiplas camadas superficiais de moléculas. As substâncias minerais encontram-se presentes em um nível relativamente baixo. O conteúdo de cinzas do café verde é de aproximadamente 4% (base seca). O potássio é o principal constituinte das cinzas alcançando cerca de 40% (CLARKE, 1985).

2.1.2 – Carboidratos

O café verde contém diversos carboidratos subdivididos no grupo dos polissacarídeos e açúcares de baixo peso molecular. A quantidade total de carboidratos representa cerca de 50% em base seca do café verde. A composição é complexa, com uma faixa de diferentes poli, oligo e monossacarídeos, subdivididos em açúcares redutores e não redutores. Os polissacarídeos (celulose, pectina, amido) não contribuem especialmente para a formação do *flavour* durante a torrefação do café, mas são importantes agentes retentores do aroma da bebida. Os carboidratos presentes na bebida de café podem ser listados em ordem quantitativa decrescente: sacarose, inositol, glicose, arabinose, sorbitol, manose, manitol e frutose (FLAMENT, 2001).

2.1.3 – Compostos Nitrogenados

Os principais compostos nitrogenados no café verde são a cafeína, a trigonelina, as proteínas e os aminoácidos.

A cafeína (1,3,7-trimetilxantina), cuja fórmula é apresentada na Figura 2.1, é o alcalóide mais importante do café, embora existam traços de 1,3-dimetilxantina (teofilina) e 3,7-dimetilxantina (teobromina). Os três alcalóides mencionados contêm um esqueleto de purina que é amplamente difundido na natureza, sendo detectado em componentes metabólicos importantes, tais como a xantina, os ácidos nucleicos e o ácido úrico (MACRAE, 1985; MOREIRA; TRUGO; DE MARIA, 2000).

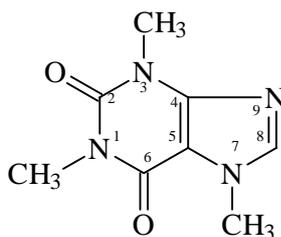


Figura 2.1 – Fórmula química da cafeína (MACRAE, 1985).

Segundo Knight e colaboradores (2004), as quantidades recomendadas de cafeína, ingeridas diariamente, que não causam efeitos adversos à saúde humana são: 400 – 450 mg/dia para um adulto de 70 kg; 300 mg/dia para mulheres na idade fértil e com cerca de 65 kg; e 45 mg/dia para crianças entre 4 e 6 anos. Segundo Macrae (1985), uma xícara de café possui, em média, 70 mg de cafeína.

A cafeína foi descoberta no chá (*Camellia sinensis*) e no café (*Coffea arabica*) no século XIX, mais precisamente na década de 20. Esse alcalóide é produzido principalmente em folhas jovens e em frutos imaturos, mas a cafeína continua sendo produzida e acumulada gradualmente durante a maturação das plantas (ASHIHARA; CROZIER, 2001).

Segundo Ashihara e Crozier (2001), os grãos dos vários cultivares da *Coffea arabica* contêm cerca de 1% de cafeína. Entretanto há grãos de outras espécies que possuem uma alta concentração de cafeína: *Coffea canephora* variedade Robusta (1,7%) e v. Guarini (2,4%), *C. deweurei* (1,2%) e *C. liberica* (1,4%) e uma baixa concentração: *C. eugenioides* (0,4%), *C. salvatrix* (0,7%) e *C. racemosa* (0,8%). As folhas de *C. arabica* também contêm cafeína e traços de teobromina. Já, as folhas jovens de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) contêm 0,8 a 0,9% de cafeína e 0,08 a 0,16% de teobromina. Recentemente, a cafeína foi detectada em flores de várias espécies de citrus, com as maiores concentrações no pólen (0,2%).

Um segundo grupo de compostos nitrogenados são representados principalmente pelas amidas trigonelina e serotonina (5-hidroxitriptamidas), cujas fórmulas estruturais são mostradas na Figura 2.2. A trigonelina é muito importante, pois os produtos de sua degradação térmica são significativos do ponto de vista sensorial. O teor de trigonelina no café verde atinge a cifra de 1%, em base seca (MACRAE, 1985).

As proteínas solúveis (albumina) e insolúveis representam aproximadamente 8,7% a 9,7% (bs) do café verde. O café também possui enzimas (menores proteínas do grão),

contudo, a torrefação provoca desnaturação e perda total da atividade enzimática. A análise das proteínas aponta para a existência de 18 aminoácidos, sendo os principais: metionina, lisina, leucina, ácido glutâmico (MACRAE, 1985).

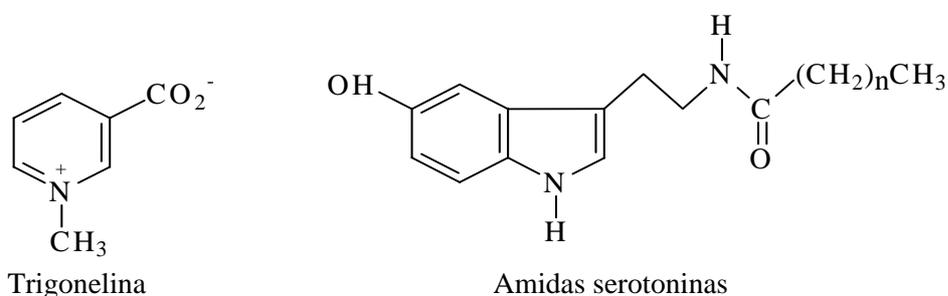


Figura 2.2 – Fórmula química da trigonelina e da serotonina (MACRAE, 1985).

2.1.4 – Ácidos Clorogênicos

Segundo Moreira, Trugo e De Maria (2000), os ácidos clorogênicos são os principais compostos fenólicos não-voláteis encontrados no café.

Uma grande quantidade de ácido quínico ocorre como uma série de ésteres (coletivamente) geralmente conhecida como ácidos clorogênicos. As estruturas do ácido quínico e dos ácidos clorogênicos são apresentados na Figura 2.3(a) e 2.3(b), respectivamente. Na literatura, diversos trabalhos indicam que o conteúdo dos ácidos clorogênicos no café verde varia de 4,1 a 9,0% (bs). A importância sensorial dos ácidos clorogênicos é associada com sabor amargo conferido à bebida por estas substâncias (CLIFFORD, 1985).

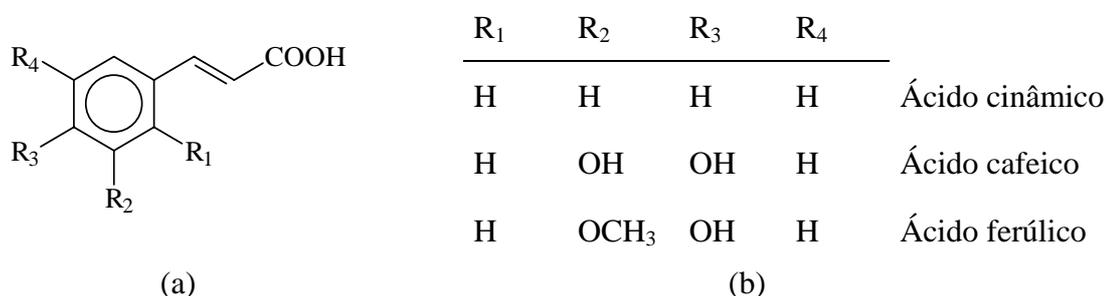


Figura 2.3 – Estrutura do ácido quínico (a) e de ácidos clorogênicos (b), CLIFFORD (1985).

2.1.5 – Ácidos Carboxílicos

O café verde contém ácidos carboxílicos não voláteis incluindo 0,5% de ácido cítrico, 0,5% de ácido málico, 0,2% de ácido oxálico e 0,4% de ácido tartárico. Os ácidos

carboxílicos conferem acidez à bebida de café e por isso têm importância no *flavour* do café (WOODMAN, 1985).

Segundo Moreira, Trugo e De Maria (2000), os ácidos carboxílicos estão presentes em grande quantidade na fração volátil do café torrado e cerca de 20 ácidos alifáticos e 2 alicíclicos já foram identificados. Entretanto, nenhum ácido aromático foi identificado nesta fração. Os principais ácidos carboxílicos voláteis encontrados no café torrado são o ácido acético (3 g/kg café torrado), o ácido fórmico (1 g/kg café torrado) e o ácido propanóico (0,1 g/kg café torrado).

2.1.6 – Ésteres

Segundo Moreira, Trugo e De Maria (2000), a maioria dos ésteres voláteis é produzida no fruto antes da torrefação, sendo a principal rota de formação a esterificação entre um ácido e um álcool. A reação de esterificação no café verde pode ser desencadeada pela secagem artificial com altas temperaturas (acima de 45°C); pela atividade microbiana na polpa do café, enquanto os frutos de café aguardam o processamento ou pela fermentação durante o processamento por via úmida (café despulpado) com duração excessiva.

2.1.7– Lipídios

Os lipídios do café verde são compostos de um óleo de café, presente substancialmente no endosperma, e uma pequena quantidade de gordura de café localizada em outras camadas do grão. O café arábica contém em média 15% (bs) de óleos e 0,25% (bs) de gorduras. As gorduras (parte solúvel em éter de petróleo) são compostas pelos ácidos graxos saturados do C_{18:0} ao C_{24:0} (45,3%), pelo ácido graxo palmítico (24,9%) e linoleico (23,8%). O principal ácido graxo que compõe a fração lipídica (óleo) do café é o linoleico (43,1%), seguido do palmítico (31,1%), esteárico (9,6%) e oleico, com 9,6%, e 14,6% de ácidos graxos saturados do C_{18:0} ao C_{24:0} (FOLSTAR, 1985).

Devido ao grande número de compostos químicos encontrados no café, muitos estudos associados à bebida têm focado os aspectos negativos de alguns compostos relacionados à saúde humana, tais como a toxicidade da cafeína (YANAGIMOTO *et al.*, 2004). Contudo, no café também estão presentes substâncias de alto valor nutricional e benéficas à saúde.

2.2 – Aspectos Nutricionais do Café

Diversas bebidas consumidas são ricas em flavonóides e em ácidos fenólicos, como por exemplo, o café, com 200 a 550 mg polifenóis/xícara; os chás, com 150 a 200 mg/xícara e o vinho, com 200 a 800 mg/taça. Estas bebidas contribuem significativamente para a incorporação dos polifenóis na dieta humana. Os flavonóides e outros ácidos fenólicos têm uma atividade antioxidante significativa com relação às vitaminas C e E (RICHELLE; TAVAZZI; OFFORD, 2001). Os antioxidantes são conhecidos por prevenir muitas doenças, como câncer e arteriosclerose e retardar o envelhecimento (YANAGIMOTO *et al.*, 2004).

Diferentes estudos mostram que a bebida de café possui propriedades relacionadas à saúde humana: atividade antioxidante, atividade bactericida, efeitos anticarcinogênicos e capacidade para aumentar a glutathione total do plasma sanguíneo (BORRELLI *et al.*, 2004).

Borrelli e colaboradores (2004), reportaram que a película prateada, que é um subproduto da torrefação revestindo os grãos de café torrado, possui algumas propriedades nutricionais relativas à bebida de café. Os autores determinaram a composição química da película prateada (carboidratos, lipídios, proteínas), a quantidade de fibra total, solúvel e insolúvel, a atividade antioxidante e propriedades pré-bióticas. Os resultados indicaram que a película prateada possui 60% de fibra total, com um relevante componente de fibra solúvel (14%). Apesar da pequena quantidade de compostos fenólicos livres, a película prateada possui atividade antioxidante, que pode ser atribuída à grande quantidade de produtos da reação de *Maillard* (melanoidinas). Os testes de fermentação em batelada com cultura estática mostraram que a película prateada induziu, preferencialmente, o crescimento de bifidobactérias ao invés de *Clostridium* e *Bacteroides spp.* Os autores concluíram que a película prateada pode ser considerada um novo ingrediente com potencial funcional devido ao alto conteúdo de fibra solúvel, à pronunciada atividade antioxidante e à atividade pré-biótica.

Para obter um produto de qualidade, com composição química ideal é necessário observar alguns cuidados durante o processamento dos frutos de café. Alguns aspectos do processamento do café são descritos a seguir.

2.3 – Processamento dos Frutos de Café

A colheita é a etapa que antecede o processamento dos frutos de café. A colheita

deve ser efetuada de modo que a maioria dos frutos apresente completa maturação, ou seja, somente frutos de café cereja. Em seguida, deve-se realizar a secagem dos frutos para evitar a ocorrência de fermentação na polpa e o desenvolvimento de microrganismos que possam deteriorar o café e produzir substâncias tóxicas ao homem. A secagem tem como objetivo reduzir o conteúdo de umidade até um nível seguro para estocagem do grão de café verde.

Segundo Illy (2002), um dos maiores desafios para produzir um café especial é assegurar-se de que os grãos verdes apresentam excelente qualidade. Um grão de café maduro perfeito é composto por células com paredes extremamente espessas, de cinco a sete microns, uma exceção no reino vegetal. Durante a torrefação, as células, com diâmetro de trinta a quarenta microns, atuam como reatores onde ocorrem todas as reações que originam o sabor e o aroma do café. Os grãos que ainda não atingiram a completa maturação apresentam paredes mais finas e não contêm proteínas importantes na formação do aroma, as quais só são desenvolvidas nos últimos estágios de maturação. Já os grãos fermentados, são compostos por células que perderam substâncias cruciais devido ao desenvolvimento de mofos e bactérias.

Existe uma conscientização no país, entre os produtores, de que para produtos de qualidade comprovada sempre haverá cotação superior. A região do Cerrado Mineiro especializou-se na exportação de cafés finos, a qual nas últimas edições do Prêmio Brasil de Qualidade de Café para Expressos, teve seus produtores sempre entre os melhores (MOREIRA, 2000; VIANNA, 2000). A preocupação com a qualidade é fundamental, visto que a bebida de café é consumida e tão apreciada devido, principalmente, às suas qualidades sensoriais.

Essas considerações indicam que a operação de secagem dos frutos de café reflete diretamente na qualidade do café verde que será processado e consumido por milhares de pessoas, todos os dias. E, portanto, faz-se necessário conhecer os principais fundamentos dessa importante operação para assegurar a qualidade e aperfeiçoar os métodos de secagem dos frutos de café. Esses fundamentos são apresentados a seguir, no Capítulo 3.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS DA SECAGEM DE SÓLIDOS

Neste capítulo são abordados os principais fundamentos da secagem, enfatizando os mecanismos de migração da umidade durante a operação e as propriedades do sólido úmido (Seção 3.1); os diversos aspectos da secagem utilizando secadores mecânicos e sistemas vibrados (Seção 3.2); uma breve descrição sobre a distribuição do conteúdo de umidade durante a secagem de produtos alimentícios (Seção 3.3) e uma revisão bibliográfica sobre o processamento de frutos de café, desde a sua caracterização até o beneficiamento dos grãos, enfatizando a operação de secagem (Seção 3.4).

3.1 – Fundamentos de Secagem

A secagem é uma operação termofísica e físico-química, que envolve a transferência simultânea de calor e massa. Na secagem de grãos, o ar é utilizado para transferir calor para o material úmido com a finalidade de evaporar a umidade, removendo-a da superfície do material na forma de vapor de água (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974; SHEI; CHEN, 2002). A secagem de alimentos é uma operação complexa que envolve a transferência de calor e massa em uma matriz que apresenta higroscopicidade e encolhimento (FONTAINE; RATTI, 1999).

A Figura 3.1 apresenta uma curva típica de secagem com mecanismo convectivo.

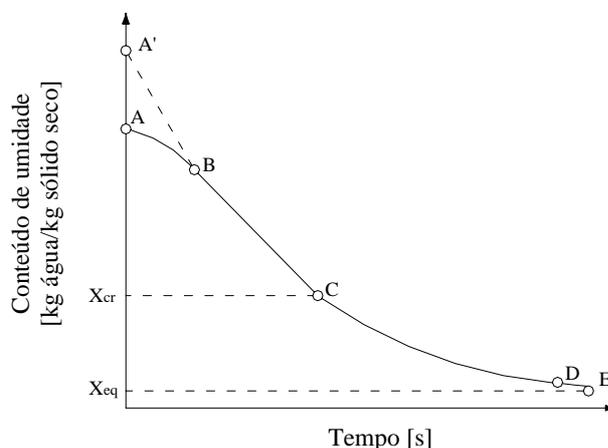


Figura 3.1 – Curva de secagem (adaptado de Strumillo; Kudra, 1986).

A variação no conteúdo de umidade (X) em função do tempo, para o período inicial de secagem, é ilustrada na curva A–B (ou curva A'–B). Com o transcorrer do tempo a relação $X = f(t)$ torna-se linear (segmento BC) e a taxa de secagem, que é igual ao coeficiente angular da reta BC, torna-se constante. A variação linear do conteúdo de umidade em função do tempo ocorre até o ponto crítico C. A partir deste ponto a linha reta torna-se uma curva, que se aproxima, assintoticamente, do conteúdo de umidade de equilíbrio, X_{eq} (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Um método apropriado para representar o comportamento fenomenológico da secagem considera a variação da taxa de secagem, expressa por (W_D), em função do conteúdo de umidade. Para materiais biológicos, a secagem apresenta dois períodos distintos (CRONIN, 1998). A Figura 3.2 mostra o diagrama da curva de taxa de secagem $W_D = f(X)$.

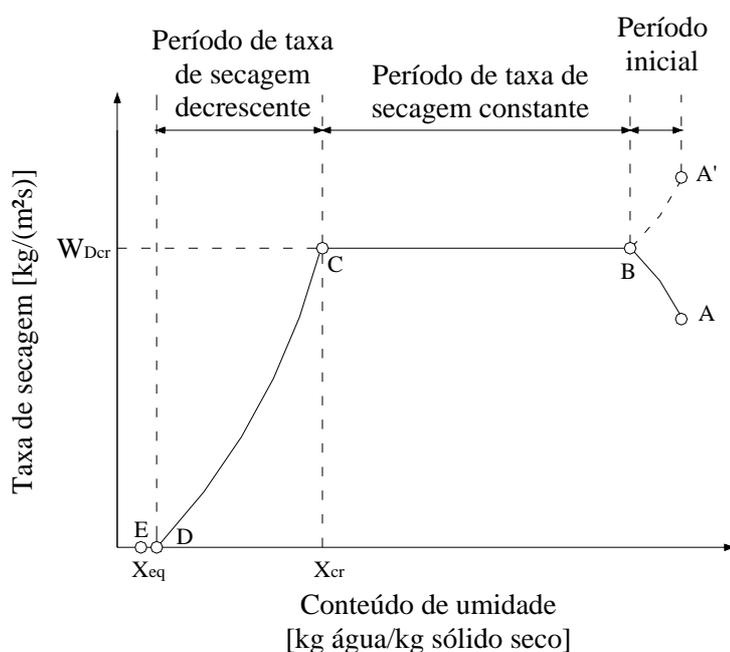


Figura 3.2 – Curva da taxa de secagem (adaptado de Strumillo; Kudra, 1986).

A taxa de secagem, definida como a quantidade de umidade removida por unidade de tempo e por unidade de superfície de secagem, é quantificada pela Equação (3.1).

$$W_D = -\frac{m_s}{A_s} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (3.1)$$

Sendo: m_s a massa de sólido (kg) e A_s a área superficial de secagem, em m^2 (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

No período inicial de secagem o material e sua superfície (recoberta com fina película de água) têm temperatura menor do que a temperatura de equilíbrio. Assim, a taxa de secagem aumenta (curva A–B) até que a temperatura na superfície do material atinja a temperatura de equilíbrio (segmento BC). Raramente, o secador é alimentado com material à temperatura maior do que a temperatura de equilíbrio (curva A'–B). O período inicial é muito curto e, na prática, pode ser negligenciado (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

O período de secagem à taxa constante (segmento BC) corresponde à situação onde a superfície do sólido está completamente umedecida (NONHEBEL; MOSS, 1971). Neste período a taxa de transferência de calor e massa depende, primordialmente, do mecanismo de transporte na camada limite (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

O conteúdo de umidade no qual a taxa de secagem do produto muda de constante para decrescente (ponto C, Figuras 3.1 e 3.2) é chamado de conteúdo de umidade crítico (X_{cr}). O valor do conteúdo de umidade crítico depende das características do sólido, tais como, a forma e o tamanho e, também das condições operacionais de secagem (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974).

A Figura 3.3 ilustra três mecanismos da secagem para os períodos de taxa de secagem constante e decrescente.

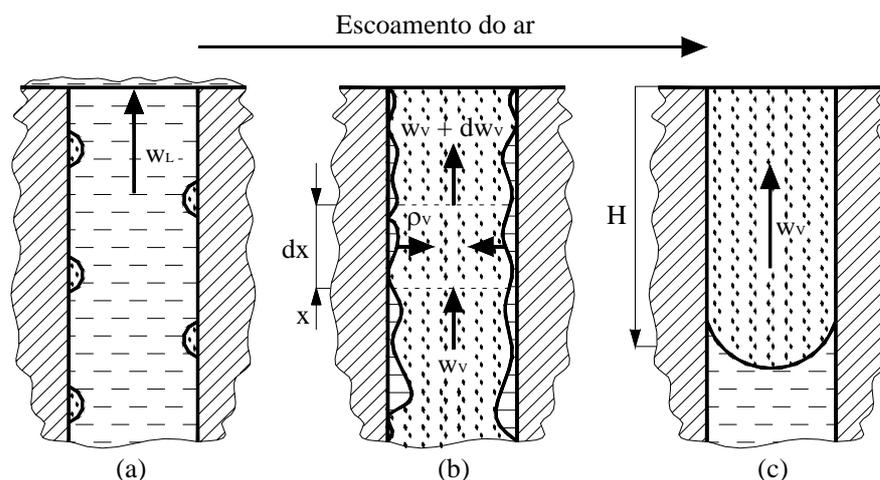


Figura 3.3 – Mecanismos de secagem: (a) período de taxa de secagem constante; (b) material higroscópico; (c) retração da superfície de evaporação (adaptado de Kowalski, 2001).

A migração da umidade do interior para a superfície do sólido, durante o período de secagem à taxa constante, ocorre muito lentamente. Assim, pode-se assumir que as temperaturas da matriz sólida e da umidade são iguais (KOWALSKI, 2001). Para materiais,

com conteúdo de umidade acima de 30%, o líquido preenche todos os microcapilares (raio menor do que 10^{-7} m) e a maioria dos macrocapilares (raio maior do que 10^{-7} m) e difunde para a superfície do material formando uma fina película de água. Neste caso, o líquido evaporado transfere-se, devido à difusão molecular, para a camada limite gasosa onde acontece a difusão convectiva de umidade. Se o conteúdo de umidade é maior do que o conteúdo de umidade higroscópico, então o vapor de água próximo à superfície está saturado e, portanto, a temperatura da superfície do material (para secagem convectiva) é igual à temperatura de bulbo úmido (STRUMILLO; KUDRA, 1986). Assim, a taxa de secagem é controlada totalmente pelas condições externas de secagem, as quais, para o caso de secagem convectiva, são: a velocidade, a temperatura e a umidade do ar (NONHEBEL; MOSS, 1971).

A relação existente entre a água e os demais compostos em um determinado produto define sua higroscopicidade. Seu conceito é muito difundido no estudo de alimentos e pode ser considerada uma característica que influencia o manuseio, o processamento, a estocagem e o consumo de materiais biológicos (PARK; VOHNIKOVA; BROD, 2002). Um material higroscópico é aquele que contém água ligada que exerce uma pressão de vapor menor do que a pressão da água líquida na mesma temperatura. Os produtos constituídos, principalmente por carboidratos devem comportar-se como um material higroscópico, visto que os grupos hidroxila em torno das moléculas de açúcar permitem a formação de ligações de hidrogênio com moléculas de água. A interação entre as moléculas de água e os grupos hidroxila causa solvatação ou solubilização de açúcares (IBARZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2003).

O período de secagem à taxa constante é associado com a remoção da água não ligada no produto. Neste período, a água comporta-se como se o sólido não estivesse presente. Para materiais porosos, a remoção da água na superfície é compensada pelo suprimento da água do interior do sólido. O período de secagem à taxa constante permanece enquanto a água evaporada na superfície for compensada pela água interna (IBARZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2003).

No período de taxa constante de secagem, a taxa de evaporação é similar àquela que ocorre em uma superfície de líquido (KOWALSKI, 2001). Este período, normalmente não tem relevância para materiais biológicos (CRONIN, 1998; FONTAINE; RATTI, 1999), especialmente para secagem em camada fina e com alta taxa de evaporação (CRONIN, 1998).

Quando o filme de líquido é completamente evaporado, o processo de evaporação

inicia-se nas extremidades dos capilares. Então, a intensidade da secagem pode, eventualmente, ser maior do que aquela do filme de líquido, devido à ampliação da superfície de evaporação (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Se o conteúdo de umidade é menor do que o conteúdo de umidade higroscópico, a taxa de secagem decresce rapidamente, principalmente devido à adsorção na superfície de evaporação. Com o término do efeito de resfriamento causado pela evaporação, a temperatura da superfície do material aumenta gradativamente aproximando-se da temperatura do ar de secagem (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Quando o movimento da umidade no interior do sólido não mantém a superfície do material saturada com líquido, a taxa de secagem começa a decrescer e o valor da atividade de água na superfície torna-se menor do que a unidade (curva CD, Figura 3.2). Neste período, a taxa de secagem é controlada pelo escoamento interno da água e do vapor de água (STRUMILLO; KUDRA, 1986; IBARZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2003). A evaporação a partir de um único tubo capilar pode ser considerada como um modelo simplificado para a secagem neste período. Assim, nesta situação, a taxa de secagem é controlada pela taxa de difusão do vapor de água através da camada de ar estagnada acima do menisco, como mostra a Figura 3.3c (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Durante o período de secagem à taxa decrescente é observado o aparecimento de locais secos sobre a superfície do material. Como a área úmida diminui, a temperatura na superfície do material aumenta. Esse fenômeno ocorre porque o calor é transferido para toda a superfície do material, enquanto que o processo de evaporação ocorre somente na área úmida. Este aumento da temperatura compensa, em parte, o decréscimo da área úmida, então, o declínio da taxa de secagem não é de grande intensidade (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Para o período de taxa de secagem decrescente, supõe-se que não há fluxo de líquido no interior da matriz sólida, ou seja, o líquido é evaporado e o vapor é removido, quase totalmente, do interior do sólido para o meio de secagem, como mostra a Figura 3.3b. Em alguns casos, a zona de evaporação pode retroceder em direção ao interior da matriz sólida (ver Figura 3.3c). Assim, o material é dividido em duas regiões, úmida e seca, separadas pela superfície de evaporação (KOVALSKI, 2001).

O período de secagem à taxa decrescente possui duas regiões distintas com uma transição gradual entre elas. Inicialmente, na primeira região, uma porção da superfície do

sólido permanece saturada e a maior parte da água dentro do sólido ainda está livre. Assim, a taxa de secagem diminui linearmente em função do conteúdo de umidade. Entretanto, quando a superfície do sólido torna-se completamente seca e os mecanismos de transferência de água ligada passam a dominar o processo, a taxa de secagem decresce de modo não linear. Esta mudança no comportamento da taxa decrescente pode ser explicada pela substituição do efeito de capilaridade pela difusão de vapor e líquido, a qual se torna o mecanismo de transporte dominante (CRONIN, 1998).

O calor requerido para remover a umidade é transferido através do sólido para a superfície de evaporação e o vapor de água produzido é transferido para o ar em escoamento na superfície. Neste período, a quantidade de água removida pode ser diminuta e o tempo longo, visto que a secagem ocorre lentamente (IBARZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2003).

Dois modelos de secagem podem ser aplicados para o período de taxa de secagem decrescente. O primeiro é o modelo da frente de evaporação, adequado para materiais sem higroscopicidade e com poros de dimensões macroscópicas. O segundo é o modelo difusivo, adequado para umidade funicular e pendular (ver Figura 3.4) em capilares e microporos de um material higroscópico (KOWALSKI, 2001).

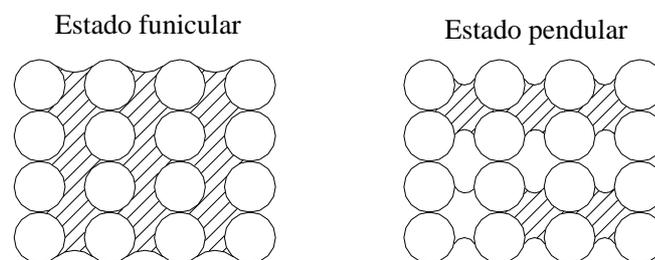


Figura 3.4 – Estados da umidade não ligada (adaptado de Strumillo; Kudra, 1986).

3.1.1 – Mecanismos de Migração da Umidade

Um tratamento teórico rigoroso da secagem de sólidos requer o conhecimento dos fatores que afetam o movimento do líquido e do vapor, sob determinadas condições térmicas (NONHEBEL; MOSS, 1971). As principais formas do transporte da umidade durante a secagem são (BROOKER; BABBER-ARKEMA; HALL, 1974; STRUMILLO; KUDRA, 1986):

- difusão de líquido: a taxa de transferência de umidade líquida é proporcional ao gradiente de concentração da umidade dentro do sólido;

- difusão de vapor: este é o principal mecanismo de transferência de umidade na forma de vapor no sólido. Isto ocorre em materiais em que a dimensão característica dos poros é maior do que 10^{-7} m;
- difusão térmica: difusão do vapor devido a diferenças na temperatura do sólido;
- efusão ou difusão do tipo Knudsen: esse transporte ocorre quando a dimensão característica dos poros é menor do que 10^{-7} m;
- forças capilares: uma diferença de pressão capilar, causada pelos capilares com vários raios, provoca uma contínua redistribuição da umidade, migrando dos mais amplos para os mais estreitos por sucção capilar, e
- gradiente de pressão: uma diferença na pressão interna, causada por uma evaporação local do líquido ou por uma condensação local do vapor, provoca o movimento da umidade para igualar as pressões. Este movimento ocorre de acordo com a lei de Darcy.

Além desses mecanismos de transporte de umidade, ocorrem, em determinados casos, o transporte devido à termodifusão, à gravidade e à pressão interna causada pelo encolhimento ou pressão externa (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

A Figura 3.5 mostra esquematicamente a diversidade de efeitos possíveis em um determinado poro cilíndrico.

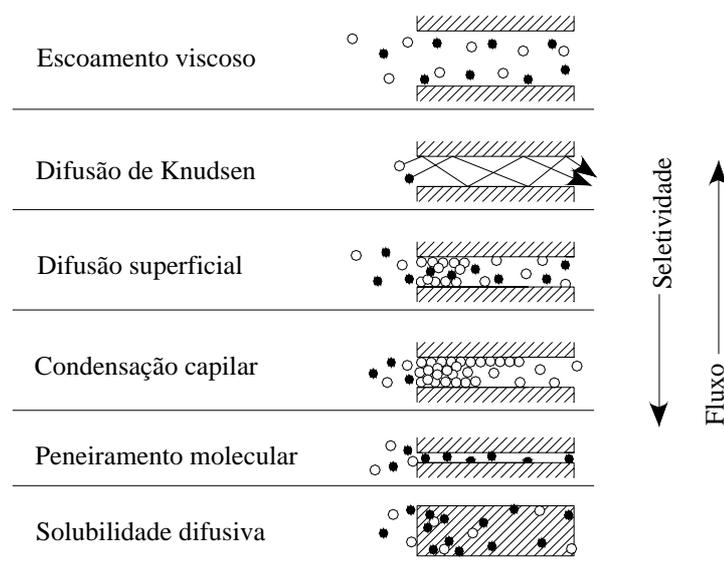


Figura 3.5 – Efeitos da difusão em poros (adaptado de Cussler, 1997).

O transporte através dos poros mais amplos (mostrados no topo da Figura 3.5) tende a ser mais rápido, decrescendo com a diminuição dos poros. Entretanto, um transporte rápido implica em menor seletividade (CUSSLER, 1997).

As condições externas e a estrutura interna do material submetido à secagem influenciam consideravelmente essa operação. Contudo, a influência destes fatores ocorre de forma diferente em cada período de secagem. Apesar da remoção da umidade pela evaporação da água na superfície do material ser essencial para a operação de secagem, a migração da umidade no interior do material úmido também deve ser considerada. As três condições de secagem, que consideram a evaporação e a difusão, são descritas a seguir (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

- Condições externas: a resistência à transferência de massa da camada limite gasosa é maior do que a resistência interna à migração da umidade. Desta forma, a intensidade de secagem depende principalmente das condições do lado gasoso. O processo de secagem é controlado pela transferência de calor e massa na superfície do sólido.

- Condições internas: a resistência à transferência de massa através do material é maior do que a resistência da difusão da camada limite gasosa. Assim, os parâmetros do material úmido influenciam fortemente a taxa de secagem.

- Condições internas e externas: as resistências à transferência de massa no ar e no material úmido são de mesma grandeza, isto é, os parâmetros do material úmido, assim como, os do ar devem ser considerados.

Os sólidos higroscópicos são mais suscetíveis à influência da resistência interna ao escoamento da umidade, para alguns materiais, em particular, produtos alimentícios, devido a estrutura interna e existência de casca (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

3.1.2 – Propriedades do Ar e do Sólido Úmido

As propriedades termodinâmicas do ar úmido e do sólido úmido são descritas a seguir.

3.1.2.1 – Propriedades do Ar

O meio de secagem frequentemente utilizado na secagem de grãos é o ar úmido, que é uma mistura de ar seco e vapor de água. O ar seco é constituído por um determinado número de gases, principalmente oxigênio e nitrogênio mais alguns componentes em menor concentração, tais como o argônio, neônio e o dióxido de carbono. O ar seco consiste em uma mistura gasosa com peso molecular médio de 28,966 g/mol sendo, a fração molar do oxigênio 0,2095; do nitrogênio 0,7809; do argônio 0,0093 e do dióxido de carbono 0,0003. Essas

proporções podem variar ligeiramente de acordo com a localidade, entretanto os valores citados acima são bastante precisos para os cálculos de engenharia (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974).

Além dos gases do ar seco, o ar úmido contém uma quantidade variável de vapor de água. Embora, a fração mássica do vapor de água no ar utilizado na secagem de grãos é sempre pequena, menor do que 0,1, a sua presença no ar tem um expressivo efeito na operação de secagem. Vários parâmetros são empregados para caracterizar as condições psicrométricas do ar úmido e estão descritos a seguir (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974).

Temperatura de bulbo seco: é a temperatura da mistura vapor-gás, determinada por um termômetro de bulbo seco (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Temperatura de bulbo úmido: é a temperatura de equilíbrio alcançada por uma pequena quantidade de líquido evaporado em uma grande quantidade de uma mistura de ar e vapor não saturada, a uma dada temperatura e umidade do ar. Nesta condição, a transferência de massa do líquido, por evaporação, é estabelecida, exatamente, pelo fornecimento de calor proveniente do ar (NONHEBEL; MOSS, 1971).

Umidade absoluta do ar: é a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco. O ar seco é utilizado como base porque sua massa não varia durante a secagem (STRUMILLO; KUDRA, 1986). Os valores da umidade absoluta do ar utilizado na secagem de grãos são relativamente baixos, variando entre 0,005 e 0,2 kg de água por kg de ar seco (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974).

Umidade relativa do ar: é a razão entre a pressão de vapor da água na mistura ar-água e a pressão de vapor de saturação da umidade à mesma temperatura e pressão (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974; STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Entalpia: a entalpia do ar úmido é definida como energia por unidade de massa de ar seco. É determinada pela soma da entalpia do ar seco com a entalpia da umidade nele contida (STRUMILLO; KUDRA, 1986). Geralmente, os valores de entalpia do ar utilizado na secagem de grãos estão entre 23,3 kJ/kg e 314 kJ/kg (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974).

A distinção entre as temperaturas de bulbo úmido da psicrometria e da

termodinâmica deve ser considerada. A temperatura de bulbo úmido psicrométrica é a temperatura do ar úmido indicada por um termômetro cujo bulbo é envolto por uma mecha de algodão úmida. A velocidade mínima do ar que passa sobre a mecha deve ser de 4,6 m/s. Já, a temperatura de saturação adiabática, termodinâmica, é a temperatura alcançada pelo ar úmido e pela água se o ar estiver saturado adiabaticamente pela evaporação da água. As temperaturas de bulbo úmido e de saturação adiabática do ar úmido são muito próximas (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974).

Assim, temperatura de saturação adiabática é a temperatura de equilíbrio que uma mistura de gás e líquido alcançará, sob condições adiabáticas. É necessária uma quantidade adequada de líquido na temperatura de saturação adiabática para que o estado de equilíbrio seja alcançado (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

3.1.2.2 – Propriedades do Sólido Úmido

Os materiais úmidos têm diferentes propriedades físicas, químicas, estruturais, mecânicas e bioquímicas que resultam das propriedades da matriz sólida e da água contida em seu interior. Apesar de todas as propriedades influenciarem a operação de secagem, na prática, as mais importantes são as propriedades mecânica-estruturais, o tipo de umidade contida no sólido e a intensidade das ligações entre matriz sólida e a umidade (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

O conteúdo de umidade do material pode ser definido pelas Equações (3.2) e (3.3), em base seca (X) ou úmida (U), respectivamente (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

$$X = \frac{m_A}{m_s} \quad \frac{(\text{kg umidade})}{(\text{kg sólido seco})} \quad (3.2)$$

$$U = \frac{m_A}{m} \quad \frac{(\text{kg umidade})}{(\text{kg sólido úmido})} \quad (3.3)$$

A relação entre o conteúdo de umidade em base seca e em base úmida é dada pelas Equações (3.4a) e (3.4b).

$$X = \frac{U}{1-U} \quad (a) \quad \text{ou} \quad U = \frac{X}{1+X} \quad (b) \quad (3.4)$$

Alguns valores característicos para o conteúdo de umidade são definidos a seguir (STRUMILLO; KUDRA, 1986):

- Conteúdo de umidade de equilíbrio (X_{eq}) é a umidade que está em equilíbrio com o vapor contido no ar de secagem. Teoricamente, é o conteúdo de umidade mínimo que o material pode apresentar em determinadas condições operacionais de secagem.
- Conteúdo de umidade crítico (X_{cr}): é a umidade característica na qual ocorre a mudança na taxa de secagem quando termina o período de secagem à taxa constante e começa o período à taxa decrescente.
- Conteúdo de umidade inicial (X_0): é o conteúdo de umidade do material no início da secagem.

Uma característica comum dos sistemas porosos é a presença de espaços vazios no material, denominados capilares ou poros. Para a caracterização dos materiais submetidos à secagem serão descritos a seguir, os parâmetros relevantes (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

- porosidade: é a razão entre o volume total dos espaços vazios e o volume total do material, expressa na Equação (3.5).

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V} \quad (3.5)$$

- tortuosidade: como os poros não são totalmente retos, o parâmetro tortuosidade é definido na tentativa de contabilizar a distância percorrida para a umidade atravessar os poros (CUSSLER, 1997). A Equação (3.6) define tortuosidade como a razão entre a dimensão do material em uma dada direção (L_s) e o comprimento do caminho percorrido pelo componente no processo de difusão, L_D (STRUMILLO; KUDRA, 1986). Os valores típicos de tortuosidade encontram-se entre dois e seis (CUSSLER, 1997).

$$\xi = \frac{L_s}{L_D} = \frac{D}{D_{ef}} \quad (3.6)$$

- fator de forma do poro: este parâmetro caracteriza o desvio da forma do canal de difusão quando comparado a um cilindro.

Os principais tipos de umidade em sólidos são (STRUMILLO; KUDRA, 1986):

- umidade superficial: consiste em uma fina camada de líquido sobre o material devido aos efeitos de embebição;

- umidade livre ou não ligada: em um material não higroscópico, toda a umidade interna encontra-se livre. Já, para um material higroscópico, onde a pressão de vapor é uma função da atividade de água, há umidade em excesso, em relação à umidade de equilíbrio, podendo chegar à umidade de saturação. A umidade livre no interior do sólido encontra-se de duas formas (ver Figura 3.4): no estado funicular (existe um estado contínuo de líquido dentro da matriz porosa) ou no estado pendular (o líquido ao redor e entre as partículas está descontínuo e, portanto, a umidade é intercalada com bolhas de ar);

- umidade ligada ou higroscópica: o líquido exerce uma pressão de vapor menor do que o líquido puro, a uma dada temperatura (retenção em pequenos poros, solubilização nas paredes das células, adsorção física ou química).

Os tipos de ligações entre a umidade e a matriz sólida podem ser: ligação química, ligação físico-química e ligação físico-mecânica. O trabalho necessário para remover um mol de umidade de um dado material decresce a partir da ligação química, ou seja, é mais fácil remover a umidade ligada por forças físico-mecânicas (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

3.2 – Secadores

A maior parte da secagem e acondicionamento da produção agrícola é realizada por meios artificiais. Produções expressivas e a necessidade de estocar em períodos de tempo prolongados demandam um alto grau de controle sobre a qualidade do produto final (PARRY, 1985).

A secagem artificial de grãos proporciona inúmeras vantagens, que são citadas a seguir (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974):

- antecipar o período de colheita, o que reduz as perdas no campo devido à intempéries;
- possibilitar a estocagem de produtos por um longo período de tempo sem deteriorações;
- possibilitar a comercialização com preços maiores em poucos meses após a colheita; é comum um aumento de 25 a 100% nos preços dos grãos após o período de colheita;
- manter a viabilidade do grão: a redução da umidade diminui a possibilidade de aquecimento natural do grão devido à respiração e de redução ou destruição do potencial de

germinação;

- permitir ao produtor a venda de um produto de melhor qualidade.

Vários tipos de secadores são utilizados para a secagem de grãos. O tipo de secador mais empregado faz uso do escoamento de ar através do leito. Os secadores convectivos são classificados em duas categorias: secadores de batelada e secadores contínuos. Os secadores de escoamento contínuo são usualmente classificados de acordo com as direções relativas do escoamento, como mostra a Figura 3.6, dos grãos (seta preenchida) e do ar (seta vazada): escoamento cruzado, escoamento concorrente e escoamento contracorrente. Nos secadores de escoamento cruzado, o escoamento do ar é perpendicular ao escoamento dos grãos (PARRY, 1985).

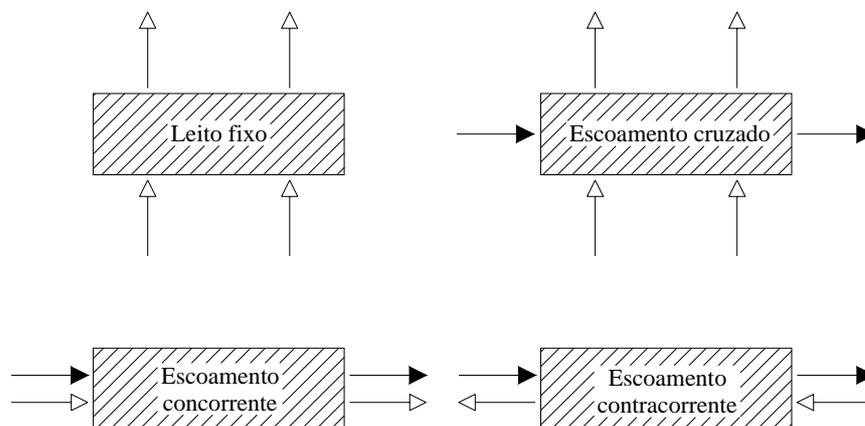


Figura 3.6 – Esquema dos quatro tipos básicos de secadores convectivos (adaptado de Parry, 1985).

Todos os tipos de secadores convectivos empregam soprador, ou algum equipamento similar, para movimentar o ar através da câmara de secagem. Em muitos secadores de escoamento contínuo, os grãos escoam pelo secador sob a ação do campo gravitacional (PARRY, 1985). A utilização de ar aquecido em secadores facilita a secagem, possibilitando que a umidade relativa do ar esteja suficientemente baixa para remover a umidade do sólido. A umidade relativa do ar atmosférico é reduzida, aproximadamente, à metade a cada 11°C de acréscimo na temperatura. Assim, a extensão da secagem depende da temperatura do ar e do tempo de exposição do produto ao ar aquecido (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974).

Vários parâmetros influenciam o tempo requerido para reduzir o conteúdo de umidade ao valor desejado. Dentre eles, a temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar de secagem e o conteúdo de umidade inicial e final do material (BROOKER; BAKKER-

ARKEMA; HALL, 1974). A taxa e a eficiência da secagem dependem da temperatura e da umidade do ar de secagem. Portanto, é importante entender o que acontece com esses dois parâmetros durante o processo de secagem para que temperaturas de operação seguras possam ser determinadas para um dado tipo de secador (PARRY, 1985).

A temperatura do ar deve ser mantida abaixo de um valor máximo, o qual está relacionado com a finalidade da secagem de determinado grão, ou seja, à que ele destina-se. Geralmente, a máxima temperatura recomendada para a secagem de grãos destinados à comercialização de sementes é de 43°C (uma temperatura de 52°C poderá destruir o gérmen de muitos grãos). Já, para grãos destinados à moagem, a temperatura máxima recomendada é 60°C. Essas limitações de temperatura dos grãos são difíceis de se aplicar na prática e, apesar da importância da temperatura do grão, as recomendações de temperaturas que evitam deteriorações são estabelecidas com base na temperatura do ar de secagem. Durante a secagem, o centro do grão está a uma temperatura menor do que a temperatura do ar. Contudo, no estágio final da secagem, a temperatura do grão aproxima-se da temperatura do ar (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974).

Taxas de secagem excessivas ou altas temperaturas do grão podem causar prejuízos físicos e químicos ao produto (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974).

O interesse em utilizar a vibração para intensificar a transferência de quantidade de movimento, calor e massa em processos na engenharia química é bastante amplo na atualidade. Geralmente, a intensificação das transferências nos processos pela vibração está baseada em dois fenômenos, descritos a seguir (STRUMILLO; KUDRA, 1986):

- aumento da turbulência na camada limite: causa o aumento dos coeficientes de transferência. Entretanto, essa influência é positiva somente quando o expoente do número de Reynolds é maior do que um. Se o expoente do número de Reynolds na equação adimensional para os números de Sherwood ou Nusselt ($Sh = aRe^b$ ou $Nu = aRe^b$) for menor do que a unidade, poderá ocorrer uma diminuição nos coeficientes de transferência.

- aumento da área interfacial: o aumento na área é causado pela ação vibracional na estrutura do leito.

Nos secadores denominados secadores de leito vibrado o leito é vibrado sob uma aceleração maior do que a aceleração da gravidade e quando a secagem ocorre sem escoamento de ar ou com ar escoando sobre o material ou através do material, com velocidade

menor do que a velocidade mínima de fluidização. Entretanto, se a velocidade do ar exceder o valor da velocidade mínima de fluidização, os secadores são denominados secadores de leito vibro-fluidizado (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Os secadores de leito vibrado possibilitam que seja aumentada, substancialmente, a razão entre o comprimento e a largura dos equipamentos onde ocorre o escoamento pistonado, quando comparados aos secadores de leito fluidizado. Isto se deve à diminuição da dispersão da distribuição do tempo de residência. Assim, os secadores operam como transportadores vibratórios (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Em um secador de leito vibrado, a intensificação dos mecanismos de transporte de calor e massa está relacionada principalmente com os parâmetros vibracionais, visto que o escoamento do ar exerce, apenas, uma pequena influência na dinâmica do leito. O uso de uma aceleração vibracional consideravelmente maior do que a aceleração da gravidade causa uma influência positiva na transferência de calor e massa. Esse aumento deve-se ao favorecimento da estrutura do leito à transferência de calor e massa (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

3.3 – Distribuição do Conteúdo de Umidade

A operação de secagem tem como objetivo a retirada de umidade do material até um nível seguro para a estocagem, sem a ocorrência de qualquer deterioração significativa no produto (SHARP, 1982). A redução no conteúdo de umidade, consideravelmente abaixo desta especificação, implica em um aumento do consumo de energia (para evaporar a água extra), tempos de residência proporcionalmente maiores no secador (significando utilização pobre da planta), menor massa e, potencialmente, qualidade do produto inferior, quantificada pela reidratação e perda na cor (CRONIN, 1998). Já um conteúdo de umidade acima do limite permitido é inaceitável, requerendo uma nova secagem devido à possibilidade de propiciar o desenvolvimento de mofo e a infestação de pragas e insetos e, portanto, causando prejuízos para o produto armazenado (PARRY, 1985; CRONIN, 1998).

Entretanto, na prática, não é possível alcançar um conteúdo de umidade uniforme para o produto. Alguma variabilidade no conteúdo de umidade é inevitável, surgindo da heterogeneidade intrínseca do alimento e da natureza estocástica do processo de secagem de alimentos. Em particular, uma dispersão na distribuição no conteúdo de umidade inicial do produto alimentício, a variabilidade nas propriedades do produto devido à sua origem

biológica e às variações randômicas: nas condições de geometria, na secagem, no fluido de secagem, contribuem para a incerteza na saída (CRONIN, 1998).

Secadores em leito fixo, muito utilizados na secagem de café, promovem um gradiente de umidade no seu interior, exemplificado na Figura 3.7, onde a distribuição de umidade, nos sólidos, tende a ser bastante ampla, com parte das sementes apresentando conteúdo de umidade acima do permitido (CARVALHO; NAKAGAWA, 1980).

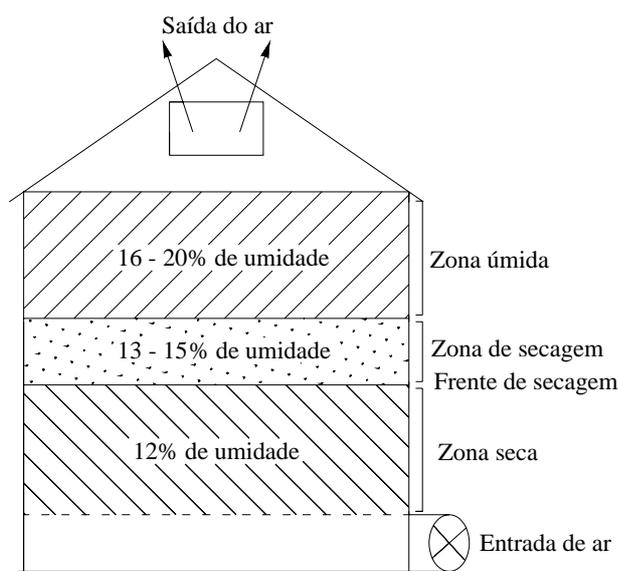


Figura 3.7 – Zonas de secagem em uma massa de grãos (adaptado de Carvalho; Nakagawa, 1980).

O termo “conteúdo de umidade do grão” refere-se, na comercialização e na tecnologia de secagem de grãos, ao conteúdo de umidade médio de uma amostra. Estudos recentes estabeleceram que existe uma variância significativa no conteúdo de umidade entre grãos individuais. Assim, além do conteúdo de umidade médio, a variação do conteúdo de umidade entre os grãos também deve ser considerada na avaliação dos processos de secagem e armazenagem de grãos (LIU; MONTROSS; BAKKER-ARKEMA, 1997).

3.4 – Tecnologia da Secagem de Café

Uma das principais etapas do processamento de frutos de café é a secagem, pois dela dependem a qualidade dos grãos e da bebida e, conseqüentemente, sua cotação nos mercados nacional e internacional, já que, o café tem seus preços baseados em parâmetros qualitativos, majorando o valor consideravelmente com a melhoria da qualidade, a qual é também um fator limitante para a exportação (CARVALHO; CHAGAS; SOUZA, 1997).

A operação de secagem é afetada pelas características iniciais da matéria prima, como o grau de maturação, teor de umidade e propriedades físicas do fruto de café, e por isso a colheita deve ser realizada observando-se a maturação ideal (café cereja) e os cuidados para evitar a contaminação por microrganismos. O café é classificado como uma fruta, com todas as condições de perecibilidade, devido ao teor de umidade e à composição de açúcares de sua polpa. Entretanto, o processamento do café após a colheita assemelha-se ao de outros grãos, que já são colhidos secos ou quase secos (VILELA, 1997).

3.4.1 – Caracterização do Fruto de Café

As principais características que distinguem o café de outros grãos são: umidade inicial alta (60-70%), estrutura complexa do fruto (camadas de diferentes tecidos e teores de umidade, com a polpa e a mucilagem muito úmidas e, logo após, um tecido celulósico duro que encobre uma semente com 50% de umidade), a redução de volume durante a secagem (30-40%) e o tamanho desuniforme dos grãos (VILELA, 1997).

No início de sua formação, o fruto tem cor verde, passando depois a vermelho vivo (cereja), ao vermelho escuro (passa) e finalmente seca escurecendo totalmente (coco), BARCA (1998).

O fruto de café é considerado uma drupa, ou seja, um fruto carnudo que apresenta caroço rígido. Normalmente, o café apresenta formato ovóide e possui duas sementes plano-convexas (sementes chatas) envoltas por finas películas e pela casca. Quando ocorre o abortamento de um lóculo, forma-se uma única semente arredondada, denominada de moca (MATIELLO, 1991). A Figura 3.8 apresenta um esquema da estrutura de um fruto de café.

A camada mais externa de um fruto de café cereja é a casca ou um pericarpo fino, que reveste a polpa fibrosa do fruto. Depois da polpa, há uma camada de mucilagem, com aproximadamente 0,8 mm de espessura, translúcida e incolor. A mucilagem não tem uma estrutura celular definida e assemelha-se a um gel amorfo. A mucilagem recobre uma fina camada amarelada denominada pergaminho ou endocarpo. Finalmente, uma camada muito fina de cor prata, denominada película prateada, reveste a semente do café verde. Assim, os processos que envolvem a transferência de calor e massa no fruto de café inteiro são diferentes de outros grãos, tais como o trigo, a soja e o milho, que possuem a estrutura da semente bastante diferente (GUIMARÃES; BERBERT; SILVA, 1998).

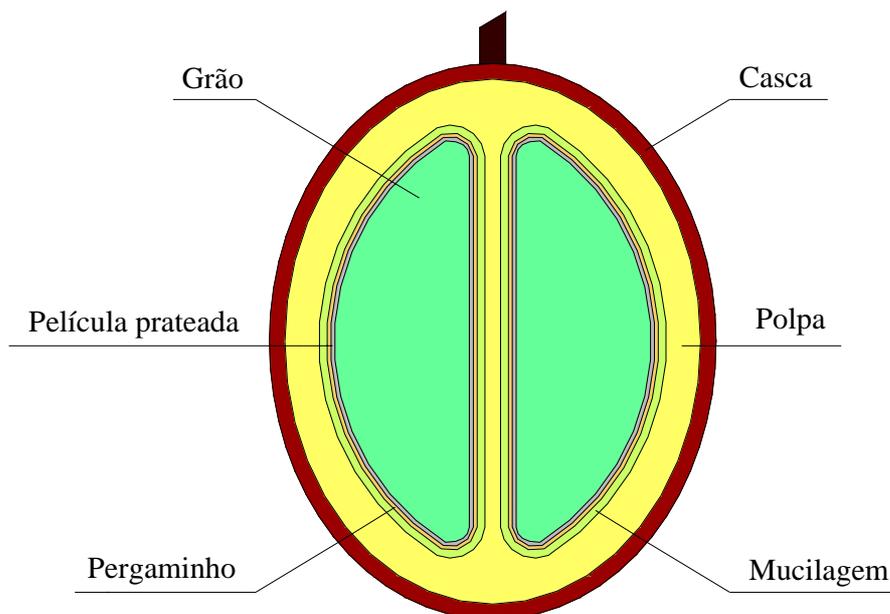


Figura 3.8 – Esquema da estrutura de um fruto de café.

O café, em termos práticos, em estágios avançados de secagem, pode ser dividido em duas camadas distintas: a casca exterior e o pergaminho, separados entre si por um espaço de ar. Durante a secagem, a umidade do centro do fruto de café tem que se mover através do pergaminho, do espaço de ar e da casca exterior, antes de sair do fruto. Esta migração da umidade é o resultado de um gradiente de concentração estabelecido entre a superfície exterior da casca e o interior do pergaminho. Desta forma, as taxas de transferência de umidade são limitadas pelas resistências do pergaminho e da casca (VARADHARAJU; KARUNANIDHI; KAILAPPAN, 2001).

Essas características tornam a secagem de café uma operação difícil e que exige cuidados especiais como, por exemplo, operar em temperaturas baixas (secadores mecânicos), com a temperatura do fruto não ultrapassando 45°C (VINCENT, 1987).

3.4.1.1 – Variedades de Café

O cafeeiro é uma planta dicotiledônea, da família das *Rubiáceas* e do gênero *Coffea*. As espécies do gênero *Coffea* podem ser agrupadas em quatro grupos: *Eucoffea*, *Mascarocoffea*, *Argocoffea* e *Paracoffea*. O grupo *Eucoffea* compreende as espécies que possuem cafeína e o *Mascarocoffea* inclui as espécies provenientes de Madagascar, apresentando baixo teor de cafeína. O grupo *Eucoffea* é o de maior importância econômica, abrangendo as espécies mais cultivadas para o consumo de café (MATIELLO, 1991).

No gênero *Coffea* existem 80 ou mais espécies, sendo 25 provenientes do continente africano e 55 de Madagascar e Ilhas Mascarenhas. Tais espécies, embora não apresentem expressão comercial, são importantes para o melhoramento genético, constituindo-se em reservas gênicas de resistência às pragas, doenças e condições adversas do ambiente (DE GASPARI-PEZZOPANE; MEDINA FILHO; BORDIGNON, 2004).

As duas espécies de importância comercial são *Coffea arabica* (que é a mais cultivada no mundo por sua excelente qualidade e sabor) e *Coffea canephora* (sendo as variedades mais importantes desta espécie a *Coffea robusta* e a *Conillon*). As duas espécies são conhecidas no mercado internacional como arábica e robusta (SMITH, 1985). O café arábica é o mais cultivado e comercializado, consistindo em cerca de 70% do total (MATIELLO, 1991).

As principais variedades do *Coffea arabica* são: *Typica* (considerada a variedade fundamental e também conhecida pelos nomes de café comum, nacional, crioulo, Brasil); *Bourbon* (conhecida também pelo nome de café Java; produz frutos com sementes um pouco menores e mais arredondadas que os da variedade *Typica*); Mundo Novo; Caturra; Maragogipe (fornece bebida de qualidade fraca); Cera; Catuaí; Icatú; *Blue Mountain* (esta variedade alcança altos preços no mercado internacional devido a sua excelente bebida); Acaiá (BARCA, 1998).

3.4.2 – Colheita

O objetivo dos produtores e dos exportadores de café é obter um produto de boa qualidade e mantê-la ao longo de todas as etapas de processamento dos frutos de café (PALÁCIOS-CABRERA *et al.*, 2004).

Sabe-se que a qualidade dos frutos e dos grãos, além dos cuidados na lavoura, está também relacionada à ausência da ação dos microrganismos, desde a colheita dos frutos até a estocagem dos grãos. Por isso, para evitar a proliferação dos microrganismos, que provocam a fermentação da polpa açucarada do café, os frutos devem ser colhidos e imediatamente processados (ILLY, 2002; VINCENT, 1987).

Segundo Silva e Berbert (1999), a colheita deve ser iniciada quando a maior parte dos frutos estiverem maduros e antes que se inicie a queda dos frutos. Normalmente, o período de colheita acontece sete meses após a floração que, por sua vez, ocorre com as

primeiras chuvas (setembro a novembro).

Os frutos de café são colhidos em diferentes conteúdos de umidade, variando de 50 a 70% (base úmida) para maduros (cerejas); 35 a 50% para frutos “passa”; e 16 a 30% para frutos secos no cafeeiro. Ao final da secagem o conteúdo de umidade deve ser de 12% (base úmida), para evitar a fermentação e o crescimento de mofos nos grãos e subsequente produção de micotoxinas (PALÁCIOS-CABRERA *et al.*, 2004).

Segundo Jham e colaboradores (2001), o estágio de maturação dos frutos e a operação de secagem são os principais aspectos que afetam a qualidade da bebida de café. Vincent (1987) recomenda que a colheita deve ser realizada somente com frutos maduros, caso contrário não será obtido uma bebida fina.

Segundo Camargo e Telles Jr. (1953), todo café proveniente da espécie *Coffea arabica*, que for colhido na cor típica do amadurecimento (vermelha ou amarela dependendo da variedade) apresentará uma bebida de finíssimo paladar. Entretanto, para isso será necessário que durante a secagem o café não sofra fermentação em sua polpa açucarada e na mucilagem, pois segundo Scholz, Androcioli Filho e Carneiro Filho (2000), devido a sua composição química com altos teores de açúcar e mucilagens, o fruto de café úmido se constitui em um meio de cultura rico, propício para o desenvolvimento de microrganismos. Quando os frutos estão úmidos observa-se uma sucessão de fermentações favorecidas pelas condições de anaerobiose. Primeiramente ocorre fermentação alcoólica (odor de álcool etílico), e em seguida ocorre a fermentação acética (odor de vinagre). O manejo inadequado do café levará à fermentação butírica, caracterizada pelo odor desagradável, a qual é uma das principais causas da deterioração do café e da má qualidade da bebida. Se a fermentação atinge o endocarpo ocorre a degradação de componentes do grão que alteram negativamente o aroma e o sabor da bebida de café. Quando a fermentação se restringe somente à polpa e à mucilagem ocorre degradação dos açúcares da mucilagem com a formação dos ácidos lático e acético.

Cafés processados, cuja colheita incorporou frutos verdes, maduros e muito maduros simultaneamente, não produzem bebidas finas, sendo estas freqüentemente classificadas como duras (VINCENT, 1987).

Segundo Barca (1998), o processo mais eficiente quanto à qualidade da bebida final é a colheita a dedo, onde são retirados dos cafeeiros somente os frutos maduros (cereja). Isto é

explicado pelo fato de que somente o fruto de café no estágio “cereja” apresenta a composição química completa da casca, da polpa e da semente (VILELA, 1997).

A colheita por derriça na produção do café natural deve começar quando a maioria dos frutos passarem do estágio de maduro e tenham secado, aproximadamente, até 65 a 70% (bu). Neste estágio, o café cereja, que está relativamente seco na superfície fica fácil de ser manuseado. Na derriça manual, o colhedor corre a mão parcialmente fechada ao longo do ramo, recolhendo todos os tipos de frutos e evitando que as folhas sejam retiradas. A colheita mecanizada, apesar de estar sendo desenvolvida e praticada com alguma intensidade em regiões de topografia plana, é ainda pouco significativa no Brasil, onde a maioria dos frutos de café é colhida pelo sistema de derriça manual (SILVA; BERBERT, 1999).

O café, depois da colheita tanto por derriça ao chão, quanto no pano ou colheita mecanizada, deverá ser submetido imediatamente aos processos de separação das impurezas (paus, terra, pedras, folhas). O café deve passar pelo separador hidráulico, em que a separação é feita de acordo com o estágio de maturação dos frutos, ou seja, separando os cafés bóias (secos, brocados, mal formados e verdes) dos frutos perfeitos ou cerejas, que devem ser secados e armazenados separadamente. A lavagem ou separação é uma operação importante, tanto para o preparo por via seca quanto por via úmida, pois, além de manter o potencial de qualidade do café recém-colhido, reduz o desgaste das máquinas durante o descascamento, a secagem e o beneficiamento. Pré-processamento por via seca, seca integralmente os frutos, dando origem aos cafés denominados coco ou de terreiro. O pré-processamento por via úmida dá origem aos cafés descascados/lavados e despulpados (SILVA, 2000).

3.4.3 – Secagem

Utilizam-se basicamente dois métodos para secagem de frutos de café: secagem natural em terreiros ou secagem artificial utilizando secadores mecânicos. No terreiro, o desenvolvimento de microorganismos na superfície dos frutos e o aumento da respiração e da temperatura do produto são fatores que aceleram o processo de fermentação. Apesar desses riscos, pequenos e médios produtores utilizam intensamente os terreiros como única etapa na secagem do café (SILVA, 2000).

Os cafés colhidos por derriça apresentam frutos com diferentes estágios de maturação e com diversos teores de umidade. Como essa desuniformidade dificulta a secagem

deve-se adotar as operações de lavagem e separação visando a obtenção de cafés de cor e secagem uniformes (MATIELLO, 1991).

A temperatura do ar de secagem é o fator limitante para a taxa da secagem. A alta temperatura no início da secagem pode induzir a formação dos grãos fétidos, um defeito indesejável no café verde. Vários autores recomendam a secagem a baixas temperaturas do ar, por exemplo, 55°C, já que a utilização de altas temperaturas provoca a obtenção de um produto de baixa qualidade (grãos avermelhados com película prateada marrom, responsável pela bebida de cheiro desagradável). O mesmo ocorre na secagem à temperatura de 60°C se o fluxo de ar for insuficiente. Na secagem de café coco, com baixa umidade (20 a 30 %), deve-se evitar temperaturas do ar superiores a 80°C porque provocam deterioração no sabor da bebida (VINCENT, 1987).

A secagem em secadores mecânicos apresenta algumas vantagens, em relação à secagem realizada ao sol, como por exemplo: redução do tempo de secagem; viabilização dessa operação mesmo em períodos chuvosos e em regiões úmidas; evita interferências climáticas na qualidade do café; redução da área de terreiros e diminuição da mão de obra. As desvantagens são: maior investimento em equipamentos e custo adicional de energia e lenha (MATIELLO, 1991).

Segundo Matiello (1991), o café antes de ser colocado no secador deve passar por uma operação de pré-secagem no terreiro até atingir 40% de umidade, principalmente se a população for constituída por cerejas e verdes com alto teor de umidade (60 a 65%).

Devido a esse alto conteúdo de umidade, os frutos de café cereja não escoam facilmente nos equipamentos de alimentação (calhas, funis, elevadores da caneca, eixos helicoidais) e em secadores convencionais (GUIMARÃES; BERBERT; SILVA, 1998). A carga e a compactação do leito no interior do secador podem provocar o desprendimento da polpa e da mucilagem, fazendo com que ocorra aderência dos grãos e, por isso, provoquem problemas por entupimento. A pré-secagem também melhora o aproveitamento da capacidade do secador, visto que o volume dos frutos de café é reduzido em 30-40%. Outro fator importante é a deterioração dos frutos, caso haja a necessidade de interrupção da operação do secador com os grãos ainda úmidos e quentes (VILELA, 1997).

Segundo Vilela (1997), a secagem direta de cafés em secadores, quando há grande quantidade de cafés verdes (imaturos), sem haver uma pré-secagem promove o escurecimento

do grão. No beneficiamento este grão recebe a denominação de preto-verde, sendo classificado como se fosse ardido, ou seja, o número de defeitos aumenta consideravelmente (dois grãos ardidos equivalem a um defeito, enquanto que para os grãos verdes são necessários cinco grãos para contabilizar um defeito).

Portanto, o processo típico de secagem do café no Brasil consiste em dois estágios diferentes. No primeiro estágio, os frutos de café cereja intactos, recentemente colhidos, são espalhados nos terreiros pavimentados onde secam sob radiação do sol até que alcancem 35-30% (bu). No segundo estágio o café pode ser seco em secadores mecânicos ou em secadores de leito fixo até aproximadamente 13% (bu), produzindo o café coco (GUIMARÃES; BERBERT; SILVA, 1998).

Segundo Vilela (1997), o conteúdo de umidade final do café deve estar entre 11 e 13% (bu). Para umidades acima de 13%, os grãos de café perdem a cor (tornam-se esbranquiçados) mais rapidamente durante o armazenamento, prejudicando a qualidade do grão. Já, para conteúdo de umidade abaixo de 11% há um gasto maior com mão de obra, espaço do terreiro (ou maior gasto de energia no secador), além da perda de peso e quebra dos grãos no beneficiamento. Um litro de grãos de café secos deve pesar cerca de 0,420 kg. Segundo Matiello (1991), a secagem excessiva aumenta o aparecimento de grãos quebrados, provoca a perda de peso do café e depreciação de seu valor, este último devido ao mau aspecto (grãos manchados e esbranquiçados), além da difícil conservação.

A temperatura dos grãos na secagem deve ser mantida próxima aos 45°C, a qual é diferente da temperatura do ar quente insuflado no secador. No início da secagem, a alta umidade dos grãos impede o aumento rápido da temperatura da massa de café devido à evaporação da água. Assim, a massa de café mantém-se a temperaturas inferiores à do ar de secagem (MATIELLO, 1991).

Na literatura existem recomendações que a temperatura do ar de secagem não seja superior a 80°C, o que afeta bastante o sabor e o aroma (*flavor*) da bebida. A secagem pode ser efetuada em diversos tipos de secadores. Os secadores verticais são mais utilizados e existem diversas variações (VINCENT, 1987), dentre elas o secador vertical de escoamento cruzado com câmaras de descanso, secador de leito fixo e existe ainda a opção por secador cilíndrico rotatório (VILELA, 1997). A Figura 3.9 apresenta um tipo de secador vertical, com dispositivo para vibrar o leito, operando em escoamento cruzado.

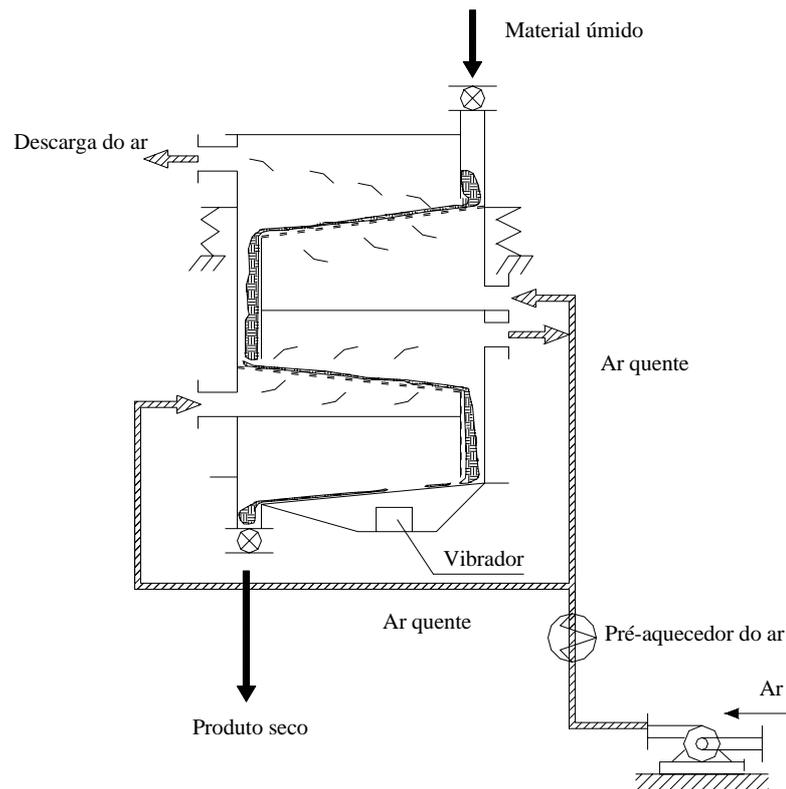


Figura 3.9 – Secador vertical com escoamento cruzado (adaptado de Erdész, 1991).

A taxa de secagem depende do estágio de processamento. No início da secagem a taxa é mais rápida do que ao final devido à facilidade de perda de umidade na superfície dos frutos de café. À medida que a casca, a polpa e a mucilagem perdem umidade, tornam-se escuras, rígidas e encolhem provocando a formação de espaços ocupados por ar, o que causa um aumento da resistência à transferência de calor e à difusão de umidade (VILELA, 1997).

O tempo de secagem em secadores também é muito grande quando comparado com a secagem de outros produtos agrícolas. O tempo de secagem varia de 24 a 72 horas, devido principalmente, à alta umidade inicial, à heterogeneidade da matéria prima e às características internas do fruto de café (VILELA, 1997). Se o café for retirado ainda quente do secador, a secagem pode ser encerrada com os grãos apresentando de 13 a 13,5% de umidade, pois posteriormente o café perde de 1 a 2% de umidade (MATIELLO, 1991).

A secagem é uma operação importante no processamento de muitos produtos alimentícios, principalmente no processamento de frutos de café, já que ela está intimamente ligada com a qualidade do grão e também da bebida de café. As principais pesquisas sobre secagem de café encontradas na literatura são citadas a seguir.

Berbert e colaboradores (1994) investigaram a utilização da inversão da direção de escoamento do ar em intervalos de tempo regulares durante a secagem de café em secador de leito fixo para reduzir a distribuição do conteúdo de umidade final do produto.

Berbert e colaboradores (1995) desenvolveram um modelo matemático para simular a secagem de café com inversão na direção do escoamento do ar de secagem, concluindo que a inversão tem um pequeno efeito no consumo de energia e no tempo total de secagem, quando comparada com métodos tradicionais (unidirecional), mas diminui consideravelmente a dispersão na distribuição de umidade final do café.

Guimarães, Berbert e Silva (1998) investigaram a conveniência da combinação da temperatura alta (no início da secagem) e temperatura ambiente (estágio final) do ar na secagem de café em secador de leito fixo para reduzir a umidade e manter a qualidade do café, entretanto ela é recomendada para café com conteúdo de umidade abaixo de 26% (bu), visto que em um dos testes houve constatação de aquecimento da massa de café devido ao desenvolvimento de fungos.

Afonso Jr. e colaboradores (2000) estudaram o efeito da redução do conteúdo de umidade dos frutos de café sobre: a área superficial, o volume e o diâmetro da esfera equivalente para diferentes variedades de frutos de café, concluindo que as variedades apresentam comportamentos diferentes durante o encolhimento.

Varadharaju, Karunanidhi e Kailappan (2001) efetuaram a secagem de café cereja em secador de camada delgada em diferentes temperaturas do ar de secagem, determinaram o coeficiente de difusão e verificaram que a qualidade da bebida de café não foi alterada na faixa de temperatura do ar estudada (40, 50, 60 e 70°C).

Sfredo (2002), estudando a secagem de café em sistema vibrado, concluiu que a vibração associada à secagem com manutenção da temperatura do fruto em 45°C melhora a qualidade dos grãos de café verde pela diminuição do número de defeitos nas amostras e também pela qualidade da bebida, testada por perito na prova de xícara.

Sfredo, Finzer e Limaverde (2005) compararam a secagem de café cereja em secador batelada com leito fixo vibrado e não vibrado e concluíram que a vibração diminui o tempo de secagem e aumenta os coeficientes de transferência de calor e massa e a difusividade efetiva dos frutos de café.

Outros trabalhos envolvendo a secagem de café em leitos móveis, ou seja, com os frutos ou grãos escoando no interior do secador são disponíveis na literatura: Finzer; Menezes; Limaverde (1997); Finzer e colaboradores (1998); Menezes e colaboradores (1998).

Finzer e colaboradores (2003) estudaram a influência da frequência de vibração na secagem de frutos de café e concluíram que a vibração aumenta a vazão mássica no decorrer da secagem, sendo necessário diminuir a frequência de vibração das bandejas, para manter o escoamento contínuo do leito; nos trabalhos foram utilizados secadores com menores possibilidades de realização do controle do escoamento do café: grãos e frutos.

Zactiti e colaboradores (2004) estudaram o comportamento de frutos de café submetidos à secagem, com fornecimento de energia por radiação, condução e convecção e concluíram que ao utilizar a condução-convecção o tempo de secagem foi reduzido em 50%.

3.4.4 – Beneficiamento

O fruto do café seco é armazenado até ser comercializado. O armazenamento do café em coco ou em pergaminho, pelo menos durante um mês, é necessário para, além de regular a oferta na comercialização, permitir que a umidade seja uniformizada entre os grãos (MATIELLO, 1991).

Os grãos de café armazenados são sementes vivas e, portanto, mantêm o processo de respiração celular. No caso do café coco, a casca, o pergaminho e as películas atuam como proteção natural contra as variações das condições ambientais, tornando-os menos suscetíveis à deterioração do que o café pergaminho e o grão. O café pergaminho, cujos grãos são mais tensionados durante o processamento, perde rapidamente a cor, sendo que o tempo máximo de armazenagem recomendado para o café pergaminho é de um ano e para o grão é de seis meses. A perda de cor ou branqueamento é resultado da morte dos tecidos do grão (MATIELLO, 1991).

A operação de beneficiamento é a primeira operação pela qual passa o café, depois da secagem (em coco). O beneficiamento do café consiste na limpeza preliminar (efetuada em um equipamento vibratório denominado “bica de jogo”); descascamento; separação pneumática das cascas; classificação por conformação (chatos e mocas) e por tamanho (miúdo, médio e graúdo). O descascador de café funciona por atrição e a casca do café é desintegrada por atrito de uns contra os outros e também contra as saliências dos discos do

descascador. Normalmente o café em coco antes de ser descascado deve passar por uma seleção de tamanho (pequeno, médio e graúdo) de modo que a regulagem do descascador seja mais precisa. Após a separação pneumática das cascas, o café é submetido a um sistema de peneiras padronizadas de 8 até 18. Para exemplificar, a peneira 16 corresponde a 16/24 polegadas (BARCA, 1998). As peneiras de crivos redondos retêm os grãos chatos e as peneiras de crivos alongados retêm os grãos mocas (MATIELLO, 1991).

A Tabela 3.1 apresenta a classificação por tamanho e conformação do café nas várias peneiras.

Tabela 3.1 – Classificação dos grãos de café (BARCA, 1998).

Classificação	Peneiras
chato e graúdo	17 e 18
chato e médio	15 e 16
chato e miúdo	14 e 13
moca e graúdo	11 e 12
moca e médio	10
moca e miúdo	9 e 8

O grão de café de conformação chata é oriundo de frutos que apresentam duas sementes com desenvolvimento normal. O seu comprimento é um pouco maior do que sua largura, sua parte dorsal é convexa e sua parte ventral é plana ou levemente côncava, com uma ranhura central, disposta no sentido longitudinal. Já, o grão denominado moca é proveniente da falta de fecundação de um óvulo, restando apenas uma semente no interior do fruto. Essa semente desenvolve-se ocupando o espaço vazio deixado pelo óvulo não fecundado e por isso torna-se arredondada e mais comprida (MATIELLO, 1991).

A Tabela 3.2 apresenta a ordem em que as peneiras devem ser sobrepostas para efetuar-se a classificação quanto à conformação e tamanho da fava.

Segundo Barca (1998), após a classificação efetua-se uma seleção manual ou eletrônica que visa separar os grãos com defeitos e também impurezas. O café é, ainda, classificado em um tipo. Isto é efetuado detectando-se o número de defeitos encontrados em uma amostra de trezentos gramas.

A Tabela 3.3 apresenta a descrição dos defeitos identificados nos grãos. Nesta classificação, são estabelecidos sete tipos, desde o tipo dois com quatro defeitos até o tipo oito com 360 defeitos.

Tabela 3.2 – Disposição das peneiras para classificação de grãos de café verde (MATIELLO, 1991).

Peneiras	Forma
19/20	chato
13	moca
18	chato
12	moca
17	chato
11	moca
16	chato
10	moca
15	chato
9	moca
14	chato
8	moca
13	chato
12	chato
11	chato
10	chato
9	chato

Tabela 3.3 – Descrição de defeitos extrínsecos e intrínsecos (BARCA, 1998).

Defeitos extrínsecos	Defeitos	Defeitos intrínsecos	Defeitos
1 pedra, pau ou torrão grande	5	1 grão preto	1
1 pedra, pau ou torrão médio	2	2 grãos ardidos	1
1 pedra, pau ou torrão pequeno	1	2 a 5 grãos brocados	1
1 coco	1	3 conchas	1
1 casca grande	1	5 verdes	1
2 marinheiros	1	5 quebrados	1
2 a 3 cascas pequenas	1	5 chochos ou mal granados	1

O café destinado à exportação, muitas vezes, é submetido à operação de brunimento. Esta operação consiste em uma umidificação preliminar da película prateada, o que é efetuado com injeção de vapor. Segue-se a secagem da umidade superficial por transferência de calor através de radiação infravermelho, enquanto os grãos de café escoam por uma correia transportadora. O brunimento consiste na passagem de café inicialmente em cilindros de ferro fundido, sendo o polimento final efetuado em cilindros de bronze grafitado, o que dá mais brilho ao café. Os estudos já efetuados não evidenciam uma melhoria na qualidade da bebida, apenas melhora o tipo e o aspecto dos grãos de café (TEIXEIRA; FIGUEIREDO, 1985).

As considerações teóricas sobre a operação de secagem e sobre o processamento do café são fundamentais para o estudo da secagem experimental dos frutos de café, a qual é descrita a seguir, no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4

SECAGEM EXPERIMENTAL DE FRUTOS DE CAFÉ

Neste capítulo são abordados a descrição e o funcionamento do secador de bandejas vibradas (Seção 4.1); uma revisão sobre planejamentos fatoriais a três níveis (Seção 4.2), que serão utilizados no estudo da secagem dos frutos de café (Seção 4.4); a metodologia adotada para a realização da colheita e seleção dos frutos de café (Seção 4.3); um estudo do encolhimento dos frutos de café durante a operação de secagem (Seção 4.5); a metodologia utilizada e os resultados obtidos na determinação da densidade *bulk* dos frutos de café (Seção 4.6) e a descrição do beneficiamento dos frutos de café, após a secagem, enfatizando os aspectos qualitativos do grão de café (Seção 4.7).

A operação de secagem é uma etapa fundamental no processamento de frutos de café. Entretanto, as pesquisas nesta área são escassas, quando comparadas com outros grãos. Por isso, com a finalidade de estudar o comportamento de frutos de café frente à secagem e à dinâmica do leito, realizaram-se experimentos, que foram conduzidos em um secador de bandejas vibradas com reciclo. A descrição do secador, as etapas de processamento dos frutos de café e os resultados obtidos na operação de secagem são descritos a seguir.

4.1 – Secador de Bandejas Vibradas com Reciclo

O secador utilizado neste trabalho já foi empregado, anteriormente, na secagem de café por Menezes (1996), Freitas (1998), Banzatto (2000) e Sfredo (2002).

Entretanto, os outros trabalhos foram realizados com configurações diferentes do equipamento. Neste trabalho foram efetuadas modificações, principalmente no sistema de reciclo dos frutos de café. O esquema do secador de bandejas vibradas, utilizado neste trabalho é mostrado na Figura 4.1.

O secador de bandejas vibradas com reciclo é constituído basicamente de quatro seções: túnel vertical de secagem, sistema de vibração, sistema de injeção de ar aquecido no túnel de secagem e sistema de reciclo dos frutos de café.

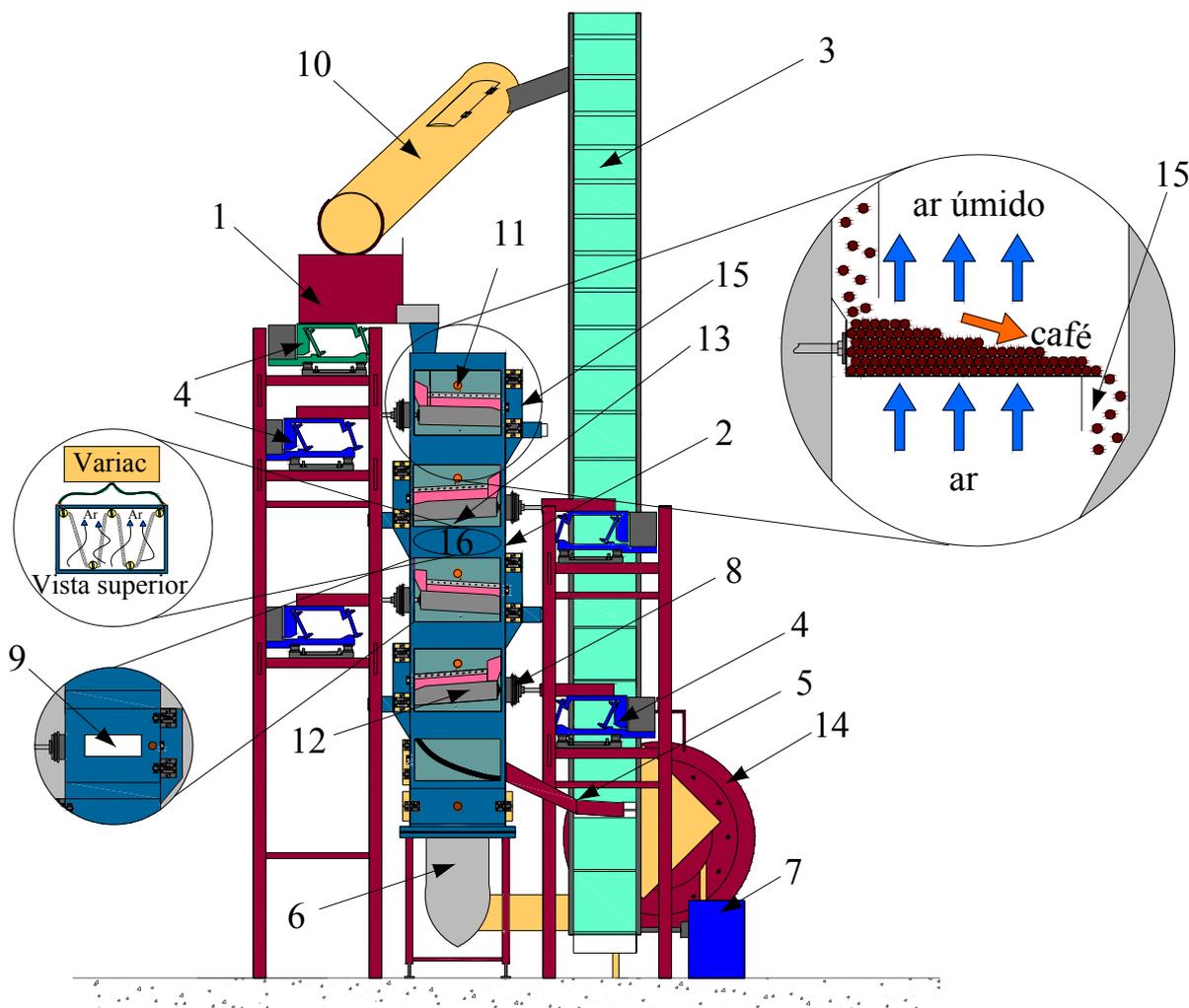


Figura 4.1 – Esquema do secador de bandejas vibradas com reciclo (vista frontal).

1: alimentador vibratório; 2: túnel de secagem; 3: esteira transportadora; 4: vibradores eletromagnéticos; 5: descarga dos frutos de café; 6: tubulação de ar; 7: moto-reductor; 8: dispositivo de vedação; 9: janela de inspeção; 10: tubulação de PVC; 11: lâmpadas; 12: bandeja; 13: termopar; 14: soprador; 15: vertedouro; 16: sistema de reaquecimento do ar.

O túnel de secagem (2) contém quatro bandejas (a Bandeja 1 é a superior e a Bandeja 4 é a inferior) perfuradas por onde escoam os frutos de café e o ar, em escoamento cruzado, com dimensões de 0,29 m x 0,18 m x 0,06 m; três resistências elétricas internas (16), cada uma de $459,63 \pm 83,11$ W (localizadas abaixo das Bandejas 1, 2 e 3), conectadas à rede elétrica (220 V) e em série com dois variadores de tensão para controle da temperatura de reaquecimento do ar, regenerando seu potencial de secagem antes da alimentação da bandeja superior; oito termopares para medir a temperatura do ar na entrada e na saída de cada bandeja; quatro vertedouros que possibilitavam o escoamento dos frutos de café da bandeja superior para a inferior; cinco cortinas de borracha com 0,216 m de comprimento e 0,179 m de largura, que impedem que o ar de secagem escoe pelos vertedouros e sim pelo túnel de secagem, com esse dispositivo os frutos de café são descarregados para a bandeja inferior, por

uma abertura retangular na parte inferior da cortina; e uma calha de descarga (5) que direciona os frutos de café, da saída do túnel de secagem, para uma esteira transportadora (para efetuar o reciclo).

Os oito termopares, para medida da temperatura do ar, foram conectados a um sistema de aquisição de dados composto por um repetidor (LR – 7018), por um conversor (LR – 7520) e por um microcomputador com o software LabVIEW 6.1[®], o qual é responsável pela gravação dos dados de temperatura do ar no decorrer da secagem. O Apêndice A contém a descrição da montagem e programação do sistema de aquisição dos dados de temperatura do ar.

O sistema de vibração, constituído por quatro vibradores eletromagnéticos (4) conectados às quatro bandejas do secador e um vibrador eletromagnético conectado ao alimentador vibratório (1), possibilita e controla o escoamento dos frutos de café no túnel de secagem. Os quatro vibradores (CE – Norma Equipamentos Ltda. modelo CV.3) possuem dial de variação que permite modificar a amplitude vibracional. Os vibradores (exceto o alimentador vibratório) são conectados às bandejas por uma haste metálica, parafusada na parte superior do vibrador e introduzida no interior do secador onde é acoplada, rigidamente, às bandejas. Na parede do secador onde a haste é conectada à bandeja, instalou-se um dispositivo flexível de borracha (8) para impedir que o ar escoasse para fora do secador, pelo orifício de passagem.

Com a finalidade de impedir vazamento de ar, tiras de borracha de aproximadamente 0,01 m de espessura foram coladas nas bordas internas de todas as janelas de inspeção e mais dois dispositivos de fechamento (trincos) foram instalados para vedar as saídas de ar, devido à pressão exercida pelas janelas pressionadas pelos trincos contra as tiras de borracha. A janela de inspeção possui um visor de acrílico (dimensão de 0,063 m x 0,182 m) para possibilitar a visão do leito de café em escoamento no interior do secador, durante a secagem. Este dispositivo é muito importante, pois possibilita a visualização do escoamento dos frutos de café, necessária para se promover o controle manual da altura do leito (ou quantidade de frutos de café nas quatro bandejas). O controle manual é realizado pela alteração da amplitude de vibração das bandejas nos diais de variação da intensidade de vibração.

Durante a secagem dos frutos de café, a velocidade da esteira transportadora (3), a intensidade de vibração (amplitude) das bandejas e do alimentador vibratório foram alteradas de acordo com o comportamento do leito de café nas bandejas e na esteira transportadora. De

forma geral, a intensidade da vibração nas bandejas e no alimentador era atenuada ao longo da secagem enquanto que a velocidade da esteira transportadora tinha de ser aumentada. A alteração tornou-se necessária para manter o escoamento uniforme dentro e fora do secador, uma vez que a dinâmica do sistema é alterada com o decorrer da secagem pela mudança no conteúdo de umidade dos frutos, diminuindo sua massa, seu volume e a resistência ao escoamento.

O sistema de injeção de ar no secador é constituído por um soprador (14) de 3,1 hp, operando a 3500 rpm; uma tubulação (6) com 4,50 m de comprimento e 0,20 m de diâmetro, que conduz o ar de secagem até o túnel do secador; uma placa de orifício conectado a um manômetro para determinar a vazão de ar; e um sistema de aquecimento por dissipação de energia elétrica, formado por quatro resistências elétricas, cada uma de 2376 W, estando uma delas conectada a um variador de tensão que permite o controle fino da temperatura do ar. As outras resistências elétricas, quando necessário operar a maiores temperaturas, foram conectadas diretamente à rede elétrica, ou então tinham a função de sobressalente na eventualidade de uma resistência elétrica necessitar de manutenção.

A Figura 4.2 apresenta o esquema de construção e montagem das quatro resistências que aquecem o ar de secagem. A seção transversal do tubo, indicada na Figura 4.2 (a), mostra o esquema da forma do suporte das resistências elétricas confeccionadas com duas seções de telha de cimento amianto, fixadas na parte central por parafusos (quatro), para manutenção da rigidez do conjunto. O conjunto de resistências foi disposto no centro da tubulação de admissão de ar por meio de dois suportes cilíndricos conectados à parede da tubulação. Utilizou-se fio para resistência elétrica de níquel-cromo de 2,1 ohm/m, enrolado em forma de espiral no suporte, com distância entre os fios de 0,004 m. As vistas lateral e superior das resistências elétricas fixadas no suporte são indicadas na Figura 4.2 pelas letras (b) e (c), respectivamente.

O sistema de reciclo dos frutos de café é constituído pela correia transportadora (3) que transporta os frutos que abandonam o secador na calha de descarga, até uma tubulação de PVC (10) com 0,2 m de diâmetro e 2,23 m de comprimento, onde os frutos escoavam até o alimentador vibratório (1) no topo do túnel de secagem. A esteira, com 0,2 m de largura e aproximadamente 4 m de comprimento, contém taliscas de 0,017 m de altura dispostas a uma distância de aproximadamente 0,20 m entre si. A função das taliscas é manter os frutos de café sobre a esteira da correia transportadora. Tanto a esteira quanto as taliscas são confeccionadas de borracha branca, própria para produtos alimentícios.

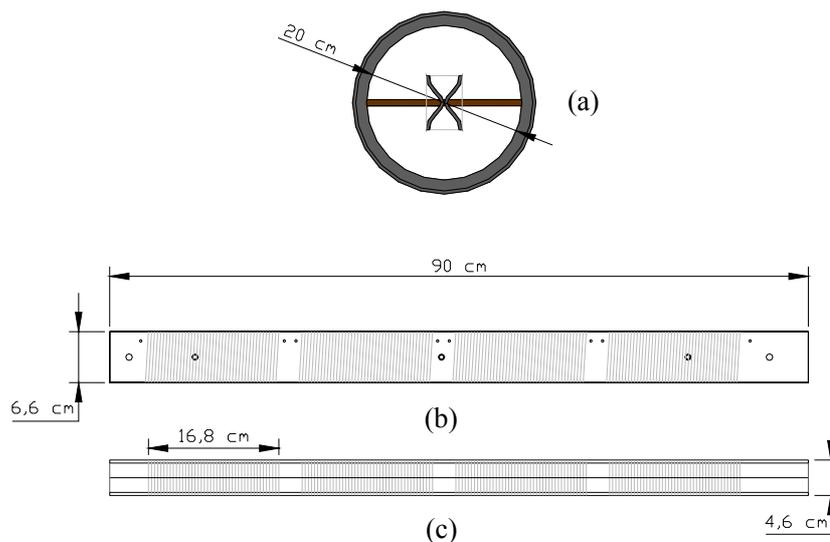


Figura 4.2 – Esquema do sistema de aquecimento do ar de secagem.

Um dispositivo plástico foi fixado sobre a esteira, nas extremidades de cada talisca, para evitar o esmagamento dos frutos de café. Este dispositivo é indispensável para o transporte dos frutos de café que abandonam o secador, principalmente no início da secagem, quando os frutos estão ainda úmidos e pegajosos. O acessório plástico tem a função de evitar o esmagamento dos frutos de café pelo atrito com a parte metálica da correia transportadora. Os frutos de café úmidos aderem à parede metálica da esteira e a correia taliscada esmaga-os a ponto de despolda-los.

A inclinação da correia transportadora com a horizontal é de aproximadamente 42° . A velocidade da esteira é modificada pela alteração da rotação do motor (indução-gaiola) WEG (7) de 0,5 hp e 1720 rpm responsável pelo seu movimento, acoplado a um redutor de velocidade, com redução de 1:60. O conjunto é conectado a um inversor de frequência WEG (Série CFW-08), que promove a alteração da rotação no motorredutor e, portanto, altera a velocidade da esteira transportadora, cuja menor rotação é 3 rpm.

Com a finalidade de melhor estudar as principais variáveis que afetam a secagem dos frutos de café, realizaram-se experimentos de acordo com dois planejamentos experimentais estatísticos, detalhados a seguir.

4.2 – Planejamento Experimental

A primeira fase experimental foi realizada utilizando um planejamento fatorial fracionário a três níveis e três variáveis (3^{3-1}). Os frutos de café foram provenientes da safra

do ano de 2003. Na segunda fase experimental, o planejamento utilizado foi um planejamento fatorial completo a três níveis com duas variáveis (3^2). Os frutos de café foram provenientes da safra do ano de 2004. No ano de 2005 alguns experimentos foram repetidos.

4.2.1 – Planejamentos Fatoriais a Três Níveis (3^k)

Em muitas investigações científicas há interesse em estudar os efeitos de dois ou mais fatores simultaneamente. Os planejamentos fatoriais, geralmente, são os mais usados para este tipo de investigação. Quando as variáveis têm somente dois níveis, só é possível estudar o efeito linear da resposta sobre a escala dos níveis escolhidos. A principal diferença entre o planejamento a dois níveis e o planejamento a três níveis é o fato de que cada variável possui dois graus de liberdade e há dois sistemas para selecionar os parâmetros e os efeitos de interação: o sistema ortogonal dos componentes e o sistema linear-quadrático. A análise de variância padrão é aplicável ao primeiro sistema enquanto que uma estratégia de análise de regressão necessita ser desenvolvida para o segundo sistema (WU; HAMADA, 2000).

Uma variável quantitativa pode afetar a resposta de uma forma não uniforme. Assim, somente dois níveis da variável impossibilitam uma análise da relação curvilínea entre a resposta e a variável operacional. Neste caso, são requeridos três ou os mais níveis para detectar o efeito da curvatura. Para um planejamento completo, envolvendo três níveis e quatro variáveis (3^4), seriam necessários oitenta e um experimentos e o planejamento apresentaria oitenta graus de liberdade. Destes, quarenta e oito são para estimativas das interações entre três e quatro fatores. Essas estimativas são difíceis de interpretar e, freqüentemente, são insignificantes. Portanto, é mais eficiente utilizar as frações 1/3 ou 1/9 do planejamento 3^4 , por exemplo, sendo coerente com a principal justificativa para a utilização de um planejamento fatorial fracionário, que é a diminuição do número de experimentos (WU; HAMADA, 2000).

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as matrizes de planejamento, para os planejamentos 3^2 e 3^{3-1} , respectivamente, geradas pelo *software* STATISTICA 5.0. Os números -1; 0 e 1 indicam as variáveis de menor nível; nível intermediário e maior nível, respectivamente.

A partir da manipulação das variáveis independentes, de acordo com o planejamento de experimentos, obtém-se valores para as respostas desejadas. Assim, a resposta (y) depende das variáveis independentes (x) e pode ser ajustada por uma função, indicada na Equação (4.1).

Tabela 4.1 – Matriz de planejamento para 3^2 .

Experimentos	Variáveis	
	x_1	x_2
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	1
4	0	-1
5	0	0
6	0	1
7	1	-1
8	1	0
9	1	1

Tabela 4.2 – Matriz de planejamento para 3^{3-1} .

Experimentos	Variáveis		
	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1
2	-1	0	1
3	-1	1	0
4	0	-1	1
5	0	0	0
6	0	1	-1
7	1	-1	0
8	1	0	-1
9	1	1	1

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \iota \tag{4.1}$$

A forma da função f é desconhecida e complicada, e ι é um termo que representa outras fontes de variabilidade não contabilizadas em f . Assim, ι inclui efeitos tais como erros de medida da resposta, fontes de variação que são inerentes ao processo ou sistema e o efeito de outras variáveis. O termo ι pode ser tratado como um erro estatístico, que freqüentemente assume-se que tenha uma distribuição normal, com média zero e variância igual ao desvio padrão ao quadrado. Se a média de ι é zero, tem-se a Equação (4.2) que resulta na Equação (4.3) para a resposta média, η (MYERS; MONTGOMERY, 2002).

$$N(y) \equiv \eta = N[f(x_1, x_2, \dots, x_n)] + N(\iota) \tag{4.2}$$

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{4.3}$$

Ao realizar-se um determinado número de experimentos obtém-se respostas que estão situadas em um espaço dimensional. Conseqüentemente, cada ponto no espaço define

um experimento. Desta forma, as respostas são observadas como uma nuvem de pontos no espaço com três dimensões, formado pelas variáveis (neste caso duas variáveis) e pelas respostas. A superfície tridimensional que proporciona o melhor ajuste aos pontos experimentais é a superfície de resposta. O procedimento para determiná-la inclui análise de regressão polinomial (SALTOS, 2001).

Geralmente, um polinômio de baixa ordem é apropriado para uma região relativamente pequena do espaço das variáveis independentes. Em muitos casos, um modelo de primeira ordem é utilizado, como mostra a Equação (4.4) que representa o modelo de primeira ordem com interação entre as variáveis e a Equação (4.5) mostra a equação geral para um modelo de primeira ordem (MYERS; MONTGOMERY, 2002).

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (4.4)$$

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (4.5)$$

Entretanto, freqüentemente a curvatura da superfície de resposta é sensível o suficiente de forma que o modelo de primeira ordem torna-se inadequado. Nestas situações, um modelo de segunda ordem é requerido, como indica a Equação (4.6). Este modelo é utilizado como uma aproximação para a superfície de resposta em uma região relativamente pequena em torno do ponto espacial onde há uma curvatura substancial na função resposta f . Este modelo, cuja equação geral é indicada pela Equação (4.7), gera uma superfície de resposta com formato de montanha e contornos elípticos (MYERS; MONTGOMERY, 2002).

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (4.6)$$

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j=2}^n \sum \beta_{ij} x_i x_j \quad (4.7)$$

O modelo polinomial de segunda ordem é amplamente utilizado na metodologia de superfície de resposta por várias razões. As principais são:

- o modelo de segunda ordem é muito flexível e fornece uma ampla variedade de formas de funções;
- os parâmetros (β) são facilmente estimados pelo método dos mínimos quadrados;
- várias experiências práticas consideráveis indicam que o modelo de segunda ordem

é adequado para solução dos problemas de superfície de resposta (MYERS; MONTGOMERY, 2002).

No trabalho atual, para que a secagem seja uniforme e o produto tenha as características desejadas, uma etapa de processamento deve ser cuidadosamente efetuada, a colheita dos frutos de café cereja, a qual é descrita a seguir.

4.3 – Colheita e Seleção dos Frutos de Café

Os frutos de café cereja, safra 2003, foram fornecidos pelos produtores Serafin Peres (Fazenda Estância Paraíso) e José Apolinário de Souza. As duas fazendas estão localizadas no Município de Araguari, Distrito de Amanhece, na Região do Cerrado Mineiro, que segundo CARDOSO (2001), é uma das três regiões no Brasil, onde se encontram os melhores cafés para produção de café *gourmet*.

Os frutos foram colhidos por trabalhadores da lavoura de café pelo sistema de bateção, utilizando um pedaço de madeira, o qual foi golpeado contra os galhos do cafeeiro derrubando os frutos de café em um pano, colocado sob a árvore. Além dos frutos maduros, caíam no pano também frutos verdes, secos e folhas, por isso, foram selecionados, “a dedo”, apenas os frutos maduros (café cereja), como recomenda BARCA (1998).

A Figura 4.3 mostra frutos de café em diferentes estágios de maturação.

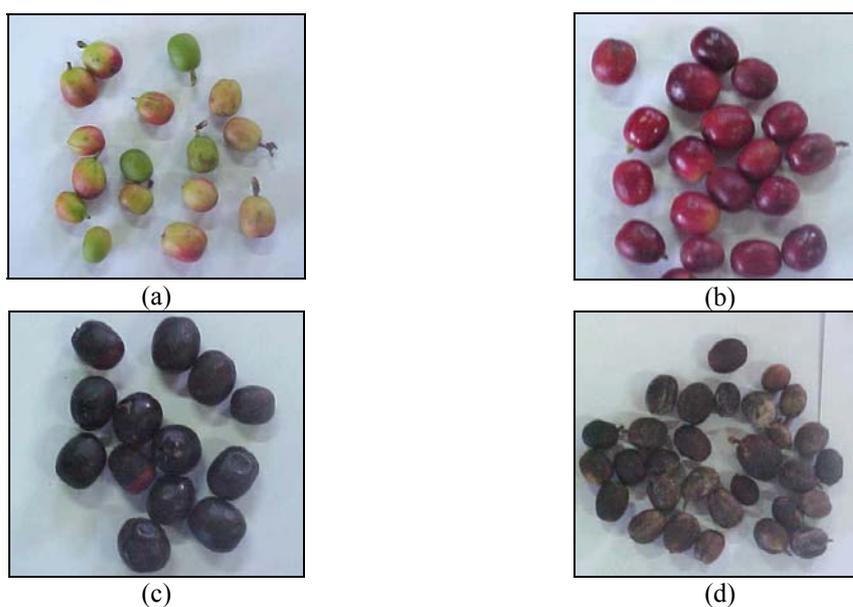


Figura 4.3 – Frutos de café em diferentes estágios de maturação: (a) frutos verdes; (b) café cereja; (c) frutos passas; (d) frutos secos.

Os frutos verdes, passas e secos encontrados durante a colheita foram retirados manualmente na etapa de limpeza, juntamente com as outras impurezas. Os frutos verdes são aqueles que ainda não completaram sua maturação e prejudicam em muito a qualidade da bebida e o aspecto do café. Os frutos passa são aqueles com grau de maturação avançado e os frutos secos são os que secaram no cafeeiro.

Os frutos de café, safra 2004, foram fornecidos pela produtora Aparecida Patussi, da Fazenda Olhos d'água, Distrito de Amanhece, Município de Araguari, Minas Gerais. A colheita do café cereja foi realizada por derriça em peneira e, novamente, somente os frutos vermelhos (cereja) foram recolhidos.

Os frutos de café, safra 2005, foram provenientes da Fazenda do Glória – UFU, localizada no Município de Uberlândia, Estado de Minas Gerais; da Fazenda Estância Paraíso e da fazenda do produtor Santo Patussi, localizadas no Distrito Amanhece, Município de Araguari, Estado de Minas Gerais.

A quantidade de frutos de café retirados dos cafeeiros em cada colheita foi de aproximadamente 11 kg a 15 kg. Essa variação foi decorrente da quantidade necessária para cada experimento de secagem, a qual foi definida em planejamento experimental descrito na seção seguinte.

Após a colheita realizaram-se as etapas de lavagem e retirada das impurezas (folhas, paus, frutos verdes e em estado de maturação avançado).

Para a lavagem, os frutos de café foram colocados em um recipiente plástico (capacidade de 7 L), o qual foi preenchido com café até aproximadamente a metade de sua capacidade. Utilizou-se água para completar o volume, funcionando como um separador de café bóia. Os frutos de café com menor densidade (café bóia, geralmente, cafés com estágio de maturação avançado ou com formação deficiente) flotavam e foram retirados manualmente. Os frutos de café com densidade maior do que a da água (frutos de café cereja ou verdes) foram colocados em uma bandeja de aço inox (0,420 m x 0,115 m x 0,06 m), perfurada na base e em todos lados, com capacidade para aproximadamente 2 kg de café úmido. O conteúdo da bandeja foi percolado com água corrente tratada, por cerca de dois minutos, para que as impurezas fossem arrastadas; em seguida a água foi drenada efetuando agitação manual do conjunto. Após a lavagem, os frutos foram dispostos em uma mesa para a retirada, por catação, das impurezas restantes e evaporação do excesso de água superficial.

4.4 – Secagem dos Frutos de Café no Secador de Bandejas Vibradas com Reciclo

A secagem dos frutos de café foi realizada em duas etapas. A primeira etapa corresponde à safra de café do ano de 2003 e a segunda etapa corresponde à safra de 2004. Como o período em que os frutos de café estão maduros e ideais para a colheita é relativamente curto, entre os meses de maio e julho, foi necessária a utilização de um planejamento com poucos experimentos.

4.4.1 – Primeiro Planejamento de Secagem

Na primeira etapa, os experimentos foram realizados segundo um planejamento fatorial fracionário com três variáveis em três níveis. As variáveis estudadas foram: temperatura dos frutos de café durante a secagem ($^{\circ}\text{C}$); massa inicial de frutos de café (kg) e vazão de ar de secagem (kg/min). A Tabela 4.3 apresenta a matriz de planejamento para a primeira etapa de secagem. Os níveis das variáveis codificadas podem ser comparados na Tabela 4.2, citada anteriormente.

Tabela 4.3 – Matriz de planejamento 3^{3-1} para secagem dos frutos de café, safra 2003.

Experimento	Ordem dos experimentos	Variáveis				Variedade dos frutos de café
		T [$^{\circ}\text{C}$]	M [kg]	Q _{admitido} [kg ar/min]	Q _{efetivo} [kg ar/min]	
1	8 $^{\circ}$	40	11,5	7,0	5,25	Mundo Novo
2	3 $^{\circ}$	40	12,5	9,0	6,75	Mundo Novo
3	1 $^{\circ}$	40	13,5	8,0	6,00	Mundo Novo
4	9 $^{\circ}$	45	11,5	9,0	6,25	Mundo Novo
5	5 $^{\circ}$	45	12,5	8,0	6,00	Catuaí
6	4 $^{\circ}$	45	13,5	7,0	5,25	Catuaí
7	7 $^{\circ}$	50	11,5	8,0	6,00	Catuaí
8	2 $^{\circ}$	50	12,5	7,0	5,25	Acaíá
9	6 $^{\circ}$	50	13,5	9,0	6,25	Mundo Novo

A massa (M) de frutos de café cereja, previamente lavada e selecionada, foi quantificada em balança Filizola BP15 com resolução de 5 g e capacidade de 15 kg. Houve variação na variedade de café processada, o que dependia do planejamento de colheita pelo produtor, que cultivava as variedades Mundo Novo, Catuaí e Acaíá do Cerrado.

O conteúdo de umidade inicial (X_0) dos frutos de café foi determinado utilizando-se dez frutos de café, os quais foram dispostos em pesa-filtros e levados à estufa à 105°C até massa constante (o que necessitou entre 48 e 72 horas, como recomenda Brooker; Bakker-

Arkema; Hall (1974)).

Para iniciar a secagem dos frutos de café, foi efetuada a partida no secador (apresentado na Figura 4.1), acionando-se: o soprador para admissão de ar no túnel de secagem; as resistências elétricas para aquecimento do ar; os vibradores, na posição “zero” do dial de controle, para formação do leito de frutos de café; a esteira transportadora, com velocidade inicial de 15 rpm; o sistema de aquisição de dados de temperatura do ar; o microcomputador para leitura da temperatura do ar de secagem e o termohigrômetro LAMBRECHT para determinação da temperatura de bulbo seco e da umidade relativa do ar ambiente. O termohigrômetro foi localizado próximo à entrada de ar do soprador. Nos quatro primeiros experimentos, as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido foram medidas com um psicrômetro, e não com o termohigrômetro. Os gráficos relativos a essas medidas estão no Apêndice B.

A vazão de ar no secador (Q) foi determinada com o uso de uma placa de orifício calibrada, acoplada a um manômetro, que mede a diferença de pressão (ΔP) e pela Equação (4.8) calcula-se a vazão de ar, sendo α igual a 0,65 (BANZATTO, 2000). Uma válvula de controle manual na entrada do soprador permite a regulação da vazão. Cerca de 25% da vazão de ar admitida (ver Tabela 4.3) no secador era desviada pela calha de descarga dos frutos de café no secador. Com relação à quantidade de ar admitida, apesar dos frutos de café permanecerem pouco tempo na calha de descarga, o ar que sai do secador por esse dispositivo continua contribuindo para a secagem dos frutos de café na calha e no início da correia transportadora e, assim não compromete o planejamento de secagem. A resolução do medidor de vazão de ar é de 1,50 kg ar/min.

$$Q = 10,73\alpha\sqrt{\Delta P} \quad (4.8)$$

A temperatura inicial dos frutos de café foi quantificada colocando-se frutos em um medidor de temperatura de sólidos, o qual consiste de uma cápsula plástica cilíndrica com 0,05 m de altura por 0,03 m de diâmetro, onde um termopar Tipo J, previamente calibrado, foi introduzido em seu interior. Após cerca de 30 segundos lia-se a temperatura no visor digital do medidor de temperatura ECIL modelo Jotta Pj-lh, ao qual o termopar estava conectado. A incerteza da medida do termopar é de $\pm 0,8^\circ\text{C}$. A metodologia para determinação da incerteza da medida está descrita em Sfredo (2002).

A partida da secagem foi realizada conforme descrição a seguir. A alimentação da

amostra (cuja massa é definida pelo planejamento experimental) de frutos de café foi realizada no alimentador vibratório do secador, introduzindo-se lentamente o café, até que na primeira bandeja houvesse a formação de um leito de partículas de café.

Todos os vibradores estavam programados para operação na posição “zero”. O vibrador da primeira bandeja foi então acionado, aumentando a intensidade vibratória, lentamente, até ocorrer escoamento dos frutos de café. A alimentação continuava até que na segunda bandeja houvesse a formação de um leito de partículas de café. Aumentou-se a intensidade vibracional da segunda bandeja até ocorrer formação da camada e escoamento dos frutos de café.

O mesmo procedimento foi efetuado para a terceira e quarta bandejas. O restante da massa frutos de café continuou a ser alimentada e ao término da alimentação, parte dos frutos de café escoava no interior do secador enquanto outros eram transportados pela esteira, retornando ao alimentador vibratório.

O reciclo dos frutos de café ocorreu, continuamente, até a massa de café atingir um conteúdo de umidade normalizado para o armazenamento, ou seja, aproximadamente 13% (base úmida).

A operação de secagem foi interrompida por períodos de aproximadamente 12 h, permanecendo em regime de descanso. Segundo Carvalho e Nakagawa (1980), a quantidade de água removida de sementes por unidade de tempo aumenta na secagem com períodos de descanso longos intercalados com períodos curtos de permanência no secador. Isto ocorre porque o que limita a taxa de secagem, depois que a umidade da camada externa da semente já foi retirada, é a velocidade com a qual a água se difunde do interior da semente para a superfície. Devido à ocorrência do regime de descanso também na etapa de reciclo, quando o café não permanece em contato com o ar de secagem, a secagem foi assim conduzida:

- período de secagem (efetuada entre 4 e 12 h por dia, incluindo o tempo em que os frutos de café permaneciam na esteira transportadora);
- curtos períodos de descanso durante a secagem, cerca de 1 min, no reciclo (esteira, tubulação e alimentador vibratório);
- longos períodos de tempo de descanso (no mínimo 12 h, durante a noite).

Os dados experimentais de conteúdo de umidade, temperatura do ar e do fruto de

café são mostrados graficamente em função do tempo de secagem. Particularmente ao tempo, não se contabilizou o período em que os frutos de café permaneceram em descanso, mas somente o tempo em que estiveram efetivamente secando, apesar da umidade continuar a difundir para a superfície externa do fruto no período de descanso.

4.4.1.1 – Curvas de Secagem

O conteúdo de umidade dos frutos de café foi determinado, no decorrer da secagem, utilizando-se quatro frutos de café, que foram retirados da esteira transportadora aleatoriamente (logo após a descarga do túnel de secagem), periodicamente (no início da secagem de hora em hora e ao final, em intervalos de duas horas).

Os frutos foram dispostos em pesa-filtros, sua massa foi quantificada em balança analítica (resolução de 0,0001 g), e em seguida os pesa-filtros foram levados à estufa à 105°C até massa constante.

O critério adotado para identificação do tamanho da amostra de frutos de café na determinação do conteúdo de umidade, fez com que a diminuição da massa de frutos de café devido a toda amostragem fosse inferior a 2%, minimizando assim, influências no escoamento.

Este procedimento para determinação do conteúdo de umidade dos frutos de café, obviamente, introduz um erro randômico de amostragem na estimativa do conteúdo de umidade médio. A margem de erro (estimada para um intervalo de confiança de 95%) foi calculada pela Equação (4.9), de acordo com Box, Hunter e Hunter (1978) e Montgomery e Runger (1999).

$$X \pm \frac{t_0 \sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.9)$$

Sendo: t_0 a área da cauda da distribuição t ; σ o desvio padrão e “ n ” o número de amostras.

As Figuras 4.4 a 4.14 mostram as curvas de secagem, indicando a margem de erro e a curva ajustada aos dados experimentais de conteúdo de umidade em função do tempo, para os dois períodos de secagem à taxa decrescente. As Figuras 4.11 e 4.13 mostram as curvas de secagem para as repetições de experimentos (safra 2005).

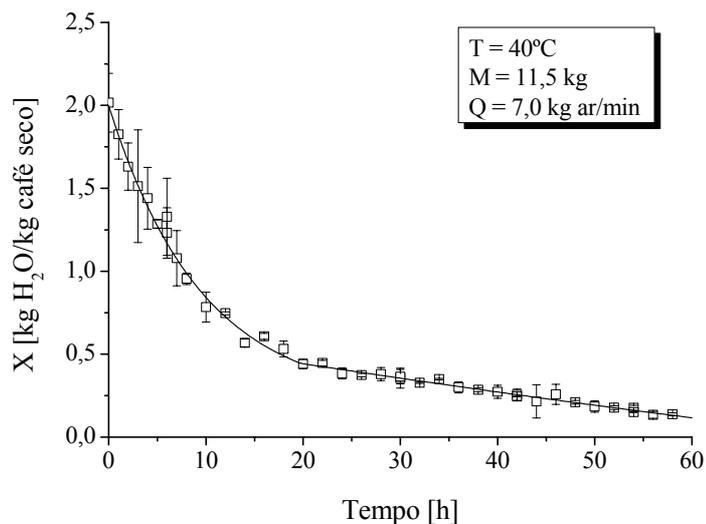


Figura 4.4 – Curva de secagem para o Experimento 1, variedade Mundo Novo.

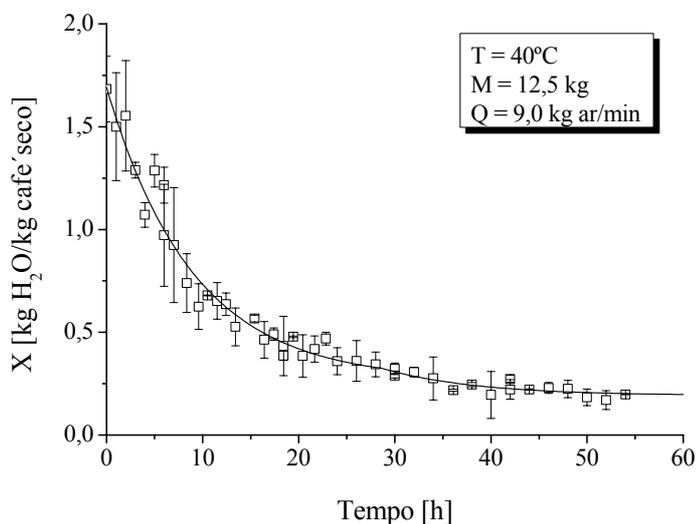


Figura 4.5 – Curva de secagem para o Experimento 2, variedade Mundo Novo.

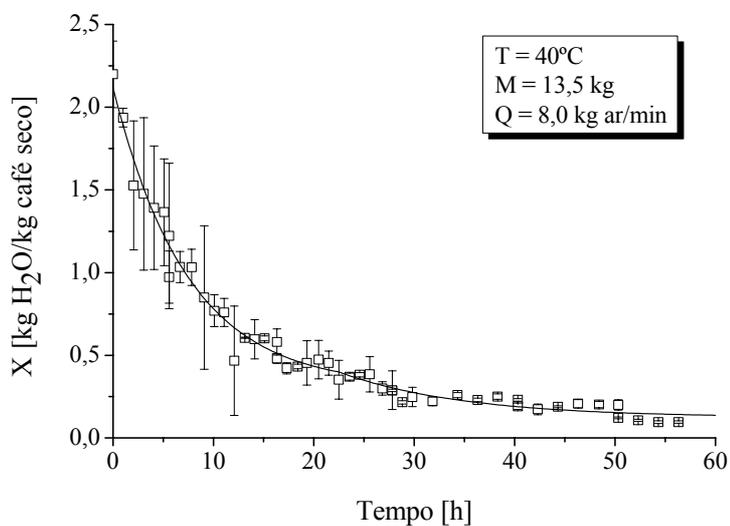


Figura 4.6 – Curva de secagem para o Experimento 3, variedade Mundo Novo.

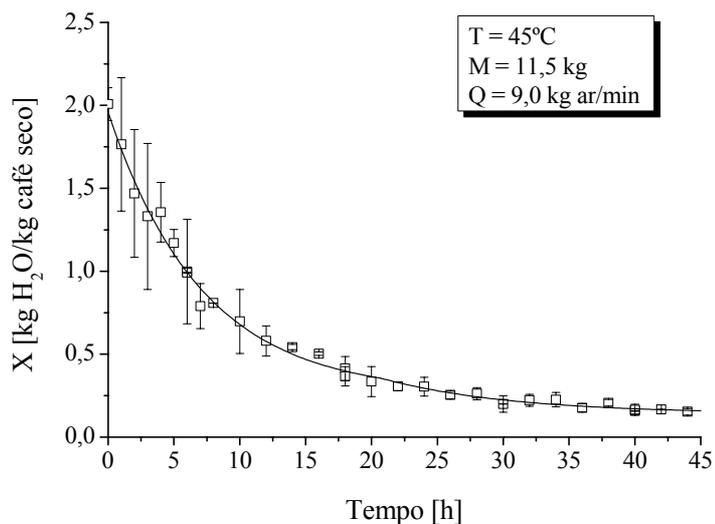


Figura 4.7 – Curva de secagem para o Experimento 4, variedade Mundo Novo.

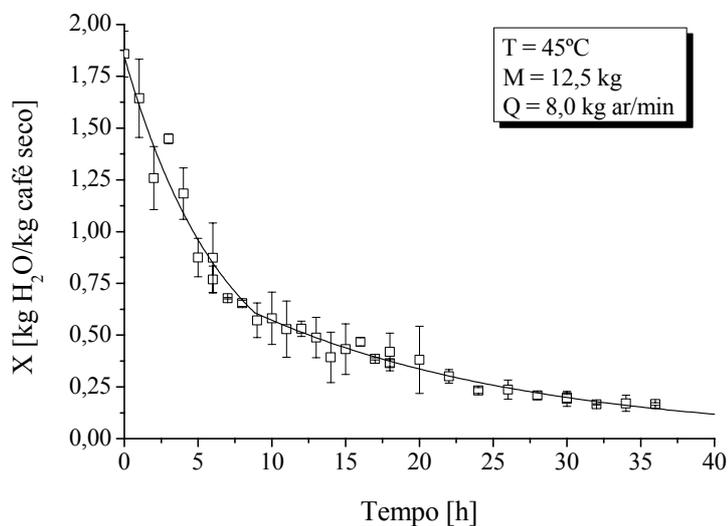


Figura 4.8 – Curva de secagem para o Experimento 5, variedade Catuaí.

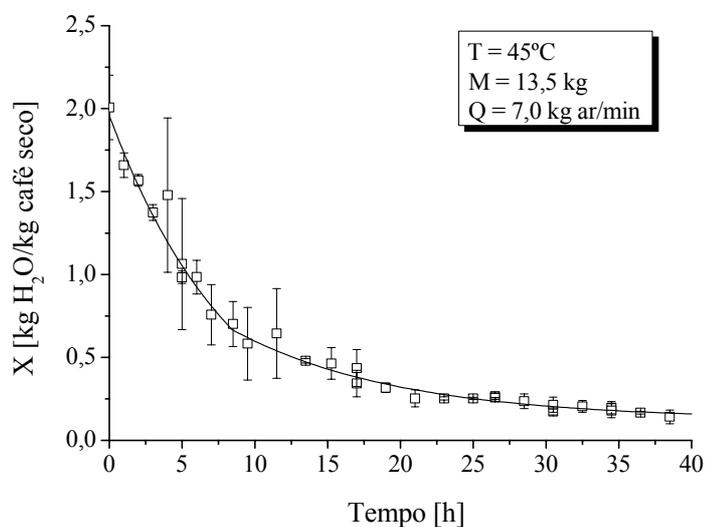


Figura 4.9 – Curva de secagem para o Experimento 6, variedade Catuaí.

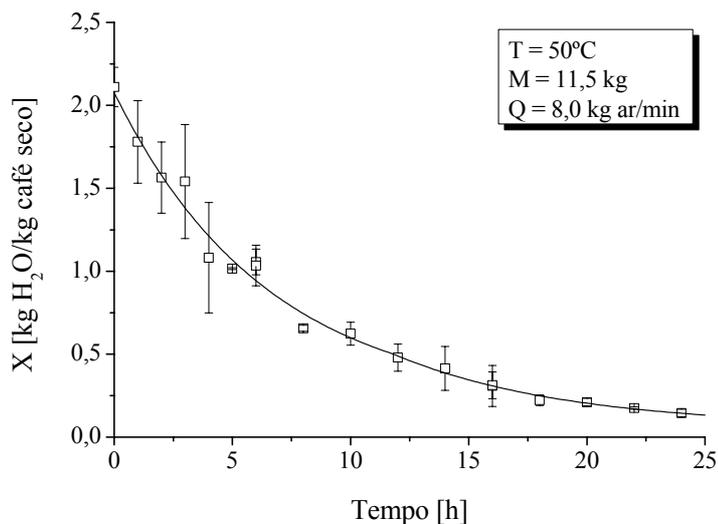


Figura 4.10 – Curva de secagem para o Experimento 7, variedade Catuaí.

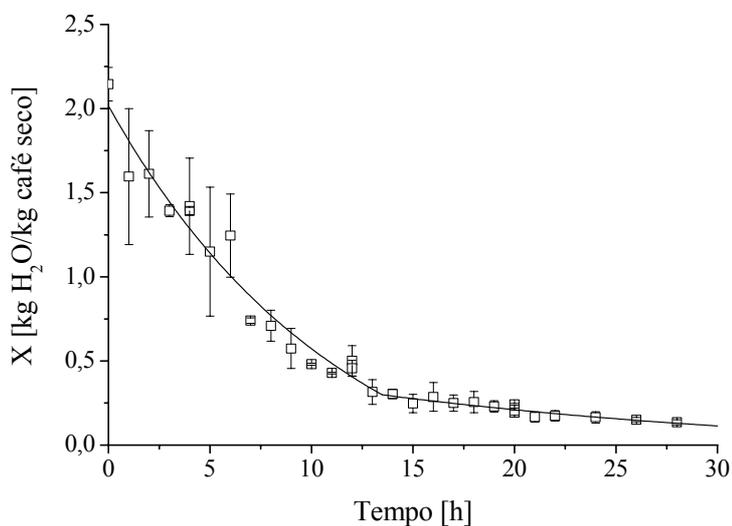


Figura 4.11 – Curva de secagem para o Experimento 7, variedade Catuaí (2005).

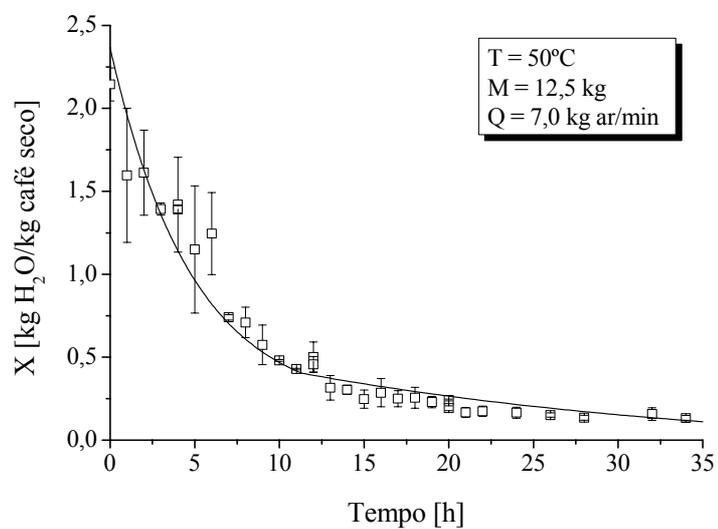


Figura 4.12 – Curva de secagem para o Experimento 8, variedade Acaí.

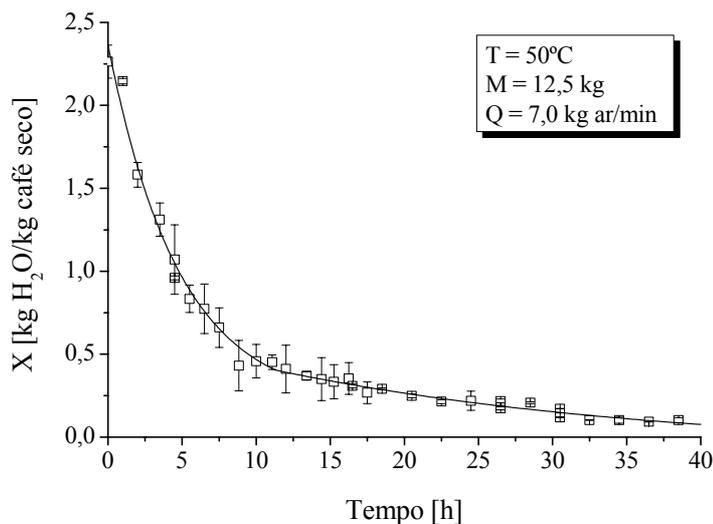


Figura 4.13 – Curva de secagem para o Experimento 8, variedade Acaiá (2005).

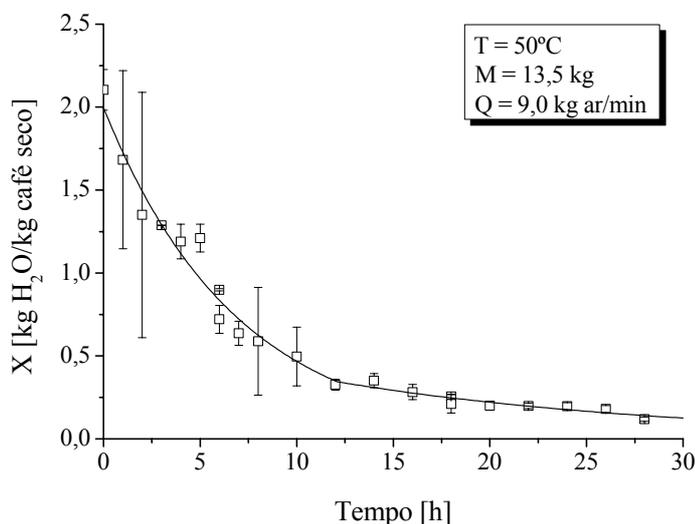


Figura 4.14 – Curva de secagem para o Experimento 9, variedade Mundo Novo.

Apesar da margem de erro ser maior para o início da secagem, devido à heterogeneidade dos frutos de café e regime de escoamento (o que será discutido no Capítulo 6), ao final da secagem a margem de erro foi inferior a 10%, ou seja, o conteúdo de umidade das amostras de frutos de café foi aproximando-se mais do valor médio. Desta forma, a dispersão do conteúdo de umidade médio é diminuída ao final da secagem, e assim, a umidade média do café é muito mais uniforme do que no início da secagem. Isso é importante em termos de controle qualidade do produto, lembrando que grãos úmidos propiciam o desenvolvimento de microrganismos e grãos excessivamente secos desenvolvem trincas ou fissuras.

A Equação (4.10) expressa a curva do conteúdo de umidade médio em função do tempo de secagem ajustada aos dados experimentais.

$$X_{[i,j]} = a_{[i,j]} + b_{[i,j]} \cdot e^{\left(\frac{-t}{c_{[i,j]}}\right)} \quad (4.10)$$

Sendo: $X_{[i,j]}$ o conteúdo de umidade médio em kg H₂O/kg café seco; t é o tempo de secagem em horas; i o número do experimento (1,...,9) e j o período de secagem (1 ou 2).

A Equação (4.10) é uma equação de ajuste exponencial, apesar disso, é possível efetuar interpretações fenomenológicas, usando os fundamentos de secagem. Aplicando o limite quando o tempo tende a zero, para o primeiro período de secagem a taxa decrescente tem-se que a soma das constantes “a” e “b” é igual ao conteúdo de umidade inicial. Quando o tempo tende ao infinito, para o segundo período de secagem a taxa decrescente, a constante “a” é igual ao conteúdo de umidade de equilíbrio. A derivada da Equação (4.10), para o primeiro período de secagem, é uma constante. Assim, pode-se inferir que a razão entre as constantes “b” e “c” consiste no valor da taxa de secagem constante.

Os valores dos coeficientes “a”, “b” e “c”, bem como dos coeficientes de correlação (95% de confiança) para as curvas ajustadas, estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Coeficientes da Equação (4.10) para os experimentos de secagem.

Experimentos (i)	Período de secagem (j)	Coeficientes			R ²
		a	b	c	
1	1	0,2204	1,7781	9,5263	0,99
1	2	-1,5268	2,1558	220,7651	0,98
2	1	0,2669	1,4246	8,9635	0,96
2	2	0,1923	2,5169	9,7343	0,85
3	1	0,3107	1,8074	7,4376	0,98
3	2	0,1238	1,6908	12,3828	0,87
4	1	0,2625	1,6963	7,1231	0,99
4	2	0,1402	1,7432	9,8921	0,84
5	1	0,1445	1,6993	6,8097	0,96
5	2	0,0049	0,9702	18,6363	0,94
6	1	-0,1474	2,1068	8,8864	0,99
6	2	0,1255	1,1404	11,3536	0,94
7	1	0,1938	1,8831	6,5089	0,99
7	2	0,0609	2,2138	7,3038	0,98
7 (2005)	1	-0,4807	2,4961	11,5889	0,96
7 (2005)	2	-0,0696	0,6525	23,5782	0,83
8	1	0,1963	2,1707	4,8136	0,98
8	2	-0,0891	0,7582	26,2478	0,95
8 (2005)	1	-0,4737	2,9621	9,6781	0,98
8 (2005)	2	0,1048	1,4372	8,3632	0,90
9	1	0,0003	1,9974	6,8789	0,94
9	2	-0,0013	0,6814	17,8089	0,88

As Figuras 4.4 à 4.14 apresentam dois períodos de secagem distintos com taxa decrescente, que segundo Lewis (1987), é característico da curva de secagem para materiais higroscópicos. No primeiro período, a frente de secagem move-se em direção ao centro do material, a água evapora-se e difunde-se através do sólido seco. Este período termina quando o plano de evaporação atinge o centro e a pressão parcial da água neste local diminui abaixo da pressão de vapor da água saturada. Neste estágio, inicia-se o segundo período de taxa de secagem decrescente, no qual a água que é retirada do sólido não é água livre.

O tempo em que ocorria a mudança de período (t_m) foi quantificado, para todos os experimentos, pela determinação do ponto de intercessão entre as duas curvas, ajustadas aos pontos experimentais, plotados em escala logarítmica. Os gráficos das curvas de secagem são apresentados no Apêndice C. O tempo de secagem necessário para a massa de café atingir aproximadamente 0,17 kg H₂O/kg café seco (t_f), o que consiste de um conteúdo de umidade em base úmida menor que 15%, também foi determinado a partir do conjunto de dados de conteúdo de umidade em função do tempo. Os resultados são apresentados na Tabela 4.5 e foram utilizados como resposta para o planejamento experimental 3³⁻¹, com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.5 – Resultados para a resposta tempo de secagem.

Experimento	t_m [h]	t_f [h]	Variáveis	t_m		t_f	
				Efeitos	<i>p-level</i>	Efeitos	<i>p-level</i>
1	14,00	54,00	T	-5,89	0,0263	-26,77	0,0074
2	9,58	52,00	T ²	1,55	0,2068	-2,55	0,3316
3	11,08	50,32	M	-2,14	0,1596	-1,73	0,5340
4	12,00	40,00	M ²	-1,40	0,2386	0,20	0,9307
5	9,00	34,00	Q	-0,97	0,4238	0,50	0,8493
6	9,50	34,50	Q ²	-0,65	0,5204	-3,64	0,2113
7	6,00	22,00	-	-	-	-	-
8	6,00	28,00	-	-	-	-	-
9	5,00	26,00	-	-	-	-	-

A Tabela 4.5, que mostra os resultados experimentais obtidos na secagem dos frutos de café, indica que a única variável responsável pelo efeito significativo no tempo de secagem (t_m e t_f) dos frutos de café foi a temperatura do fruto (T), que diminuiu em média 26,77 h o tempo de processamento dos frutos de café cereja quando alterada do nível menor para o maior. Não houve efeitos significativos nos termos quadráticos.

A vazão mássica do ar não apresentou efeito significativo no tempo de secagem dos frutos de café apesar de, no início, os experimentos com vazão de ar mais elevada

apresentarem uma taxa de secagem maior. Isto ocorre porque a quantidade de umidade superficial no início da secagem é maior e o processo é mais influenciado por condições externas de secagem, como por exemplo, a vazão de ar, responsável pelo transporte da umidade superficial do fruto de café.

A massa de café alimentada no secador não produziu efeito significativo no tempo de secagem, principalmente pela forte influência das variedades dos frutos de café cereja utilizadas nos experimentos. A variedade do café arábica não foi mantida a mesma porque estava diretamente relacionada à colheita, ou seja, os frutos colhidos no dia de cada experimento eram selecionados pelo produtor conforme o estado de maturação. Na região, os produtores cultivam diversas variedades de café arábica em uma mesma propriedade.

A diferença entre as variedades colhidas está principalmente no conteúdo de sólidos solúveis que são difundidos para o exterior dos frutos durante a secagem e no tamanho dos frutos. A variedade de maior tamanho é a Acaia, seguida da Mundo Novo e da Catuaí (isso será discutido na Seção 4.5). O tamanho do fruto é uma variável relevante na secagem, já que a difusão da umidade do interior do fruto para a superfície domina o processo de secagem do café e é função do raio da partícula. Assim, quanto maior o fruto de café, maior o tempo de secagem.

A Tabela 4.6 apresenta o quadro de análise de variância (ANOVA) que foi desenvolvido usando o *software* STATISTICA 5.0, para evidenciar os fatores significativos, com intervalo de confiança de 95%, e comprova que o único fator significativo foi a temperatura do fruto, já que apresentou nível de significância (*p-level*) inferior a 0,05.

Tabela 4.6 – Análise de variância (ANOVA).

Efeitos	t_m				t_f			
	SQ	GL	F	<i>p-level</i>	SQ	GL	F	<i>p-level</i>
T	52,02	1	36,46	0,0263	1075,13	1	133,23	0,0074
T ²	4,84	1	3,39	0,2068	13,03	1	1,61	0,3316
M	6,86	1	4,81	0,1596	4,48	1	0,55	0,5340
M ²	3,94	1	2,76	0,2386	0,08	1	0,09	0,9307
Q	1,42	1	0,99	0,4238	0,38	1	0,05	0,8493
Q ²	0,85	1	0,60	0,5204	26,56	1	3,29	0,2113
Erro	2,85	2	-	-	16,14	2	-	-
Total	72,78	8	-	-	1135,80	8	-	-

As Figuras 4.15 a 4.20 apresentam as superfícies de resposta para o tempo de secagem em função das variáveis estudadas: temperatura do fruto; massa de café alimentada e vazão de ar de secagem.

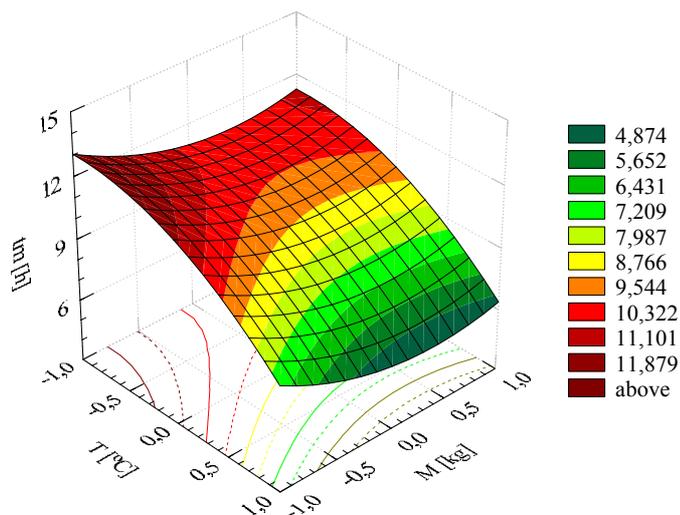


Figura 4.15 – Superfície de resposta para t_m com relação às variáveis T e M.

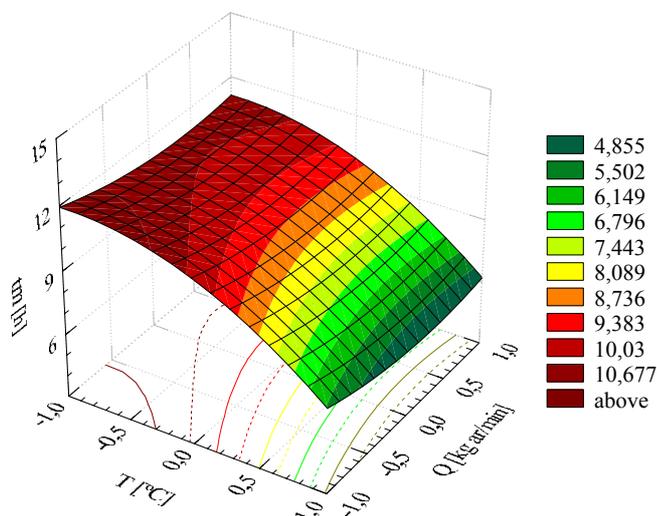


Figura 4.16 – Superfície de resposta para t_m com relação às variáveis T e Q.

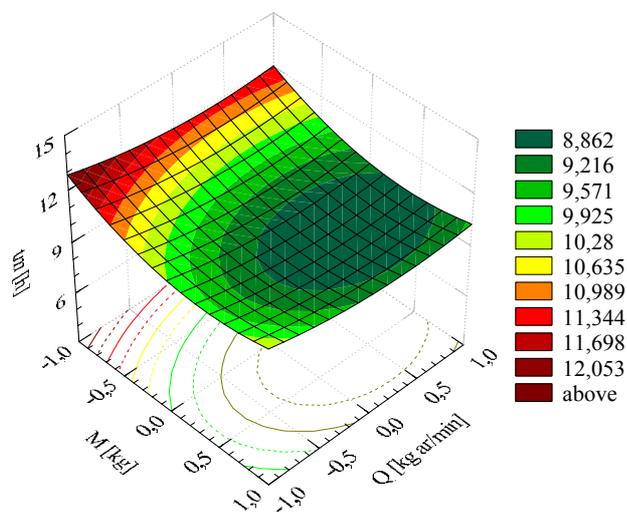


Figura 4.17 – Superfície de resposta para t_m com relação às variáveis M e Q.

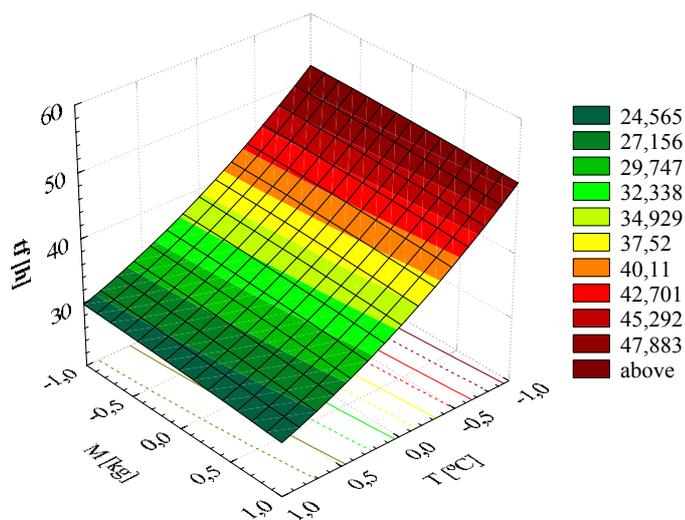


Figura 4.18 – Superfície de resposta para t_f com relação às variáveis T e M.

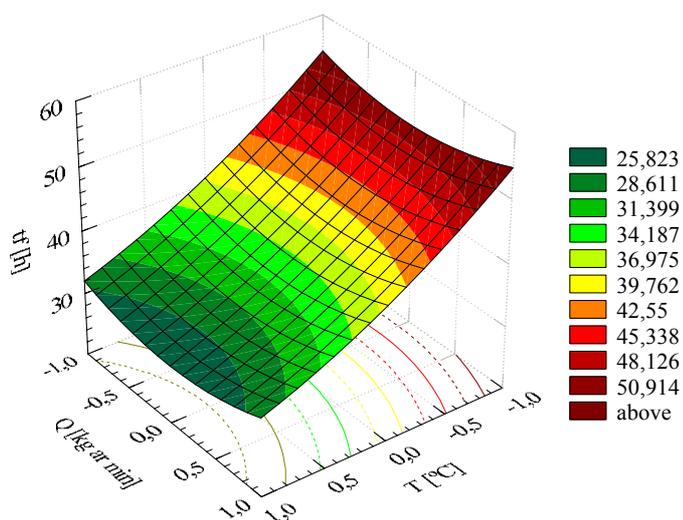


Figura 4.19 – Superfície de resposta para t_f com relação às variáveis T e Q.

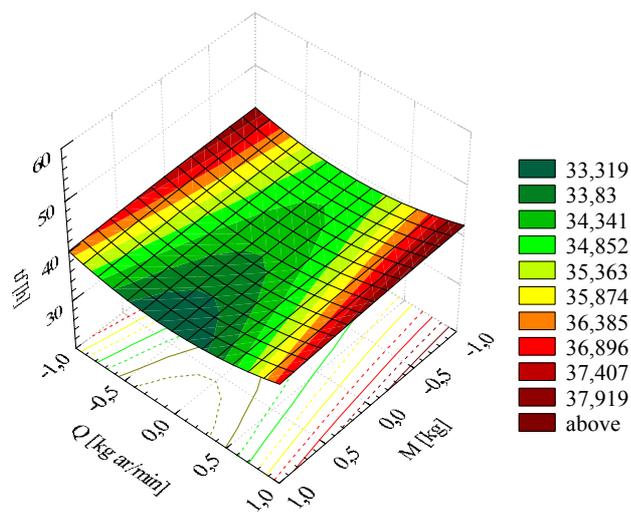


Figura 4.20 – Superfície de resposta para t_f com relação às variáveis M e Q.

Pelas Figuras 4.15 a 4.20 pode-se observar a influência significativa da temperatura no tempo de secagem dos frutos de café, enquanto a influência da massa de café e da vazão de ar sobre o tempo de secagem não foi expressiva, ou seja, a alteração de um nível para outro não causou diferenças significativas no tempo de secagem. As representações são importantes para visualizar a influência das variáveis na simulação da secagem dos frutos de café. Esses resultados indicam que na secagem de café, nas condições estudadas, deve-se operar o secador com maior massa de café e menor vazão de ar, o que resultaria na operação mais econômica. Quanto à temperatura, aspectos tecnológicos de análise sensorial e de qualidade do grão possibilitam a seleção da temperatura de operação, lembrando que o limite de 45°C para a temperatura do fruto não deve ser excedido, para produtos que requerem maior qualidade.

A Tabela 4.7 apresenta os coeficientes do modelo polinomial de segunda ordem, dado pela Equação (4.6), que representa as superfícies de resposta mostradas nas Figuras 4.15 a 4.20. As variáveis x_1 e x_2 da Equação (4.6) são representadas por T, M e Q.

Tabela 4.7 – Coeficientes da Equação (4.6) para t_m e t_f .

Coeficientes	t_m			t_f		
	T x M	T x Q	M x Q	T x M	T x Q	M x Q
β_0	8,7963	8,7963	8,7963	33,8685	33,8685	33,8685
β_1	-2,9444	-2,9444	-1,0694	-13,3861	-13,3861	-0,8639
β_{11}	-1,5556	-1,5556	1,4028	2,5528	2,5528	-0,1972
β_2	-1,0694	-0,4861	-0,4861	-0,8639	0,2500	0,2500
β_{22}	1,4028	0,6528	0,6528	-0,1972	3,6444	3,6444
β_{12}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

4.4.1.2 – Temperatura dos Frutos de Café e do Ar de Secagem

Durante a secagem dos frutos de café foram determinadas as temperaturas do ar de secagem e dos frutos de café. O monitoramento da temperatura da massa de café foi realizado colocando-se alguns frutos em um medidor de temperatura dos frutos de café, com 0,03 m de diâmetro e 0,05 m de altura, esperava-se cerca de 30 segundos quando então a temperatura era obtida no visor digital ECIL modelo Jotta Pj-lh acoplado ao termopar do medidor. A incerteza da medida foi de $\pm 0,8^\circ\text{C}$. Após a leitura da temperatura, os frutos foram realimentados no secador. O local selecionado para fazer o monitoramento da temperatura dos frutos foi a esteira transportadora, acima da descarga do secador, pela facilidade de coletar os frutos de café. No início da secagem, os frutos estão grandes, úmidos e pegajosos, o que dificulta a coleta. As Figuras 4.21 a 4.23 apresentam a temperatura do fruto em função do conteúdo de umidade.

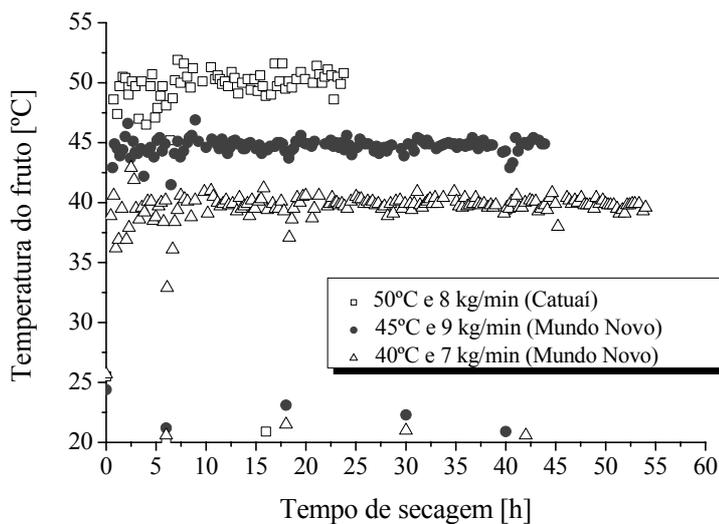


Figura 4.21 – Temperatura dos frutos de café, experimentos com $M = 11,5$ kg.

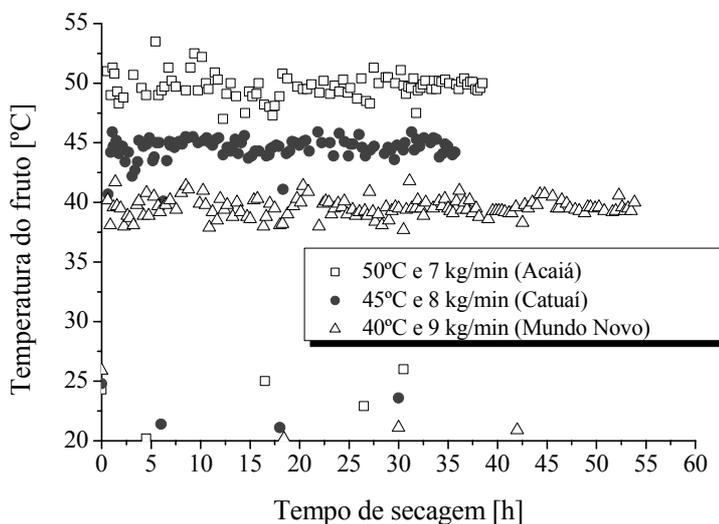


Figura 4.22 – Temperatura dos frutos de café, experimentos com $M = 12,5$ kg.

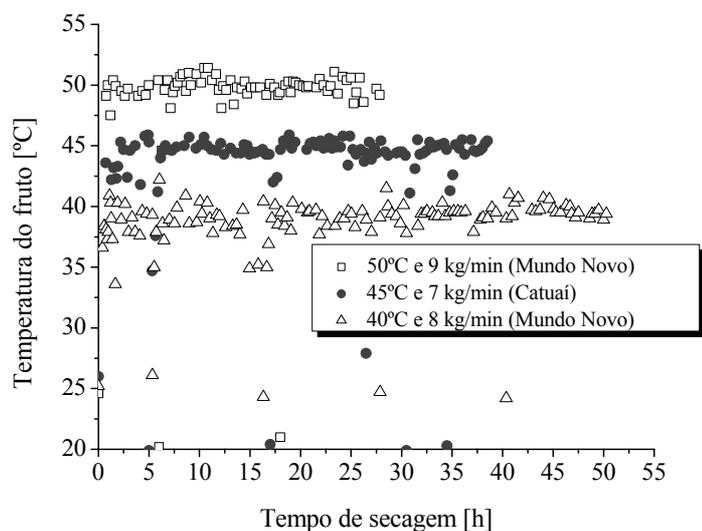


Figura 4.23 – Temperatura dos frutos de café, experimentos com $M = 13,5$ kg.

A fixação de um valor único para temperatura é impossível de ser realizada com o instrumental disponível, ou seja, manter a temperatura constante no valor determinado pelo planejamento experimental. Uma variação para mais ou para menos no valor do *set point* ocorreu durante toda a secagem. Os efeitos que contribuem para essa variação são a distribuição de umidade, de tamanho e do tempo de residência das partículas, além das limitações de um controle manual. A dispersão dos valores de temperatura foi maior no início da secagem, devido às intensas modificações na estrutura e no conteúdo de umidade dos frutos de café neste período. Os pontos situados abaixo da nuvem de pontos, consistem nas temperaturas para o início da operação de secagem (antes do aquecimento do café com ar aquecido), após cada período de descanso.

A Tabela 4.8 mostra os valores da temperatura média dos frutos de café e do desvio padrão, para cada experimento do primeiro planejamento de secagem. No cálculo da temperatura média excluiu-se os valores de temperatura inicial.

Tabela 4.8 – Temperatura média dos frutos de café para o primeiro planejamento de secagem.

Experimento	T média [°C]	σ [°C]
1	39,6	0,7
2	39,5	0,8
3	39,1	1,2
4	44,7	0,6
5	44,5	0,9
6	44,6	0,8
7	49,8	1,2
8	49,7	1,0
9	49,7	1,0

Exceto para as temperaturas no início da operação de secagem (após o período de descanso), verifica-se que os pontos experimentais situaram-se próximos do *set point* e, portanto, apresentaram baixos valores de desvio padrão, o que é um indicativo da eficácia do controle de temperatura adotado na secagem. Os valores médios não ultrapassaram o valor da temperatura (40°C, 45°C e 50°C) adotado no planejamento experimental.

A temperatura do fruto foi controlada manualmente aumentando-se ou diminuindo-se a temperatura do ar de secagem com o auxílio de um variador de tensão elétrica conectado a uma das quatro resistências elétricas da tubulação por onde escoar o ar de secagem (ver Figura 4.2). A ação de aumentar, ou diminuir, a temperatura do ar foi baseada na resposta temperatura do fruto nos instantes em que foi determinada. A temperatura do ar de secagem foi monitorada em oito posições dentro do secador, isto é, na entrada e na saída das quatro

bandejas vibradas. Os oito termopares utilizados estavam conectados a um sistema de aquisição de dados em um microcomputador com o software LabVIEW 6.1[®], o qual foi programado para realizar a gravação dos dados de temperatura do ar ao longo da secagem (a cada 5 min). Todos os termopares utilizados foram previamente calibrados para determinar a incerteza da medida. As Figuras D.1 a D.11, do Apêndice D, apresentam a temperatura do ar, na entrada e na saída das bandejas, para os experimentos realizados no primeiro planejamento de secagem.

4.4.2 – Segundo Planejamento de Secagem

A primeira etapa de experimentos foi realizada para conhecer as melhores condições operacionais para a secagem de café no secador de bandejas vibradas com reciclo. Entretanto, como a temperatura exerceu grande influência na secagem e as diferentes variedades utilizadas nos experimentos foram relevantes frente aos resultados, mascarando a resposta do planejamento, optou-se por realizar um planejamento fatorial completo, fixando-se a temperatura do fruto em 45°C, a qual consiste em um limite superior associado à qualidade do café desidratado, e a mesma variedade de frutos de café. A colheita foi realizada na Fazenda Olhos d'Água, onde se cultivava apenas uma variedade de frutos de café (Mundo Novo).

No segundo planejamento de secagem, os experimentos foram realizados segundo um planejamento fatorial 3². As variáveis estudadas foram: massa inicial de frutos de café (kg) e vazão de ar de secagem (kg/min). A Tabela 4.9 apresenta a matriz de planejamento para o segundo planejamento de secagem. Os níveis das variáveis codificadas podem ser comparados na Tabela 4.1, citada anteriormente.

Tabela 4.9 – Matriz de planejamento 3² para secagem de frutos de café, safra 2004.

Experimentos	Ordem dos experimentos	Variáveis	
		M [kg]	Q [kg ar/min]
1	9°	10	7,0
2	7°	10	8,0
3	8°	10	9,0
4	5°	12	7,0
5	1°	12	8,0
6	6°	12	9,0
7	4°	14	7,0
8	2°	14	8,0
9	3°	14	9,0

A metodologia de secagem foi a mesma indicada na Seção 4.2.1, apenas a operação de colheita e a determinação da temperatura do fruto foram modificadas. A colheita foi

realizada por derriça em peneira. Isso minimiza contaminações de microrganismos existentes no solo. A temperatura inicial do fruto foi medida com um termômetro de radiação infravermelha, RAYTEK ST20, resolução de $0,2^{\circ}\text{C}$ e incerteza da medida de $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$. A metodologia para determinação da incerteza da medida está descrita em Sfredo (2002).

4.4.2.1 – Curvas de Secagem

A determinação do conteúdo de umidade dos frutos de café foi realizada segundo a metodologia descrita na Seção 4.4.1.1. As Figuras 4.24 à 4.33 mostram as curvas de secagem, indicando a margem de erro e a curva ajustada aos dados experimentais para os dois períodos de secagem. A Figura 4.29 mostra a curva de secagem para o experimento repetido (safra 2005).

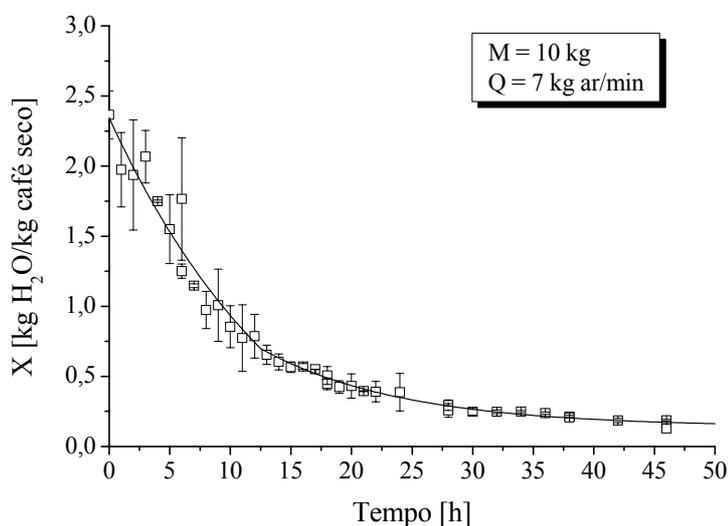


Figura 4.24 – Curva de secagem para o Experimento 1.

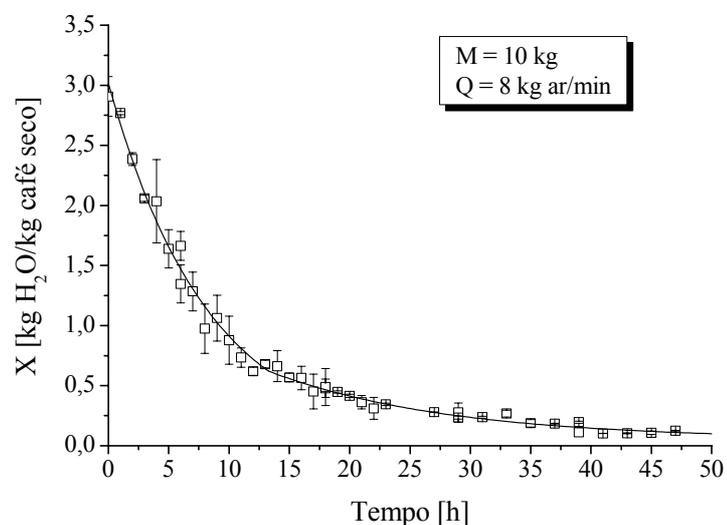


Figura 4.25 – Curva de secagem para o Experimento 2.

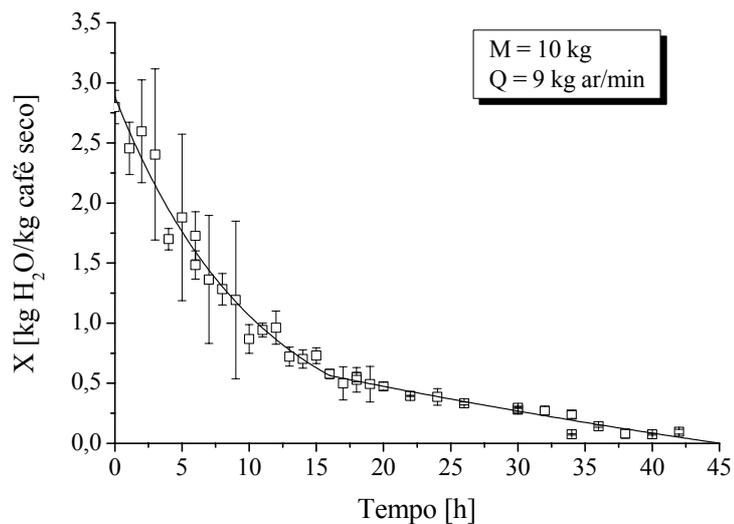


Figura 4.26 – Curva de secagem para o Experimento 3.

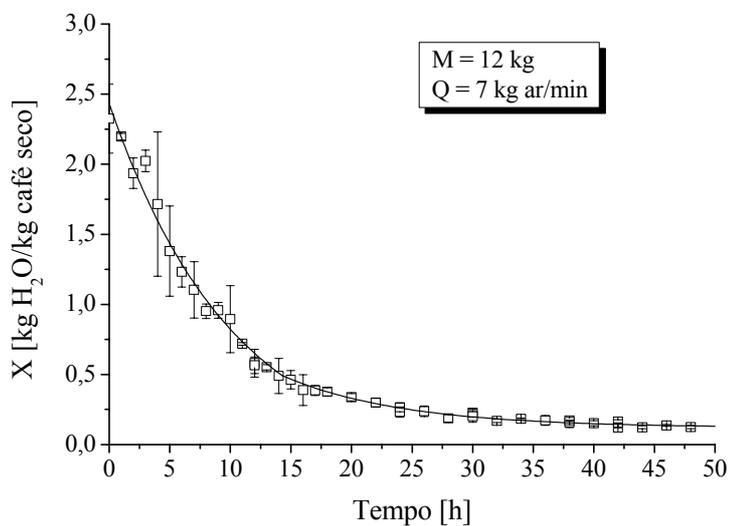


Figura 4.27 – Curva de secagem para o Experimento 4.

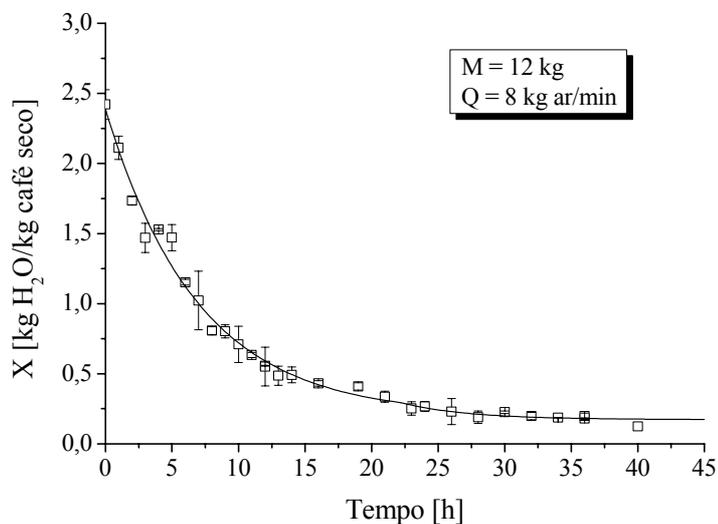


Figura 4.28 – Curva de secagem para o Experimento 5.

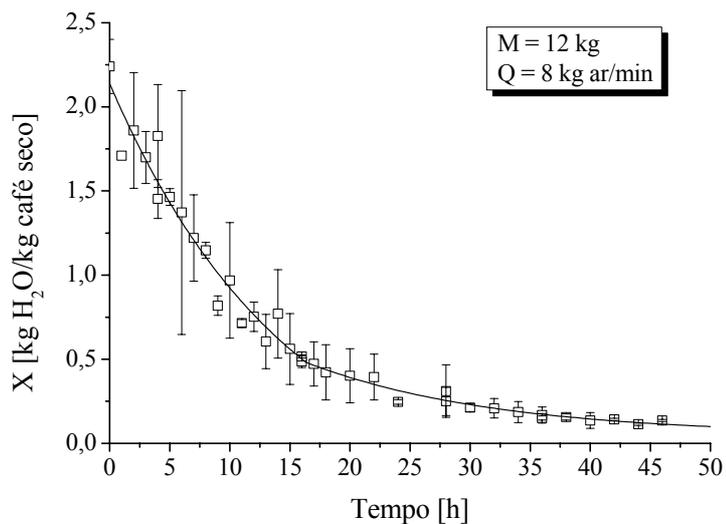


Figura 4.29 – Curva de secagem para o Experimento 5, safra 2005.

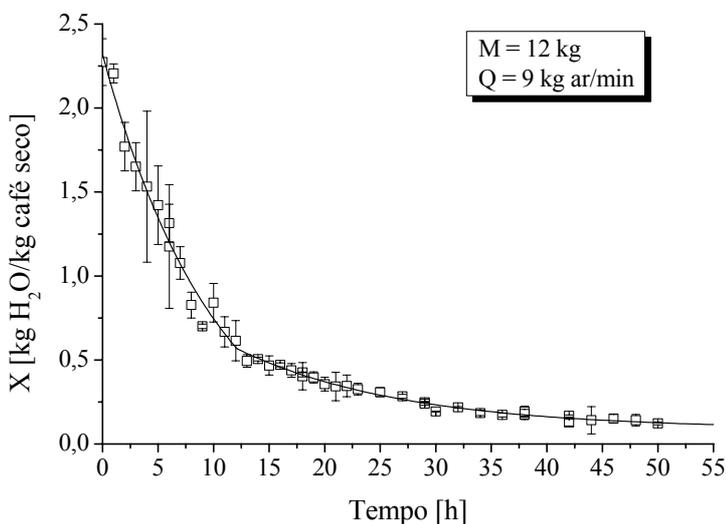


Figura 4.30 – Curva de secagem para o Experimento 6.

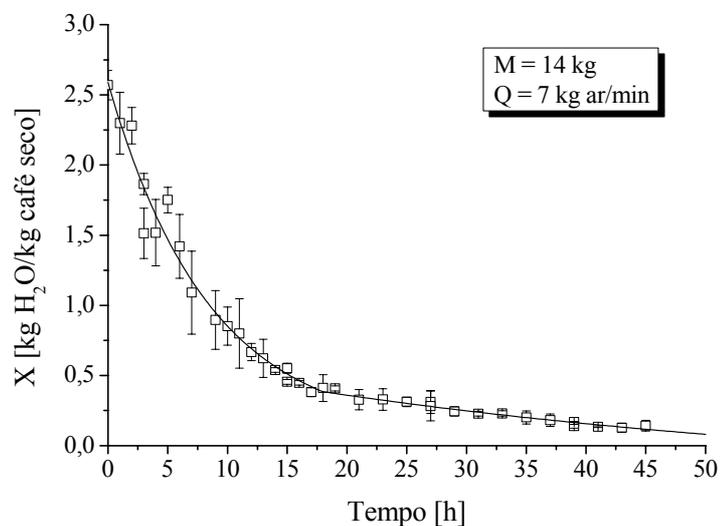


Figura 4.31 – Curva de secagem para o Experimento 7.

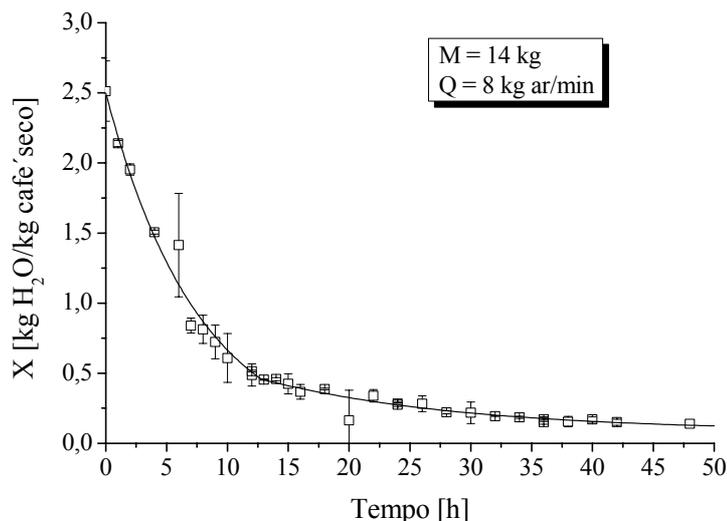


Figura 4.32 – Curva de secagem para o Experimento 8.

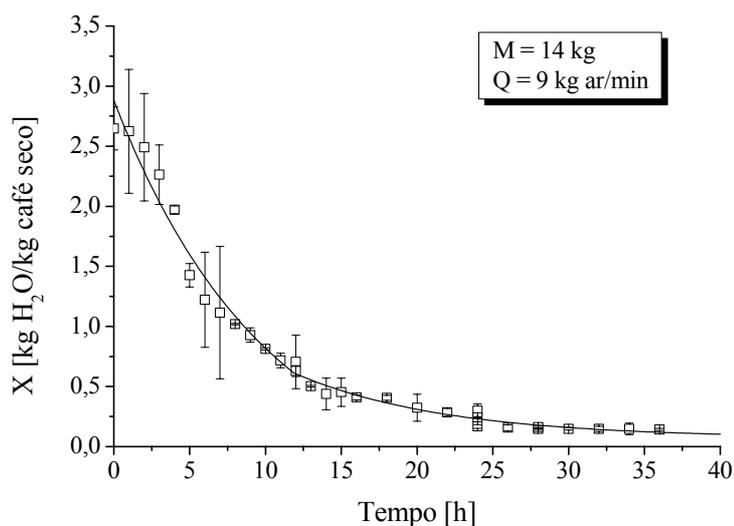


Figura 4.33 – Curva de secagem para o Experimento 9.

Em todas curvas de secagem são evidenciados dois períodos de secagem à taxa decrescente, ocorrendo a transição entre 13 e 18 horas de secagem. Para todas as curvas de secagem observa-se nitidamente a existência de uma maior dispersão do conteúdo de umidade médio no primeiro período de secagem à taxa decrescente; isso é bastante atenuado no segundo período de secagem à taxa decrescente.

A Equação (4.10), Seção 4.4.1.1, novamente ajustou-se aos dados experimentais de conteúdo de umidade em função do tempo de secagem. O valor dos coeficientes “a”, “b” e “c” e do coeficiente de correlação (95% de confiança) para as curvas ajustadas estão na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Coeficientes da Equação (4.10) para os experimentos de secagem (safra 2004).

Experimentos	Período de secagem	Coeficientes			R ²
		a	b	c	
1	1	-0,7116	3,0570	16,1535	0,94
1	2	0,1399	1,6234	11,7179	0,97
2	1	0,0222	2,9966	8,2390	0,98
2	2	0,0529	1,3953	14,7665	0,95
3	1	-0,0888	2,9728	10,5457	0,96
3	2	-1,4181	2,3826	86,8022	0,94
4	1	-0,1404	2,5744	10,1730	0,98
4	2	0,1209	1,5572	9,9593	0,93
5	1	0,2049	2,1829	6,9268	0,98
5	2	0,1728	9,5705	5,0751	0,88
5(2005)	1	-0,3598	2,4977	15,0154	0,95
5(2005)	2	0,0495	1,2301	15,6188	0,93
6	1	-0,2283	2,5482	10,3975	0,98
6	2	0,0882	1,0695	15,0434	0,99
7	1	0,0887	2,5003	8,4305	0,97
7	2	-0,2744	0,9334	51,7863	0,96
8	1	-0,0124	2,5115	7,6269	0,98
8	2	0,0846	0,8092	16,5221	0,93
9	1	-0,3860	3,2664	10,0217	0,97
9	2	0,0715	1,7926	9,9100	0,91

Uma análise das curvas das Figuras 4.24 a 4.33 (ou Figuras C.10 a C.18, Apêndice C) indica que os experimentos operando com menor vazão de ar e massa inicial de café de 10 kg e 14 kg apresentaram secagem com taxa constante (durante 1 h), o mesmo aconteceu com o Experimento 9, pelo fato dos frutos de café apresentarem umidade inicial mais alta (2,6482 kg H₂O/kg café seco). Os demais experimentos evidenciaram dois períodos de secagem com taxa decrescente.

O tempo em que ocorria a mudança de período (t_m) foi quantificado para todos os experimentos, pela determinação do ponto em que se modificava a inclinação da reta, formada pelos pontos experimentais plotados em escala logarítmica. Isso consistia no ponto de interseção de duas retas ajustadas aos pontos experimentais. Os gráficos das curvas de secagem são apresentados no Apêndice C.

Para comparação dos experimentos, o tempo t_f foi quantificado adotando-se como referência o tempo de secagem (t'_f) para a massa de café atingir 0,28 kg H₂O/kg café seco (21,9% bu). Este valor de conteúdo de umidade foi usado como referência devido ao fato de que a secagem, para alguns experimentos, teve de ser interrompida antes de atingir o conteúdo de umidade recomendado para armazenamento, e a massa de café permaneceu em descanso

até ser possível retomar a operação. Os frutos de café provenientes da colheita tinham que ser processados imediatamente e havia um cronograma a ser cumprido para ter disponibilidade de café cereja, durante a safra 2004, na realização de todos ensaios do planejamento. Entretanto, no período de descanso os frutos de café perderam umidade e ao retornarem para o secador o tempo necessário para que atingissem o conteúdo de umidade para armazenamento foi menor. A desconsideração deste fato prejudicaria a comparação do desempenho do secador. O tempo total de secagem (t_f) pode ser determinado pelas equações ajustadas às curvas de secagem para o segundo período a taxa decrescente, até obtenção da umidade final de 14% (bu). Os resultados são mostrados na Tabela 4.11.

Os resultados de t_m e t'_f são apresentados na Tabela 4.11 e foram utilizados como resposta para o planejamento experimental 3^2 . Os resultados da análise estatística, com intervalo de confiança de 95%, obtidos pelo *software* STATISTICA 5.0 estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultados para a resposta tempo de secagem.

Experimentos	t_m [h]	t'_f [h]	Variáveis	t_m		t'_f	
				Efeitos	<i>p-level</i>	Efeitos	<i>p-level</i>
1	18	28	M	-3,33	0,0130	-2,00	0,3545
2	17	27	M ²	-1,67	0,0549	-3,00	0,1548
3	17	30	Q	-1,67	0,0769	0,67	0,7399
4	16	22	Q ²	-1,17	0,1215	-1,00	0,5730
5	13	24	MQ	0,00	1,0000	-3,50	0,2165
6	13	27	-	-	-	-	-
7	15	27	-	-	-	-	-
8	13	26	-	-	-	-	-
9	14	24	-	-	-	-	-

A Tabela 4.11 indica que a única variável que influencia significativamente t_m é a massa inicial de café, pois apresentou nível de significância (*p-level*) inferior a 0,05. A massa inicial (M) apresentou o maior efeito em t_m , ou seja, uma mudança de 10 kg para 14 kg provoca uma diminuição em t_m de aproximadamente 3 horas. Para essa resposta não houve efeitos de interação entre as variáveis M e Q, ou seja, alterar o nível de um fator não influencia nos efeitos de outros fatores. Já para a resposta t'_f , as variáveis não apresentaram efeito significativo no tempo de secagem.

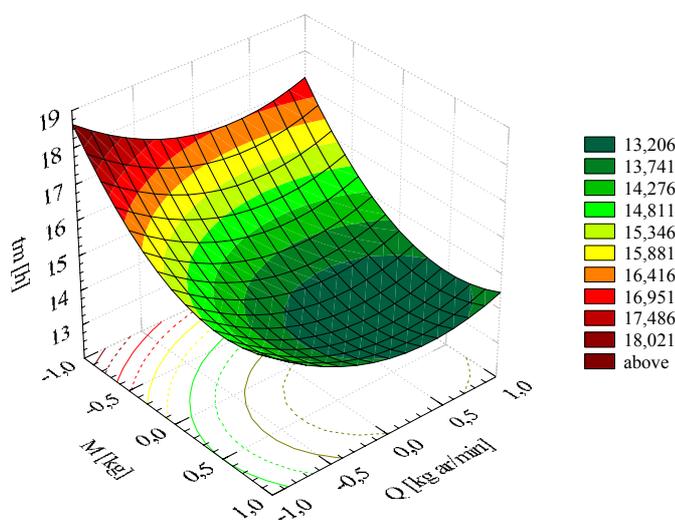
A Tabela 4.12 apresenta o quadro de análise de variância (ANOVA) que foi desenvolvido no *software* STATISTICA 5.0, para evidenciar os fatores significativos e as interações entre os fatores, com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.12 – Análise de variância (ANOVA).

Efeitos	t_m				t'_f			
	SQ	GL	F	<i>p-level</i>	SQ	GL	F	<i>p-level</i>
M	16,67	1	28,12	0,013088	6,00	1	1,19	0,354526
M ²	5,56	1	9,38	0,054913	18,00	1	3,58	0,154830
Q	4,17	1	7,03	0,076885	0,67	1	0,13	0,739906
Q ²	2,72	1	4,59	0,121473	2,00	1	0,40	0,573005
MQ	0,00	1	0,00	1,000000	12,25	1	2,44	0,216460
Erro	1,78	3	-	-	15,08	3	-	-
Total	30,89	8	-	-	54,00	8	-	-

Os valores da Tabela 4.12 comprovam que o único fator significativo, para t_m , foi a massa inicial de frutos de café, pois apresentou nível de significância (*p-level*) inferior a 0,05. Contudo, para t'_f as variáveis, nos níveis estudados, não apresentaram efeitos significativos. O tempo t'_f foi menor para a operação com carga de 12 kg e vazão de ar de 7 kg/min.

As Figuras 4.34 e 4.35 mostram as superfícies de resposta para t_m e t'_f em função das variáveis estudadas: massa inicial de café (M) e vazão de ar de secagem (Q).

Figura 4.34 – Superfície de resposta para t_m com relação às variáveis M e Q.

Observando-se a Figura 4.34, percebe-se o maior efeito da massa inicial (M) no t_m do que o da vazão de ar (Q), neste período de secagem. Para uma mesma vazão de ar, t_m tende a aumentar significativamente quando a massa inicial diminui, diferindo da idéia de que quanto menor a massa de material mais rápida se processa a secagem. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que com maior massa de café nas bandejas do secador (maior quantidade de frutos de café), a tortuosidade do leito aumenta, os efeitos de parede (quando a porosidade é maior próxima às paredes das bandejas) são minimizados, a turbulência do ar em

escoamento aumenta no interior do leito e como conseqüência há um aumento do coeficiente de transferência de calor e massa, diminuindo o tempo de secagem. Além disso, segundo Gupta e Mujumdar (1980), alguns pesquisadores informaram que, em leitos vibro-fluidizados, há aumento da taxa de secagem com o aumento da altura do leito.

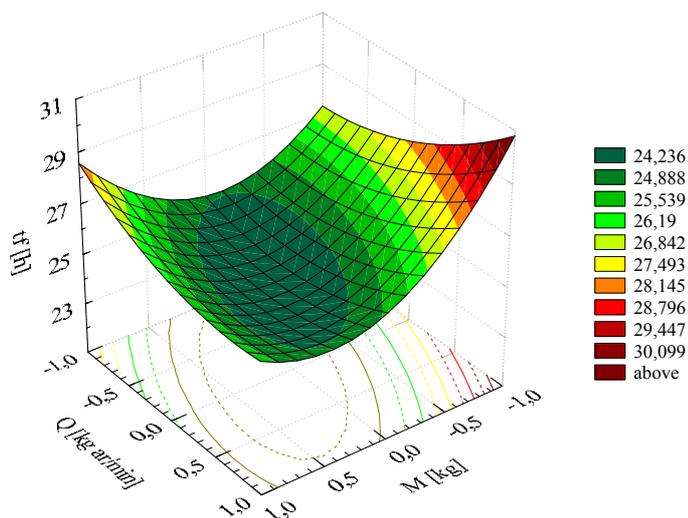


Figura 4.35 – Superfície de resposta para t'_f com relação às variáveis M e Q.

A superfície de resposta da Figura 4.35 indica um aumento de t'_f com a diminuição da massa inicial (M), confirmando que a influência da porosidade do leito é relevante e facilita o escoamento do ar em uma condição de menor massa, gerando menor turbulência no interior do leito. Nota-se também que com o aumento de Q ocorre uma diminuição no tempo de secagem, quase linear com a vazão, evidenciando que uma maior vazão de ar causa maior turbulência no interior do leito e juntamente com uma maior massa de café aumentam os coeficientes de transferência de calor e massa, diminuindo o tempo de secagem. A formação de canais preferenciais pode explicar o comportamento da secagem com menor massa de café.

A Tabela 4.13 apresenta os coeficientes do modelo polinomial de segunda ordem, dado pela Equação (4.6), o qual representa as superfícies de resposta mostradas nas Figuras 4.34 e 4.35. As variáveis x_1 e x_2 da Equação (4.6) são representadas por M e Q.

Tabela 4.13 – Coeficientes da Equação (4.6) para t_m e t'_f .

Coeficientes	t_m	t'_f
β_0	13,2222	23,6667
β_1	-1,6667	-1,0000
β_{11}	1,6667	3,0000
β_2	-0,8333	0,3333
β_{22}	1,6667	1,0000
β_{12}	0,0000	-1,7500

4.4.2.2 – Temperatura dos Frutos de Café e do Ar de Secagem

Durante a secagem dos frutos de café foram determinadas as temperaturas do ar de secagem e dos frutos de café. O monitoramento da temperatura da massa de café foi realizado com um termômetro de radiação infravermelha com mira *laser*, RAYTEK ST20, resolução de 0,2°C e incerteza da medida de $\pm 0,8^\circ\text{C}$.

O local escolhido para fazer o monitoramento da temperatura dos frutos de café foi na esteira transportadora, imediatamente após a descarga do secador (mesmo local onde foram coletados os frutos de café para medir a temperatura nos experimentos da primeira etapa de secagem).

A temperatura dos frutos de café foi medida em intervalos de aproximadamente 15 min, apontando-se a mira *laser* para vários frutos de café que escoavam pelo ponto de monitoramento e a média dos maiores valores de temperatura foi considerada para o controle da temperatura do ar. A diferença de temperatura entre cada fruto de café variou de 0,2 a 5°C mas, em casos extremos, chegou até 10°C. A Tabela 4.14 apresenta a comparação entre alguns valores de temperatura medidos pelo termopar e pelo termômetro de radiação infravermelha.

A temperatura medida pelo termômetro de radiação infravermelha esteve sempre acima dos valores medidos pelo termopar. Provavelmente, ocorre um resfriamento dos frutos de café na cápsula de medida de temperatura, o que não acontece com a utilização do termômetro de radiação infravermelha (a medida da temperatura é quase instantânea).

Tabela 4.14 – Comparação entre a temperatura medida com termopar e com termômetro infravermelho.

Temperatura dos frutos [°C]		Temperatura dos frutos [°C]	
Infravermelho	Termopar	Infravermelho	Termopar
45,1	43,6	45,7	42,6
45,9	45,1	45,5	43,8
45,1	44,3	44,9	42,0
45,5	43,6	44,5	41,5
46,1	43,9	44,5	42,6
44,3	42,6	45,1	43,3
44,5	42,9	44,7	42,1
45,9	44,5	45,1	42,5

As Figuras 4.36 a 4.44 apresentam a temperatura do fruto em função do tempo de secagem.

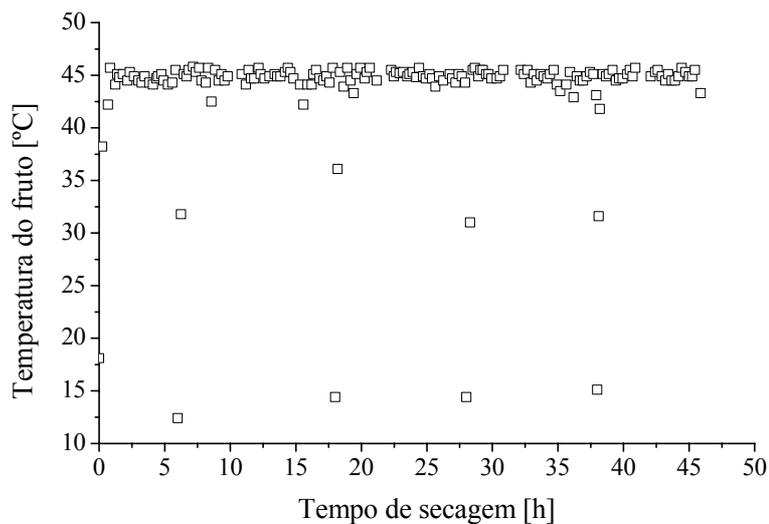


Figura 4.36 – Temperatura dos frutos de café para o Experimento 1.

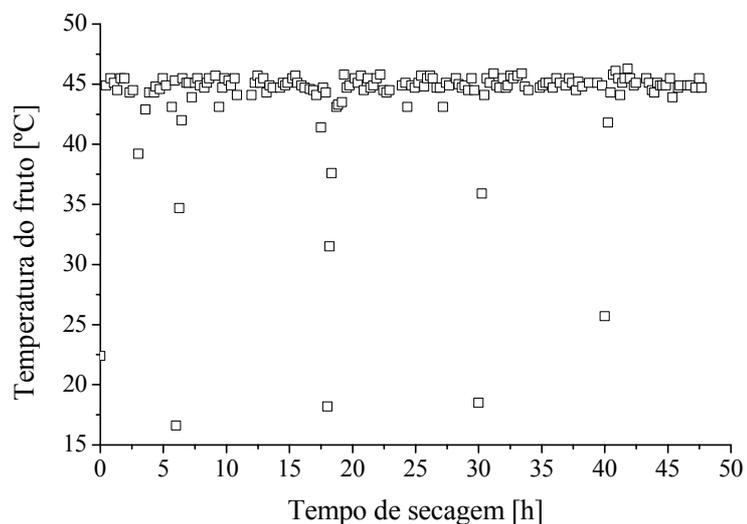


Figura 4.37 – Temperatura dos frutos de café para o Experimento 2.

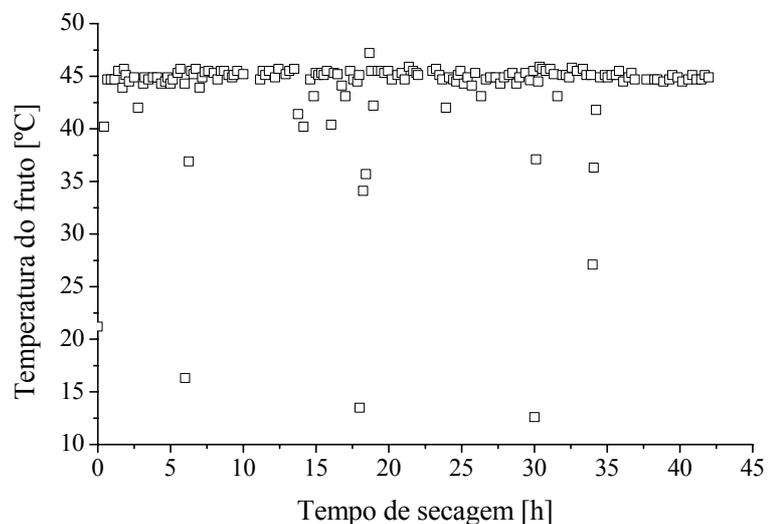


Figura 4.38 – Temperatura dos frutos de café para o Experimento 3.

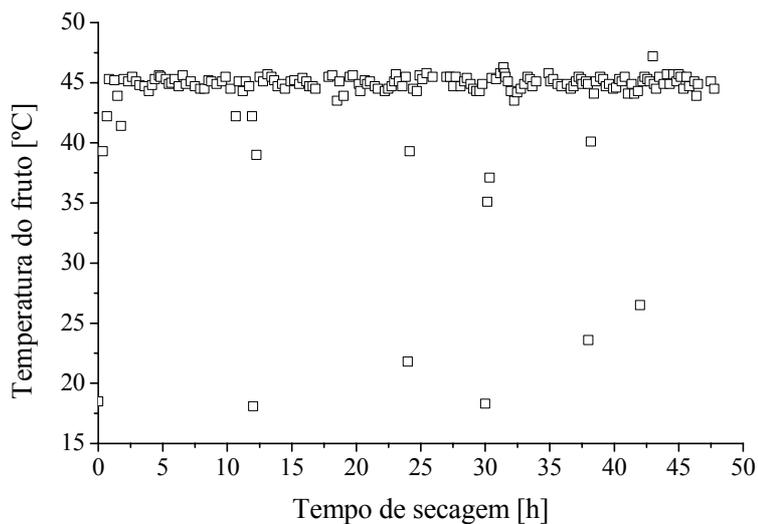


Figura 4.39 – Temperatura dos frutos de café para o Experimento 4.

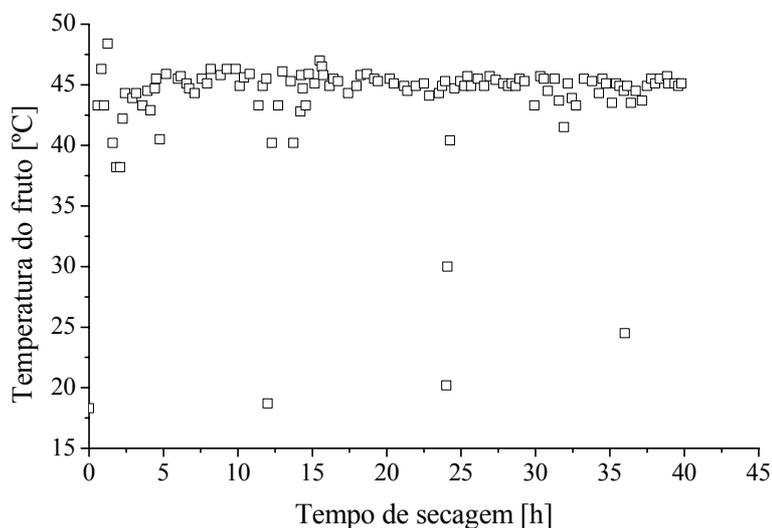


Figura 4.40 – Temperatura dos frutos de café para o Experimento 5.

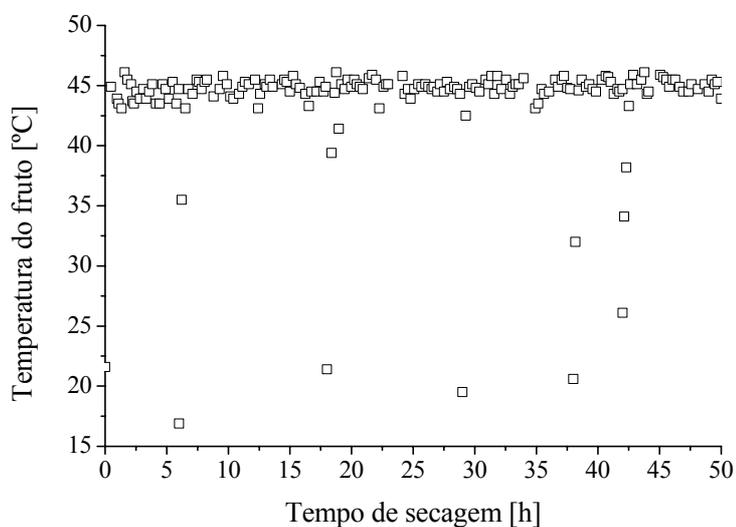


Figura 4.41 – Temperatura dos frutos de café para o Experimento 6.

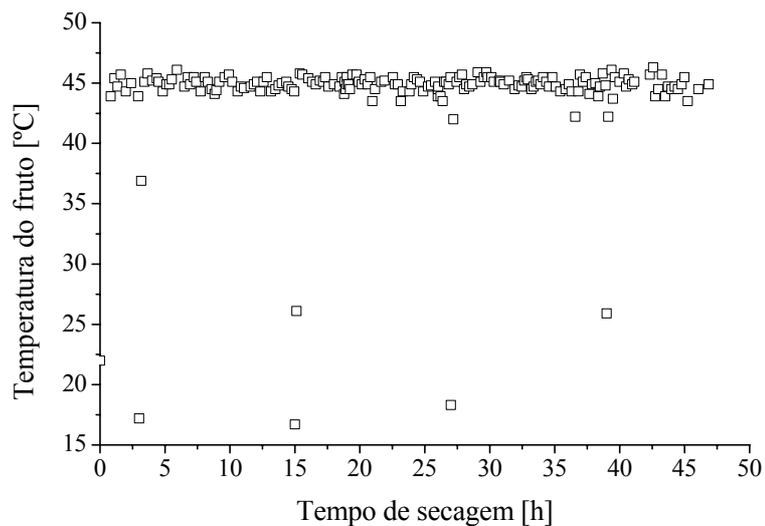


Figura 4.42 – Temperatura dos frutos de café para o Experimento 7.

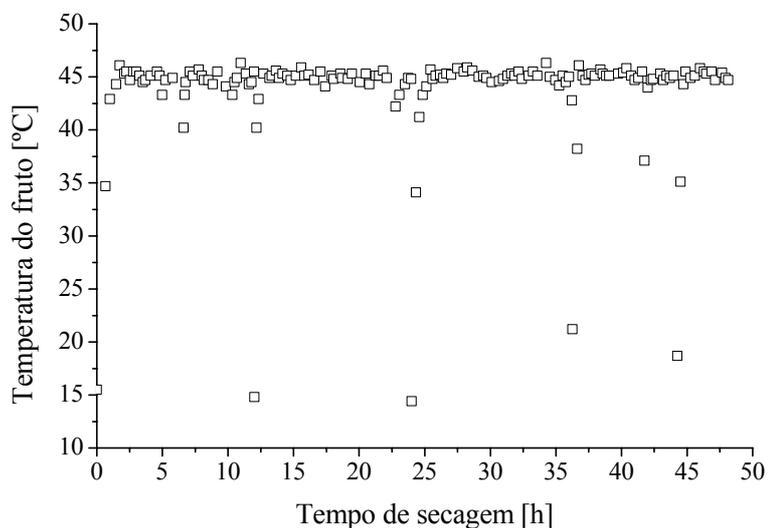


Figura 4.43 – Temperatura dos frutos de café para o Experimento 8.

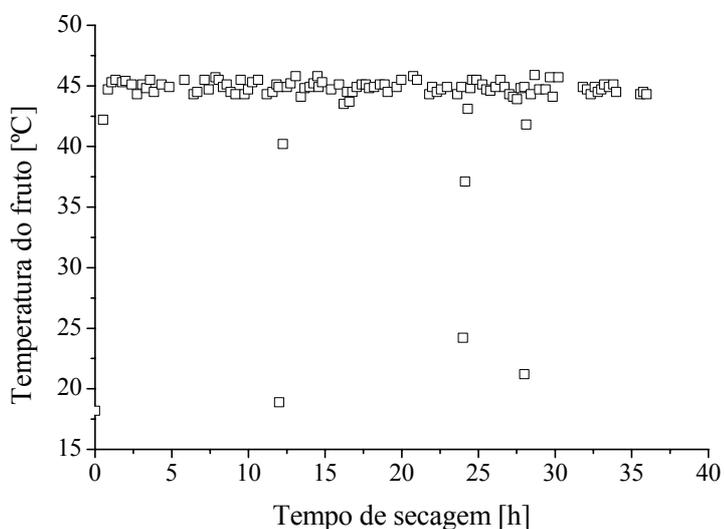


Figura 4.44 – Temperatura dos frutos de café para o Experimento 9.

A fixação de um valor único para temperatura é impossível de ser realizada com o instrumental disponível, ou seja, manter a temperatura constante no valor determinado pelo planejamento experimental. Uma variação para mais ou para menos no valor do *set point* ocorreu durante toda a secagem.

Os efeitos que contribuem para essa variação são a distribuição de umidade, de tamanho e do tempo de residência das partículas, além das limitações de um controle manual. A dispersão dos valores de temperatura foi maior no início da secagem, devido às intensas modificações na estrutura e no conteúdo de umidade dos frutos de café neste período. Os pontos situados abaixo da nuvem de pontos, consistem nas temperaturas para o início da operação de secagem (antes do aquecimento do café com ar aquecido), após cada período de descanso.

Exceto as temperaturas para o início da operação de secagem após o período de descanso, verifica-se que os pontos experimentais situaram-se em torno de uma reta na temperatura de 45°C, sendo que o desvio padrão médio de todas as medidas foi de $\pm 0,9^\circ\text{C}$ o que é um indicativo da eficácia do controle de temperatura adotado na secagem. A Tabela 4.15 mostra os valores da média e do desvio padrão para cada experimento do segundo planejamento de secagem.

Exceto para as temperaturas no início da operação de secagem (após o período de descanso), verifica-se que os pontos experimentais situaram-se próximos do *set point* e, portanto, apresentaram baixos valores de desvio padrão. Os valores médios não ultrapassaram o valor da temperatura adotada no planejamento experimental, 45°C.

Tabela 4.15 – Temperatura média dos frutos de café para o segundo planejamento de secagem.

Experimento	T média [°C]	σ [°C]
1	44,9	0,7
2	44,9	0,9
3	44,9	0,9
4	44,9	0,7
5	44,7	1,5
6	44,8	0,8
7	44,9	0,6
8	44,9	0,8
9	44,9	0,9

A temperatura do ar de secagem na entrada e na saída das bandejas foi determinada

utilizando a mesma metodologia descrita na seção 4.4.1.2. As Figuras D.12 a D.20, do Apêndice D, apresentam a temperatura do ar, na entrada e nas saídas das bandejas, para os experimentos realizados no segundo planejamento de secagem.

4.4.2.3 – Distribuição do Conteúdo de Umidade

Neste secador, ao contrário dos secadores convencionais, os frutos de café alimentados inicialmente no alimentador vibratório, escoam pelas bandejas perfuradas e pelos vertedouros que conectam as bandejas entre si, provocando um efeito de mistura. Este efeito deve homogeneizar o conteúdo de umidade dos frutos de café ao longo da secagem porque, apesar das partículas apresentarem diferentes tempos de residência no secador, as sucessivas passagens dos frutos pelo túnel de secagem (reciclo) fazem com que uma partícula que apresentou um tempo de residência maior no início vá diminuindo esse tempo de permanência no secador por estar mais seca do que as demais, visto que o tempo de residência médio diminui com a diminuição do conteúdo de umidade (ver Capítulo 6).

Para estudar a homogeneização da distribuição do conteúdo de umidade dos frutos de café durante a secagem no secador de bandejas vibradas com reciclo foram retirados vinte frutos de café do secador, em três etapas diferentes da secagem: inicial (antes de ser alimentado no secador); intermediária; e final. O critério adotado para a definição do tamanho das amostras fez com que a diminuição da massa de café, devido a toda amostragem fosse inferior a 2%, o que minimiza influências no escoamento.

Para a determinação da distribuição do conteúdo de umidade inicial dos frutos de café, foram retirados vinte frutos aleatoriamente da massa de café cereja a ser alimentada no secador. Na distribuição do conteúdo de umidade intermediária, os vinte frutos de café foram retirados na esteira transportadora (ver Figura 4.1, indicação 3), conforme abandonavam o túnel vertical de secagem. Para a distribuição do conteúdo de umidade final, realizou-se o quarteamento de toda a massa de frutos de café retirada do secador, para obter-se vinte frutos de café. Todas as amostras para a determinação da distribuição do conteúdo de umidade foram levadas à estufa à 105°C até massa constante.

Os histogramas de distribuição de conteúdo de umidade dos frutos de café, para o segundo planejamento de secagem (no início, durante e ao final da secagem), são apresentados nas Figuras 4.45 a 4.54.

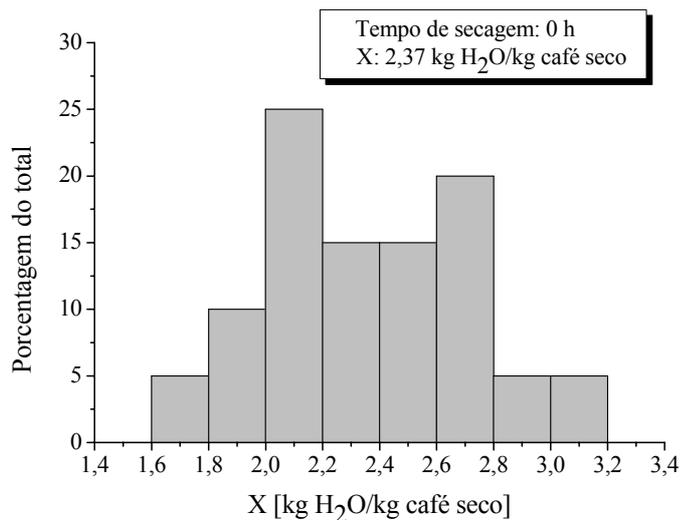


Figura 4.45(a) – Distribuição de umidade inicial para o Experimento 1.

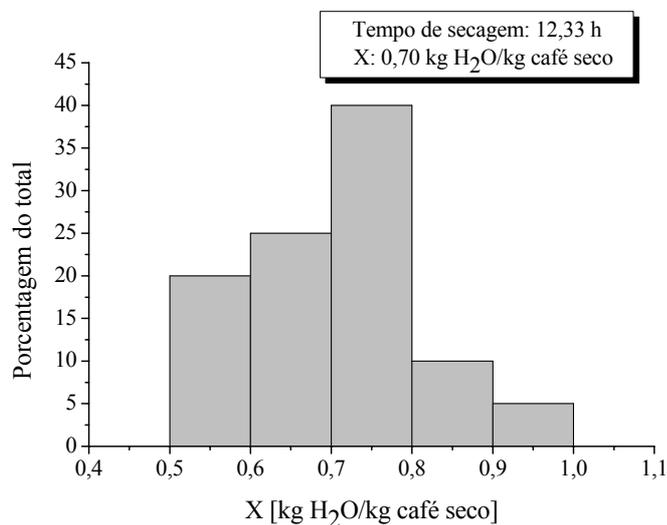


Figura 4.45 (b) – Distribuição de umidade durante a secagem para o Experimento 1.

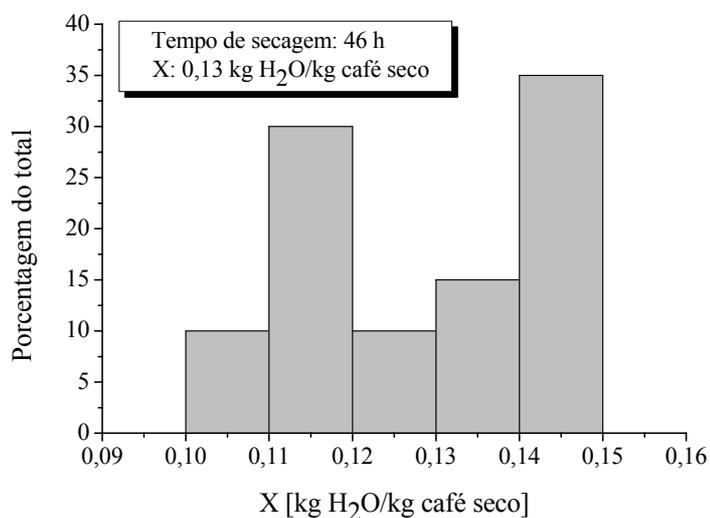


Figura 4.45 (c) – Distribuição de umidade final para o Experimento 1.

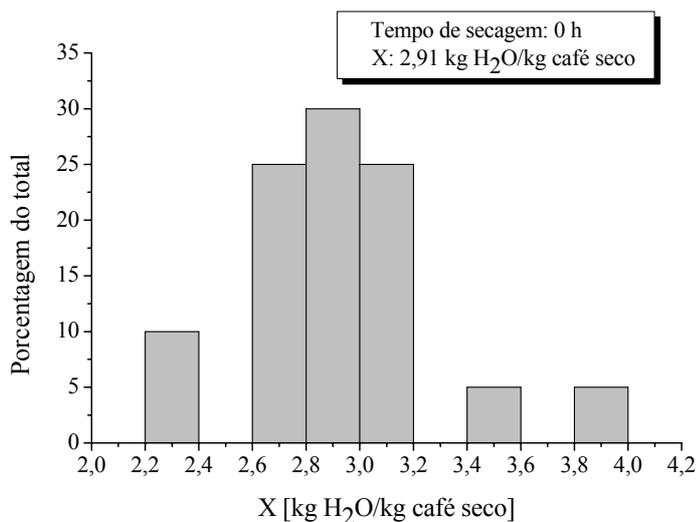


Figura 4.46 (a) – Distribuição de umidade inicial para o Experimento 2.

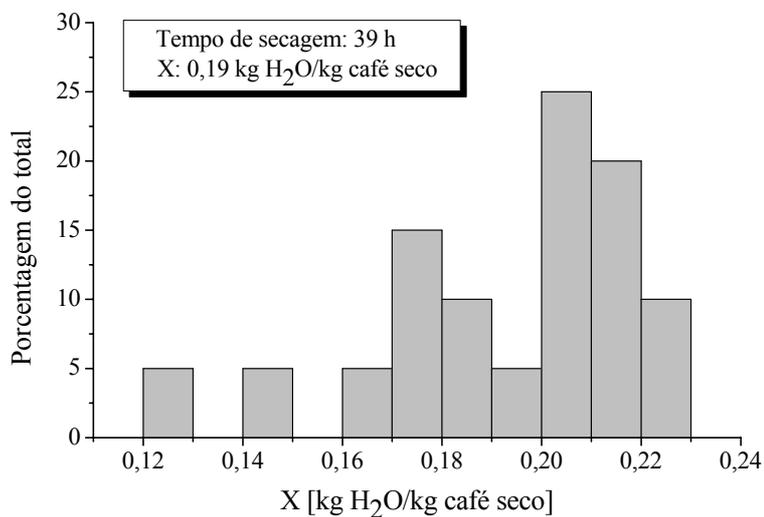


Figura 4.46 (b) – Distribuição de umidade durante a secagem para o Experimento 2.

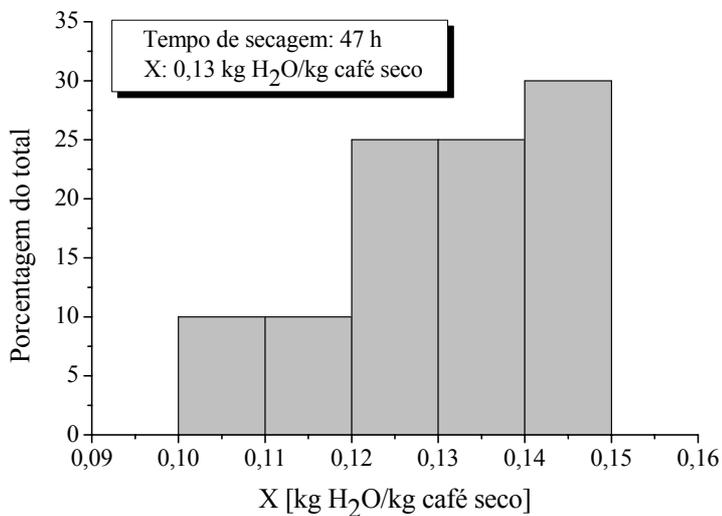


Figura 4.46 (c) – Distribuição de umidade final para o Experimento 2.

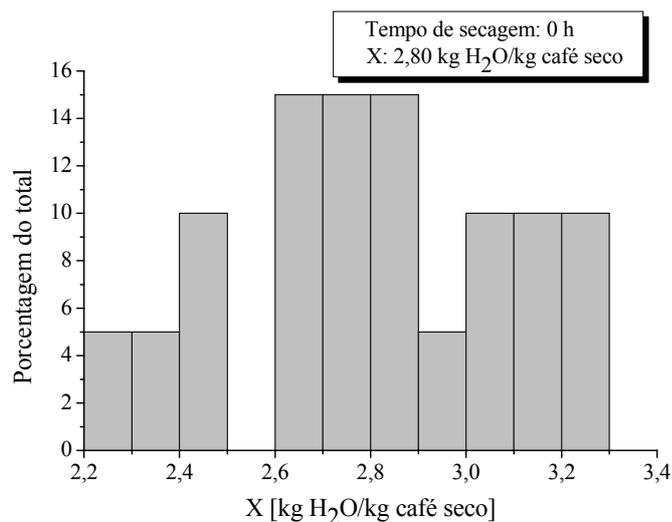


Figura 4.47 (a) – Distribuição de umidade inicial para o Experimento 3.

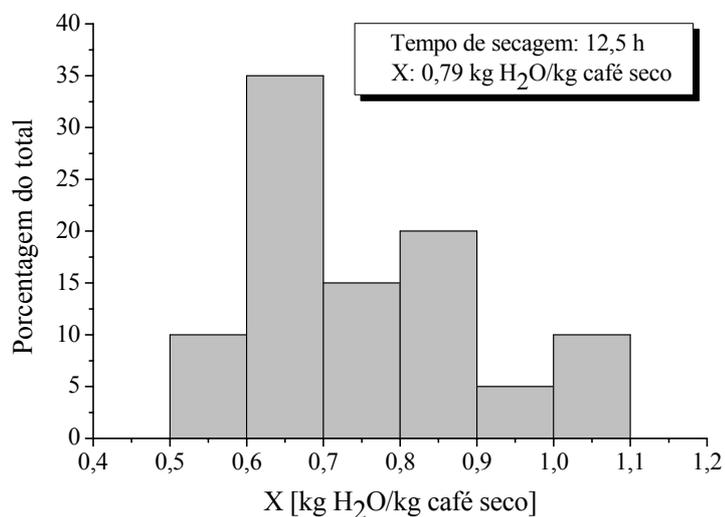


Figura 4.47 (b) – Distribuição de umidade durante a secagem para o Experimento 3.

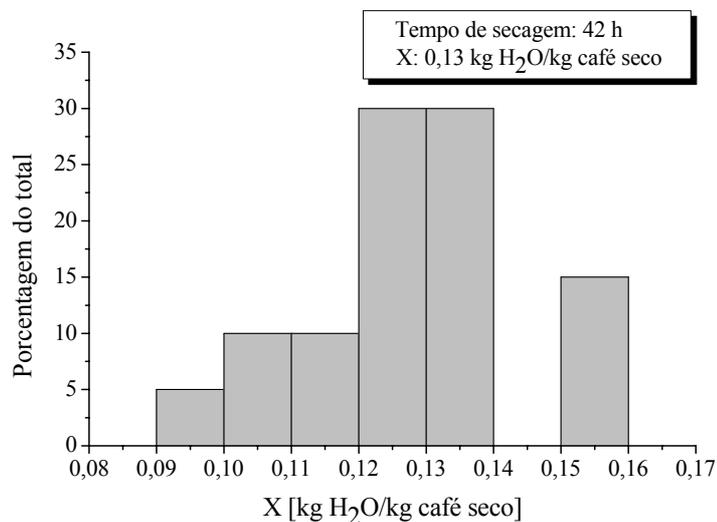


Figura 4.47 (c) – Distribuição de umidade final para o Experimento 3.

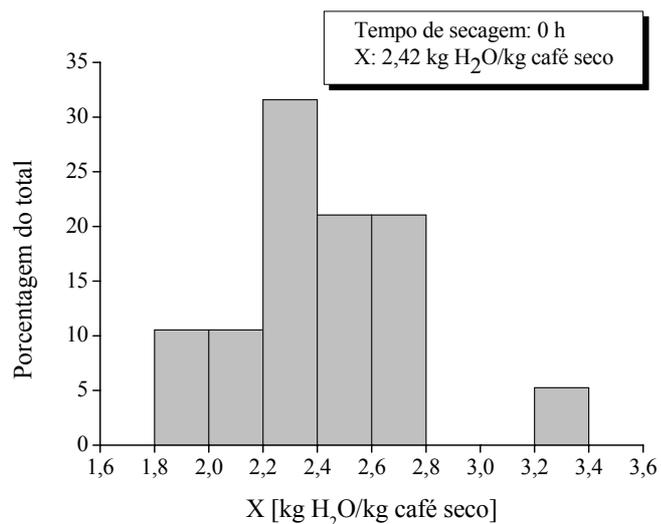


Figura 4.48 (a) – Distribuição de umidade inicial para o Experimento 4.

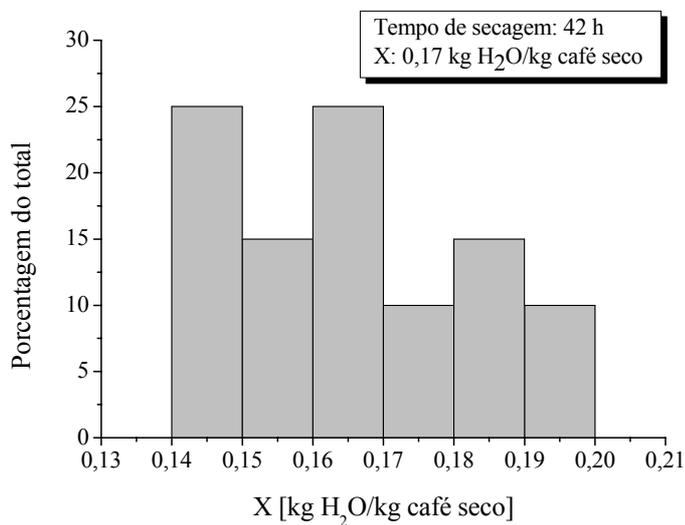


Figura 4.48 (b) – Distribuição de umidade durante a secagem para o Experimento 4.

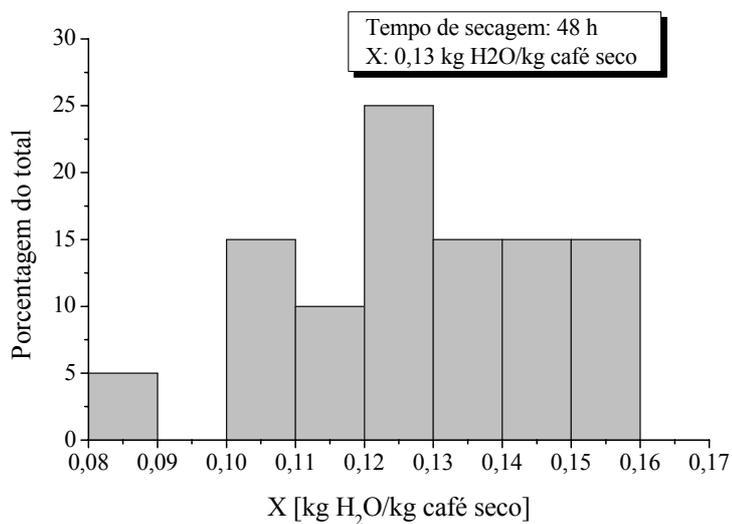


Figura 4.48 (c) – Distribuição de umidade final para o Experimento 4.

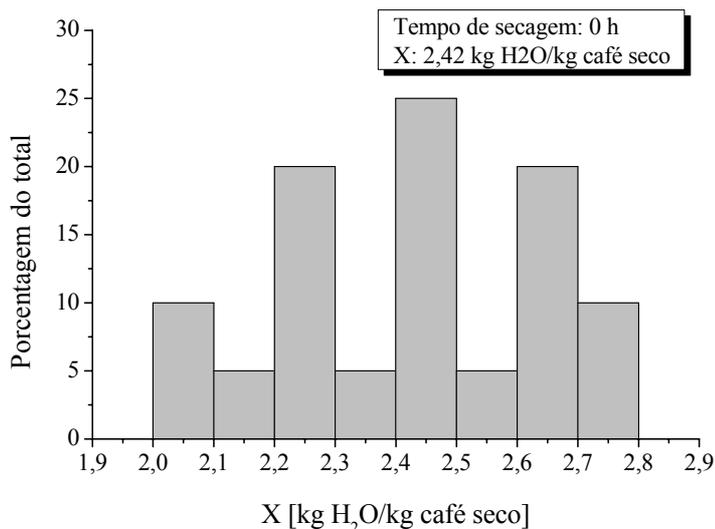


Figura 4.49 (a) – Distribuição de umidade inicial para o Experimento 5.

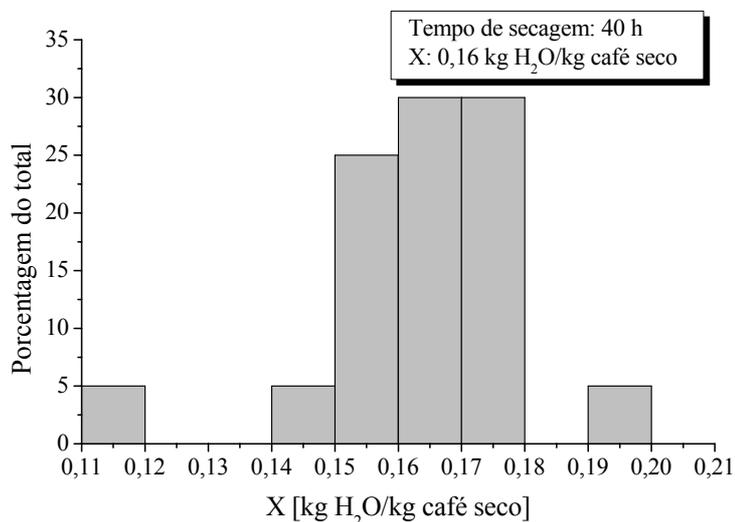


Figura 4.49 (c) – Distribuição de umidade final para o Experimento 5.

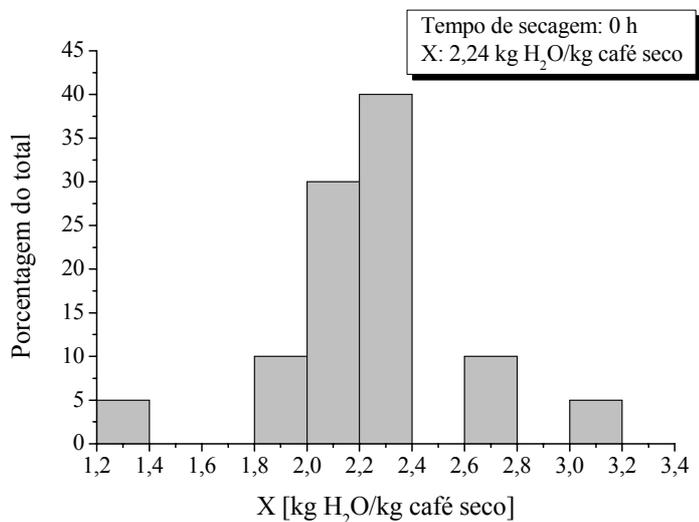


Figura 4.50 (a) – Distribuição de umidade inicial para o Experimento 5 (2005).

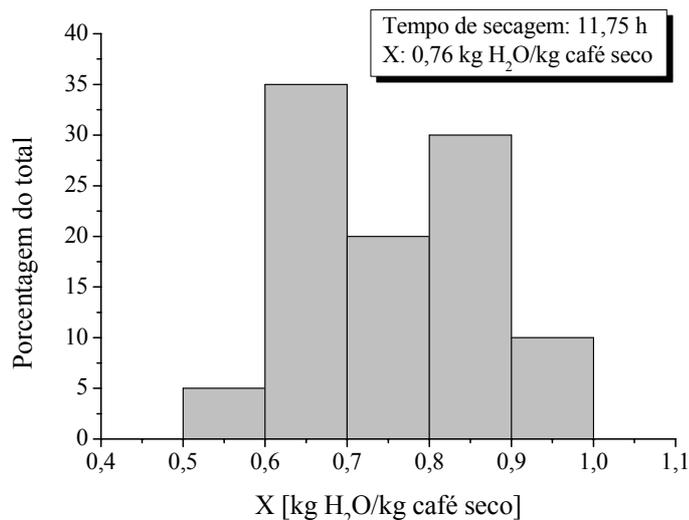


Figura 4.50 (b) – Distribuição de umidade durante a secagem para o Experimento 5 (2005).

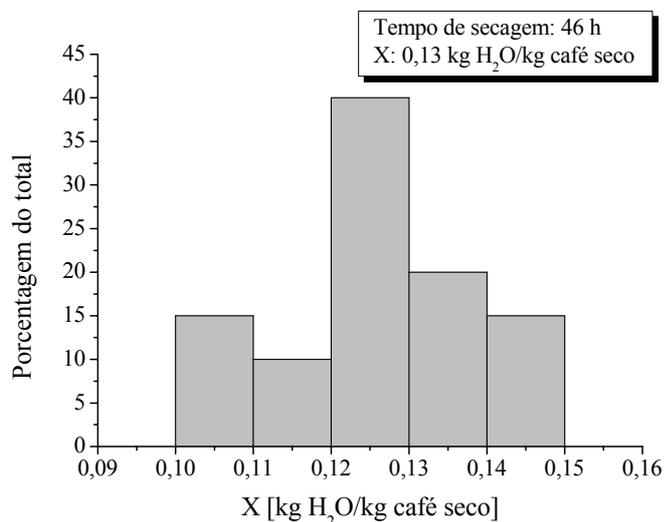


Figura 4.50 (c) – Distribuição de umidade final para o Experimento 5 (2005).

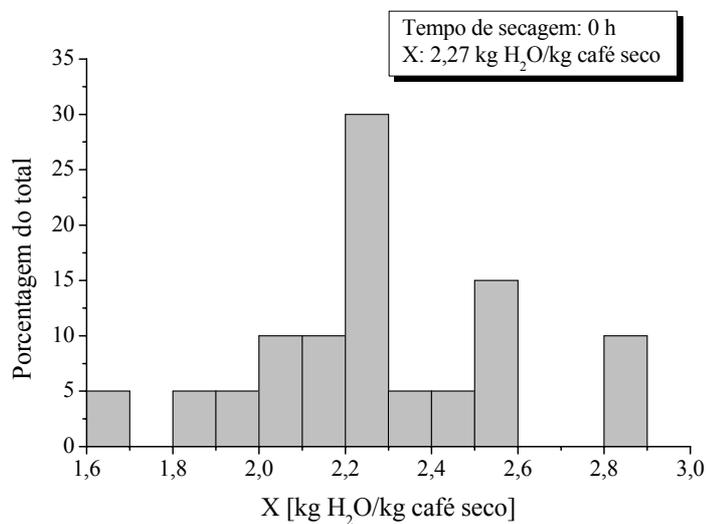


Figura 4.51 (a) – Distribuição de umidade inicial para o Experimento 6.

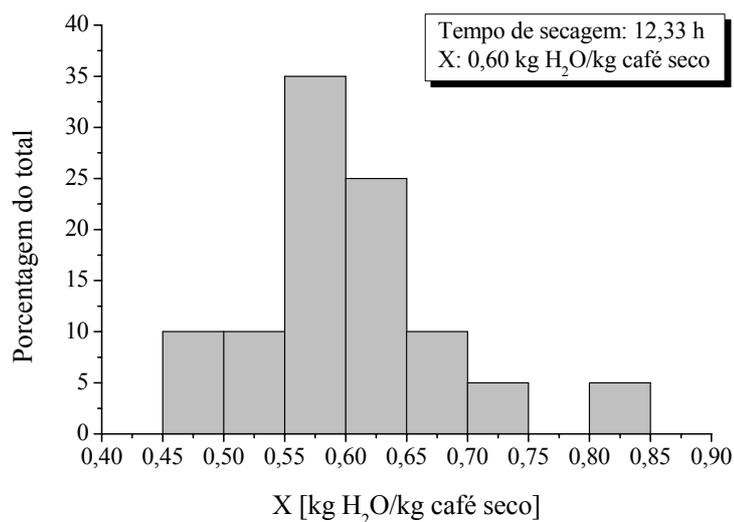


Figura 4.51 (b) – Distribuição de umidade durante a secagem para o Experimento 6.

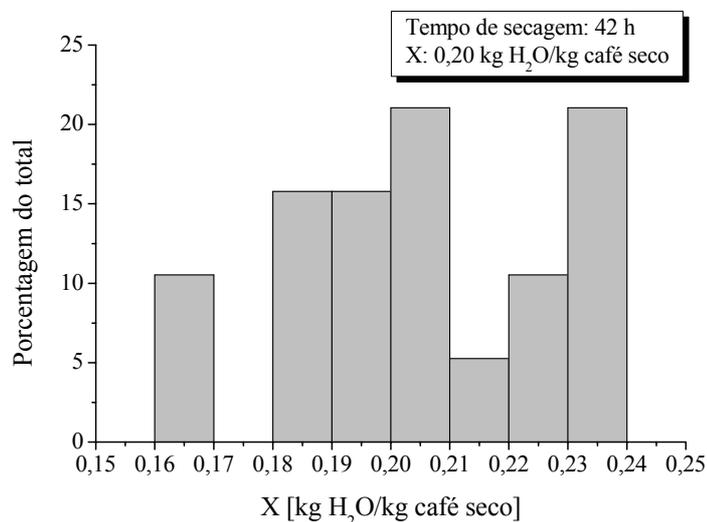


Figura 4.51 (b) – Distribuição de umidade durante a secagem para o Experimento 6.

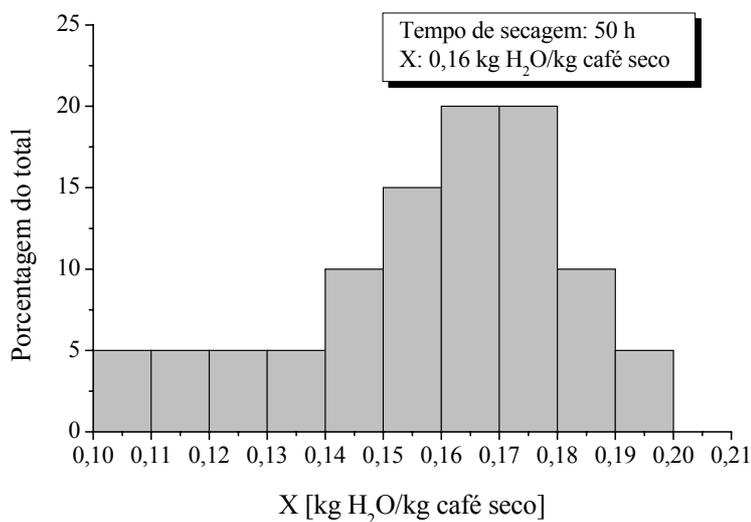


Figura 4.51 (c) – Distribuição de umidade final para o Experimento 6.

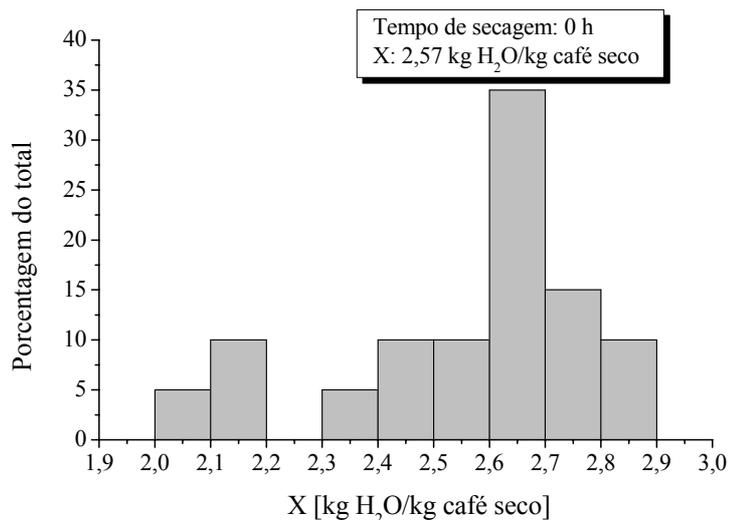


Figura 4.52 (a) – Distribuição de umidade inicial para o Experimento 7.

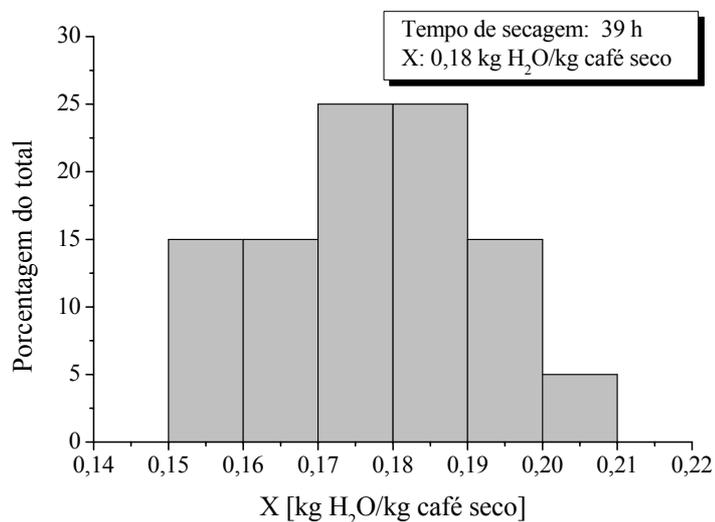


Figura 4.52 (b) – Distribuição de umidade durante a secagem para o Experimento 7.

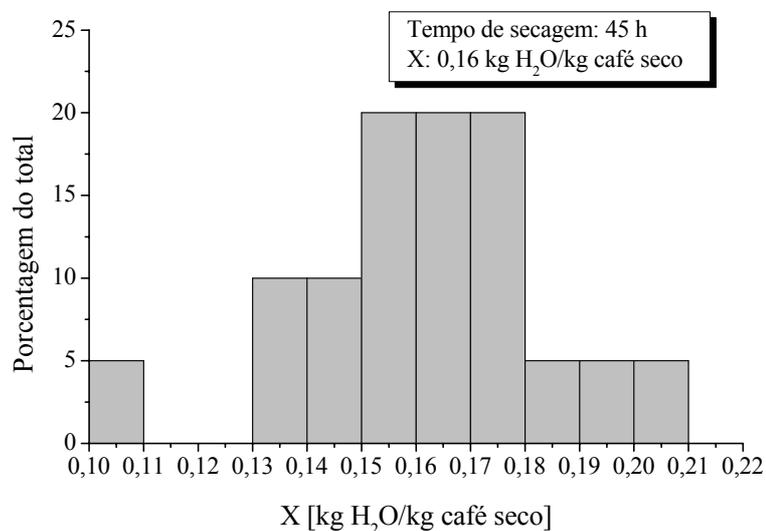


Figura 4.52 (c) – Distribuição de umidade final para o Experimento 7.

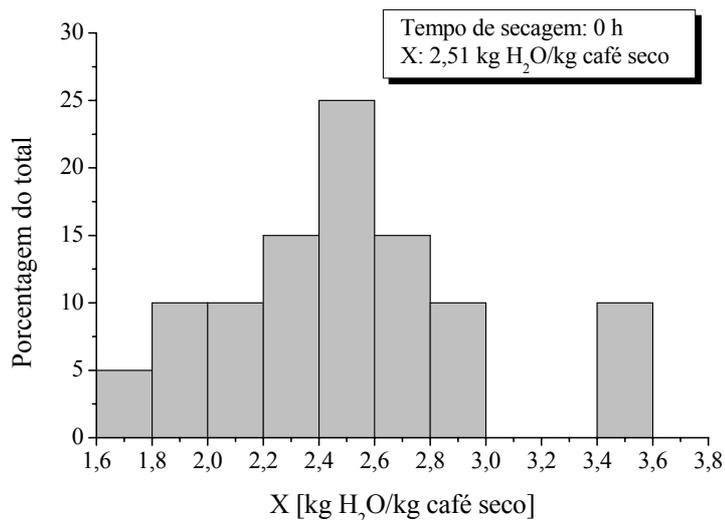


Figura 4.53 (a) – Distribuição de umidade inicial para o Experimento 8.

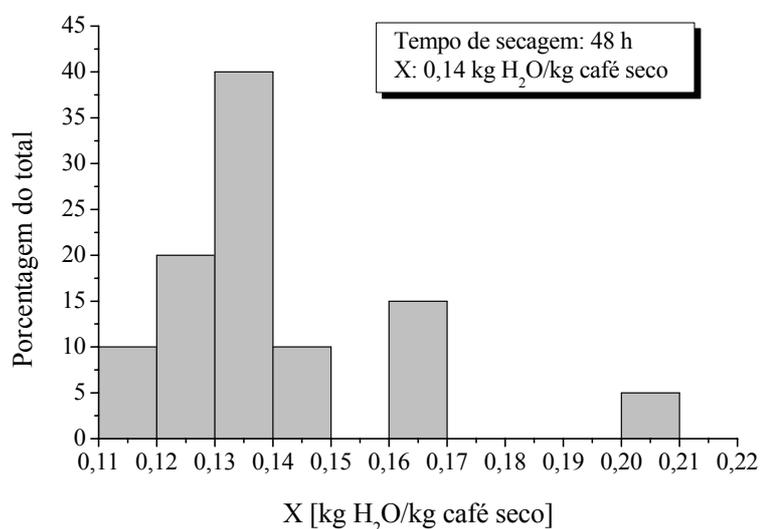


Figura 4.53 (c) – Distribuição de umidade final para o Experimento 8.

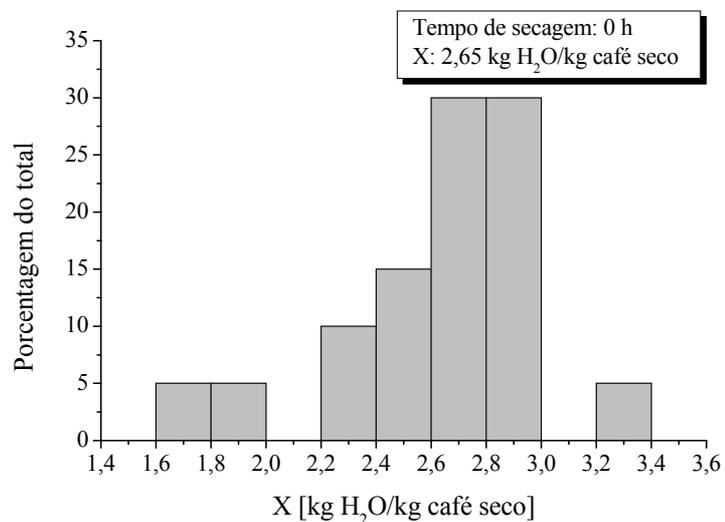


Figura 4.54 (a) – Distribuição de umidade inicial para o Experimento 9.

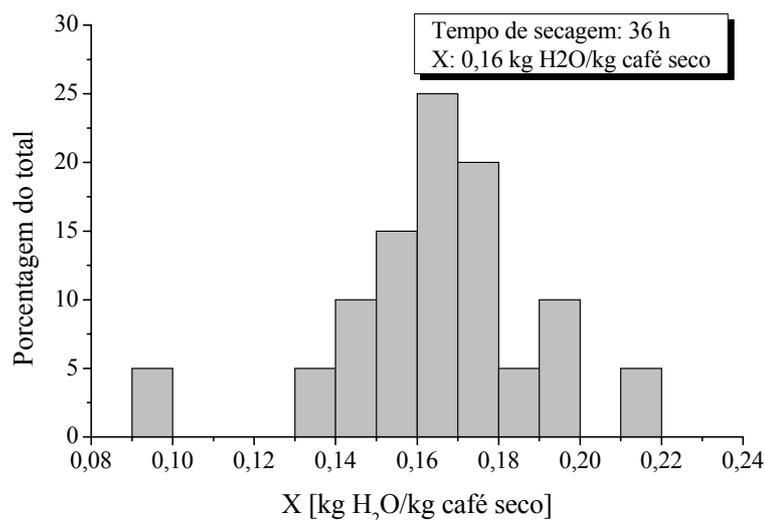


Figura 4.54 (c) – Distribuição de umidade final para o Experimento 9.

Na maioria dos histogramas de distribuição do conteúdo de umidade, a maior porcentagem de frutos de café esteve próxima ao conteúdo de umidade médio. Isto indica que o uso do conteúdo de umidade médio para determinar o tempo de secagem é apropriado. Os frutos de café com maiores conteúdos de umidade ficam misturados com outros de menores umidades, com o tempo de armazenamento ocorre equalização do conteúdo de umidade.

A distribuição de umidade inicial (Figuras 4.45 à 4.54 com índice (a)) apresenta-se mais ampla do que as distribuições de umidade ao longo da secagem. O mesmo comportamento foi observado por Cronin (1998), que afirma que os secadores de bandejas em batelada podem ser considerados, em termos estatísticos, como a transformação de uma população inicial com distribuição ampla de conteúdo de umidade inicial até uma distribuição mais estreita de variação de umidade final. Esta última terá uma menor dispersão em torno da média e uma variância reduzida quando comparada com a distribuição de umidade da matéria-prima úmida.

Quando o escoamento de algumas partículas é dificultado, no início da secagem, devido à adesão entre os frutos de café e destes com as bandejas, as partículas apresentam secagem mais intensa, o que pode ser verificado nas Figuras 4.45 (b); 4.47 (b); 4.50(b) e 4.51(b). Para tempos de secagem similares (cerca de 12 h) a maior parte das partículas apresentou conteúdo de umidade menor do que o conteúdo de umidade médio.

Os histogramas de distribuição de umidade final (Figuras 4.45 à 4.54 com índice (c)) não apresentaram uma distribuição normal, mas sim um deslocamento para a direita. Este mesmo comportamento foi obtido por Cronin (1998), na simulação da secagem de cubos de

cenoura pelos modelos de Markov e Monte Carlo, os quais predizem que a distribuição de umidade das bandejas durante o processo de secagem não é exatamente simétrica sobre o valor médio, mas está ligeiramente direcionada para o conteúdo de umidade mais alto. Isto é consistente com considerações teóricas pelas quais, segundo Cronin (1998), uma quantidade inicialmente distribuída simetricamente e que varia com o tempo pode progressivamente tornar-se direcionada para a direita.

Outro fator que influencia a secagem e a homogeneização da distribuição do conteúdo de umidade é o tamanho dos frutos de café. Como a amostra é relativamente pequena não é possível realizar uma seleção quanto ao tamanho dos frutos, que é realizada pelos produtores de café durante a lavagem. Como a operação de secagem de frutos de café é um processo difusivo e que depende fortemente do raio da partícula, a distribuição de tamanhos, certamente, influencia na distribuição de conteúdo de umidade.

Ao final da secagem, comparando-se as Figuras 4.45 (c), 4.46 (c) e 4.47 (c), observa-se que ao operar com maior vazão de ar (Experimento 3), menos do que 15% dos frutos de café apresentaram conteúdo de umidade maior do que 0,14 kg H₂O/kg café seco, enquanto que para os outros ensaios, este parâmetro situou-se em 30%.

Isso mostra que o material seco com maior vazão de ar pode ser menos suscetível a fermentação, devido à maior homogeneidade do produto, sobretudo pela existência de menor quantidade de frutos de café com maiores umidades que a especificada para estocagem.

4.5 – Encolhimento

Um fenômeno importante na secagem de produtos agrícolas é a contração volumétrica que ocorre durante a secagem. O encolhimento é explicado pelo fato de que a remoção da água durante a desidratação diminui a tensão exercida pelo líquido nas paredes celulares do produto, provocando a contração volumétrica (AFONSO JR. *et al.*, 2003). O encolhimento de produtos vegetais durante a secagem não é função apenas do conteúdo de umidade, mas também, das condições de operação e da geometria do produto, visto que os materiais biológicos porosos contraem-se diferentemente, nas direções longitudinal, tangencial e radial, durante a secagem (CORRÊA *et al.*, 2000). As modificações estruturais do produto, associadas com a variação celular devido à perda de umidade, são causas do encolhimento do café. A desidratação reduz os espaços intracelulares assim, a matéria seca

ocupa o lugar que anteriormente era ocupado pela água (AFONSO JR. *et al.*, 2003).

Segundo Afonso Jr. e colaboradores (2003), a desconsideração do fenômeno de encolhimento durante a desidratação é uma das fontes de erros no desenvolvimento de modelos matemáticos para simular a operação de secagem. Portanto, durante a secagem, foi determinado o encolhimento dos frutos de café, quantificando-se, concomitantemente com a umidade, as três dimensões (ver Figura 4.55) de cinco frutos de café, que segundo Corrêa e colaboradores (2000) e Afonso Jr. e colaboradores (2003) é um elipsóide tri-axial oblato. Formas geométricas elipsoidais com três dimensões características, eixos maior, médio e menor, são muito usadas para representar produtos agrícolas (AFONSO JR. *et al.*, 2003).

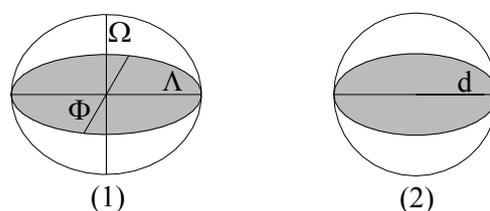


Figura 4.55 – Formato do fruto de café (1) e esfera de mesmo volume do fruto de café (2).

As medidas foram efetuadas com um paquímetro digital STARRETT 150 mm, com resolução de 0,01 mm. O encolhimento foi quantificado apenas para três experimentos de secagem: Experimento 1, variedade Mundo Novo (safra 2004); Experimento 7, variedade Catuaí e Experimento 8, variedade Acaiaí (safra 2005). As Figuras 4.56 a 4.58 apresentam as três dimensões médias dos frutos de café em função do conteúdo de umidade (Λ é a dimensão longitudinal; Ω é a dimensão radial e Φ é a espessura dos frutos de café).

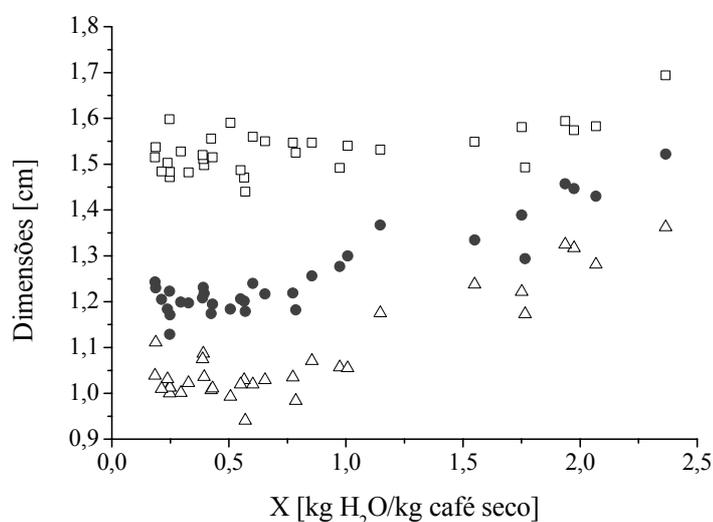


Figura 4.56 – Dimensões dos frutos de café para o Experimento 1, variedade Mundo Novo.
□: longitudinal; ●: radial; △: espessura.

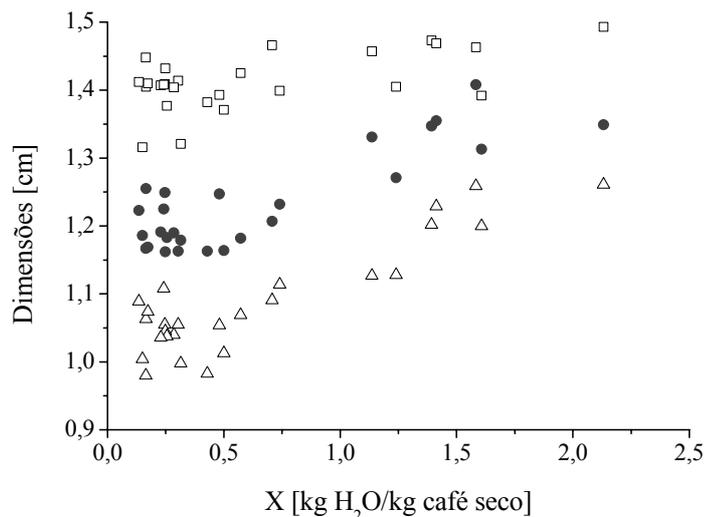


Figura 4.57 – Dimensões dos frutos de café para o Experimento 7, variedade Catuaí.
 □: longitudinal; ●: radial; Δ: espessura.

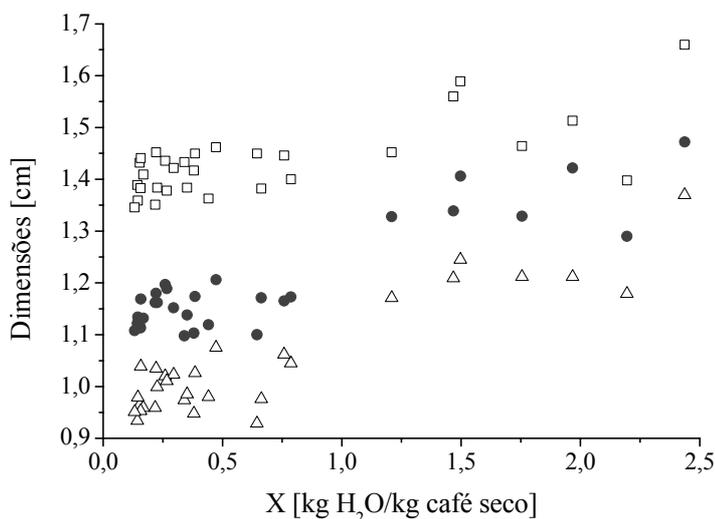


Figura 4.58 – Dimensões dos frutos de café para o Experimento 8, variedade Acaia.
 □: longitudinal; ●: radial; Δ: espessura.

Os pontos experimentais das Figuras 4.56 a 4.58 indicam que os frutos de café encolhem de forma diferente nas diferentes dimensões. A dimensão longitudinal permanece quase constante durante a secagem, principalmente para a variedade Catuaí (diferença de 0,17 cm entre o maior e o menor valor desta dimensão), seguida pela Mundo Novo (0,22 cm) e Acaia (0,30 cm). A dimensão na qual ocorre a maior contração volumétrica é a espessura, com uma diferença de 0,45 cm para a variedade Acaia, 0,40 cm para a Mundo Novo e 0,30 cm para a Catuaí. A dimensão radial apresentou diferença de 0,40 cm para as variedades Acaia e Mundo Novo e 0,25 cm para a variedade Catuaí. As diferenças de comportamento no encolhimento entre as espécies e as variedades podem ser devido às diferenças em suas estruturas externas, como por exemplo, a quantidade e a qualidade das cascas (além da polpa

e mucilagem). A espécie *Coffea canephora* possui a casca mais fina do que a da espécie *C. arabica* (AFONSO JR. *et al.*, 2003).

4.5.1 – Diâmetro da Esfera de mesmo Volume do Fruto de Café

A partir das três dimensões foi possível calcular o volume dos frutos de café pela Equação (4.11), que é a equação do volume da elipse (SPIEGEL, 1992). Igualando-se o volume da elipse ao volume da esfera, dado pela Equação (4.12), obtém-se o diâmetro da esfera de mesmo volume do fruto de café, Equação (4.13). Esta metodologia de cálculo também foi utilizada por Bichsel (1979) para o cálculo da difusividade da cafeína durante sua extração de grãos de café.

$$V_{\text{elipse}} = \frac{1}{6} \pi (\Lambda \times \Omega \times \Phi) \quad (4.11)$$

$$V_{\text{esfera}} = \frac{1}{6} \pi d^3 \quad (4.12)$$

$$d = \sqrt[3]{\Lambda \times \Omega \times \Phi} \quad (4.13)$$

Sendo: d o diâmetro médio da esfera de mesmo volume do fruto de café; Λ , Ω e Φ as dimensões do fruto de café (longitudinal, radial e espessura), como mostra a Figura 4.55. Os valores do diâmetro médio da esfera de mesmo volume do fruto de café são apresentados nas Figuras 4.59, 4.60 e 4.61, para as variedades Mundo Novo, Catuai e Acaiá, respectivamente.

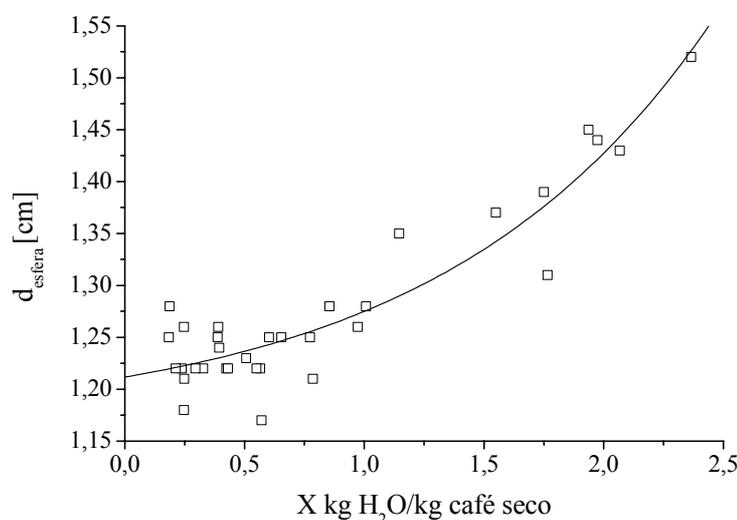


Figura 4.59 – Diâmetro da esfera em função do conteúdo de umidade, Experimento 1 (2004).

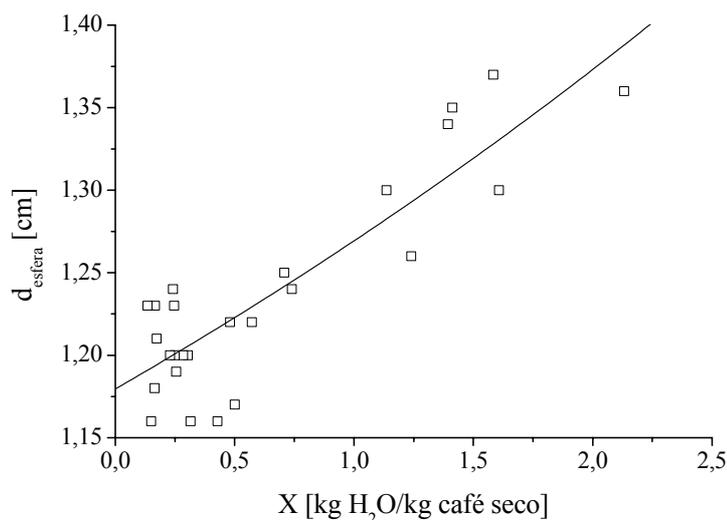


Figura 4.60 – Diâmetro da esfera em função do conteúdo de umidade, Experimento 7 (2005).

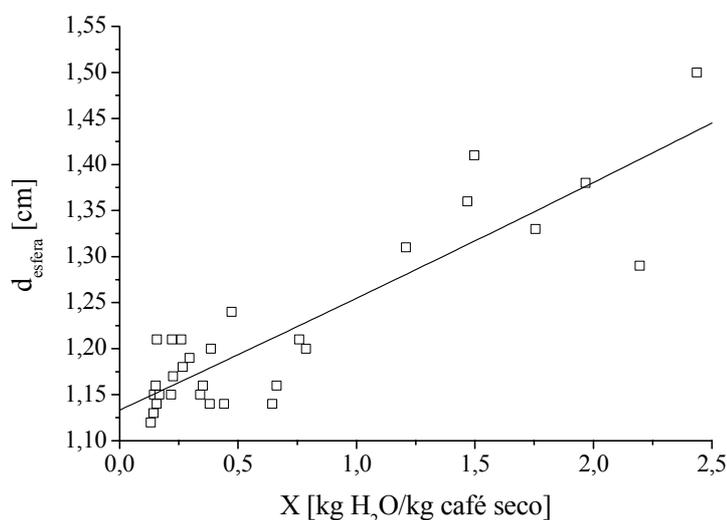


Figura 4.61 – Diâmetro da esfera em função do conteúdo de umidade, Experimento 8 (2005).

Os pontos experimentais das Figuras 4.59 a 4.61 indicam que a variedade de maior tamanho é a Mundo Novo, seguida da Acaiá e da Catuai. Esses resultados explicam as diferenças no tempo de secagem dos frutos de café entre as três variedades, para os experimentos realizados em 2003 (primeiro planejamento de secagem). Um exemplo é o tempo final de secagem para o Experimento 7 (variedade Catuai), que foi de 22 horas, ou seja, 6 horas a menos do que para o Experimento 8 (variedade Acaiá), 28 horas. Outro exemplo é a diferença, novamente de 6 horas entre os tempos de secagem para os Experimentos 5 e 6 (cerca de 34 horas, variedade Catuai) e o Experimento 4 (40 horas, Mundo Novo). O tamanho do fruto de café possui influência relevante no tempo de secagem, visto que a difusão da umidade do interior do fruto para a superfície domina grande parte da operação de secagem do café e é função do raio da partícula. Assim, quanto maior o fruto de café, maior o tempo de secagem.

A Equação (4.14) foi ajustada aos dados de diâmetro da esfera em função do conteúdo de umidade. Os coeficientes “a”, “b” e “c” da Equação (4.14) bem como os coeficientes de correlação (intervalo de confiança de 95%) estão indicados na Tabela 4.16.

$$d = a_{[i]} + b_{[i]} \cdot e^{\left(\frac{-x}{c_{[i]}}\right)} \quad (4.14)$$

Tabela 4.16 – Coeficientes da Equação (4.14).

Experimentos [i]	Variedade	Coeficientes			R ²
		a	b	c	
1 (2004)	Mundo Novo	1,1681	0,0449	-1,1374	0,87
7 (2005)	Catuai	0,6084	0,5712	-6,8540	0,78
8 (2005)	Acaiá	-2,3281	3,4613	-28,9875	0,79

No caso dos frutos de café da espécie *C. arabica* variedade Mundo Novo, a contração volumétrica foi mais intensa no início da secagem, quando o diâmetro médio da esfera diminuiu de 1,52 cm para aproximadamente 1,23 cm (de um conteúdo de umidade de 2,4 kg H₂O/kg café seco para um conteúdo em torno de 0,75 kg H₂O/kg café seco). Essa redução gera cerca 47% de contração no volume do fruto. Na literatura há informação de uma redução de volume de frutos de café de 30 a 40%, entretanto a faixa de umidade estudada foi menor, de 1,60 a 0,11 kg H₂O/kg café seco (AFONSO JR. *et al.*, 2003). A partir do conteúdo de umidade de 0,75 kg H₂O/kg café seco, o encolhimento praticamente cessou e a variação dos pontos experimentais (entre 1,28 cm e 1,17 cm) é apenas devido à heterogeneidade intrínseca do tamanho dos frutos de cafés. O procedimento para minimizar essa variação é a seleção por tamanhos após a colheita dos frutos de café. Entretanto, como as amostras disponibilizadas para secagem foram pequenas não foi possível selecionar apenas uma faixa de tamanho dos frutos.

Para a variedade Catuai, o diâmetro médio da esfera diminuiu de 1,37 cm para aproximadamente 1,20 cm, de um conteúdo de umidade de 2,1 kg H₂O/kg café seco para um conteúdo em torno de 0,5 kg H₂O/kg café seco. Essa redução gera cerca 32,7% de contração no volume do fruto de café. A variedade Acaiá, em apenas 6 horas de secagem (tempo necessário para reduzir o conteúdo de umidade de 2,40 para 0,75 kg H₂O/kg café seco) diminuiu cerca de 0,3 cm, o que gera uma redução no volume de 52,5%. A explicação para essa expressiva redução volumétrica está na quantidade de cascas desta variedade, cerca de 60%, em massa. Enquanto que a variedade Mundo Novo possui cerca de 54% e a Catuai 48,5%. Esta informação será detalhada na Seção 4.7.1. Entende-se por casca tudo o que não é

grão de café, ou seja, casca, polpa, mucilagem e pergaminho. Segundo Corrêa e colaboradores (2000), a quantidade de polpa e mucilagem influencia as variações nas dimensões características dos frutos de café, uma vez que esse constituinte é rico em água e por isso representa uma significativa parcela do volume do produto.

4.5.2 – Esfericidade

A forma de uma partícula pode ser tão importante quanto seu tamanho, porém as formas não são facilmente descritas no modo quantitativo. A definição de fator de forma depende da escolha do parâmetro mais relevante da partícula (superfície, volume ou dimensão linear) para determinada aplicação. Os fatores de forma, geralmente são definidos como o quociente entre a propriedade da partícula e a propriedade de uma esfera (ou círculo) que tenha o diâmetro igual ao da dimensão característica da partícula. Um fator de forma comumente utilizado para partículas não esféricas é a esfericidade (ϕ), que é expressa pela Equação (4.15) e definida como a razão entre a área superficial da esfera (A_e) de mesmo volume da partícula, Equação (4.16), e a área superficial da partícula, A_p , para o mesmo volume (AGUILERA, 2001).

$$\phi = \frac{A_e}{A_p} \quad (4.15)$$

$$A_e = \pi d^2 \quad (4.16)$$

Apesar do volume do elipsóide apresentar uma fórmula simples, sua área superficial é expressa por equação matemática bastante complexa e de difícil resolução. Para facilitar o cálculo da área superficial de um fruto de café, Afonso Jr. e colaboradores (2003), utilizaram a Equação (4.17). Sendo: ζ a excentricidade, que é expressa pela Equação (4.18).

$$A_p = 2\pi \left(\frac{a}{2}\right)^2 + \pi \frac{[(b+c)/4]^2}{\zeta} \ln \left(\frac{1+\zeta}{1-\zeta}\right) \quad (4.17)$$

$$\zeta = \left\{ 1 - \left[\frac{[(b+c)/4]^2}{a/2} \right]^{1/2} \right\} \quad (4.18)$$

Os pontos experimentais das Figuras 4.62 a 4.64 indicam o comportamento da esfericidade em função do conteúdo de umidade dos frutos de café.

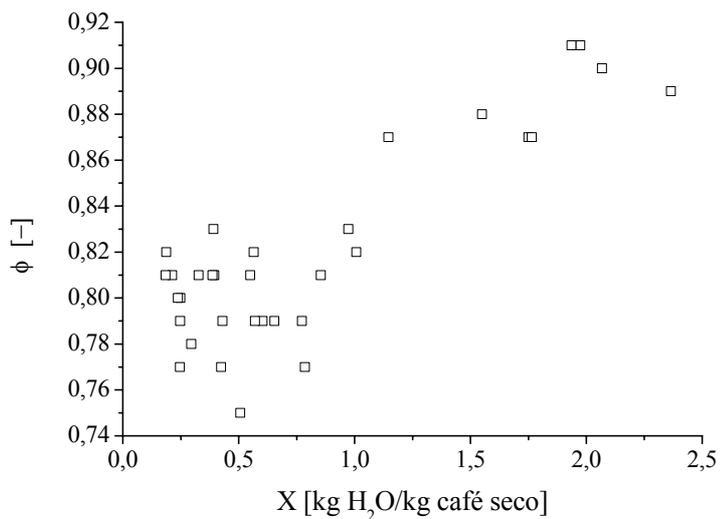


Figura 4.62 – Esfericidade para Experimento 1, variedade Mundo Novo.

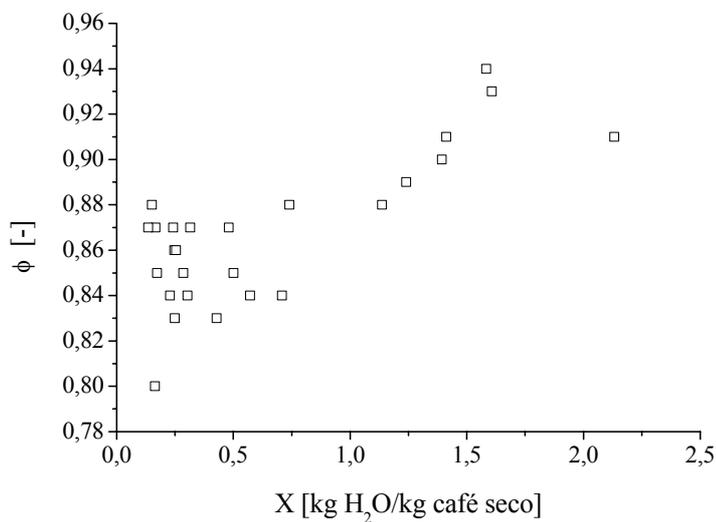


Figura 4.63 – Esfericidade para Experimento 7, variedade Catuai.

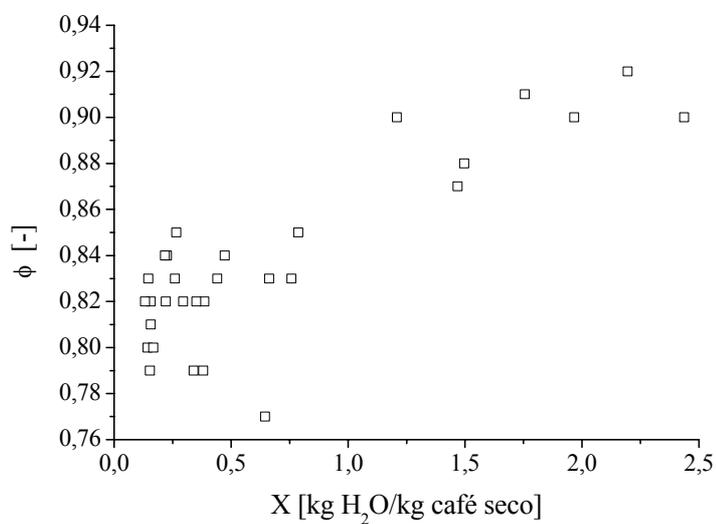


Figura 4.64 – Esfericidade para Experimento 8, variedade Acaiá.

A esfericidade dos frutos de café da variedade Mundo Novo diminuiu com a diminuição do conteúdo de umidade de aproximadamente 0,9 (para o início da secagem, com umidade de 2,40 a 1,94 kg H₂O/kg café seco) para 0,8 (média da esfericidade para conteúdo de umidade menor do que 0,75 kg H₂O/kg café seco), ou seja, uma redução de 11%. Já a esfericidade da variedade Catuaí diminuiu de 0,93 para 0,85, ou seja, uma redução de cerca de 9%. Esta variedade apresentou os maiores valores de esfericidade para os frutos de café, enquanto que a variedade Mundo Novo possui os menores valores. A variedade Acaia possui esfericidade intermediária entre 0,91, para o início da secagem e 0,82, para o final da operação, ou seja, uma redução de aproximadamente 10%.

4.5.3 – Área Superficial Específica

A área superficial específica (A'_p) foi determinada dividindo-se os valores de área superficial do fruto de café (A_p) pela sua massa média (m_p , ver Apêndice E). As Figuras 4.65 a 4.67 indicam o comportamento da área superficial específica dos frutos de café em função do conteúdo de umidade.

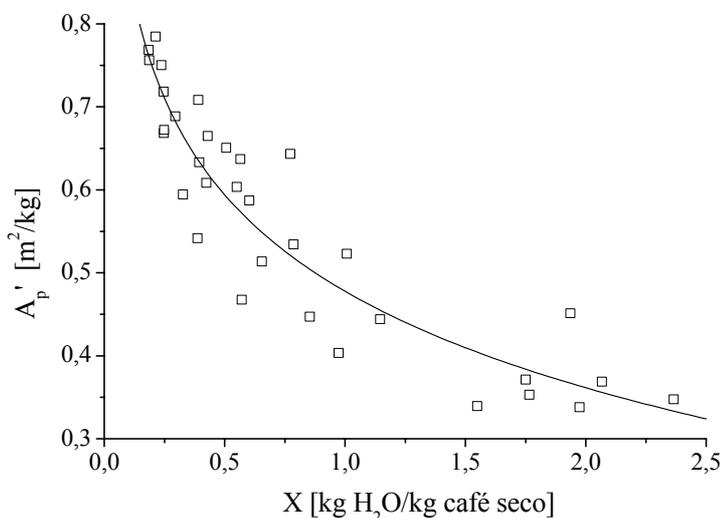


Figura 4.65 – Área superficial específica para o Experimento 1, variedade Mundo Novo.

Apesar do encolhimento que ocorre durante a secagem, a área superficial específica dos frutos de café aumenta com a diminuição do conteúdo de umidade. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que a redução da massa dos frutos de café, no decorrer da secagem, é maior do que a redução da área superficial. A área superficial específica é utilizada nos cálculos para determinação do coeficiente de transferência de calor (SFREDO; FINZER; LIMAVERDE, 2005).

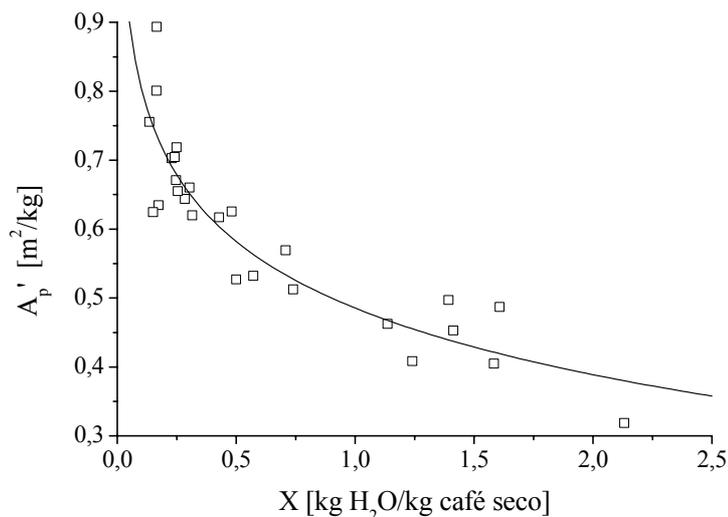


Figura 4.66 – Área superficial específica para o Experimento 7, variedade Catuaí.

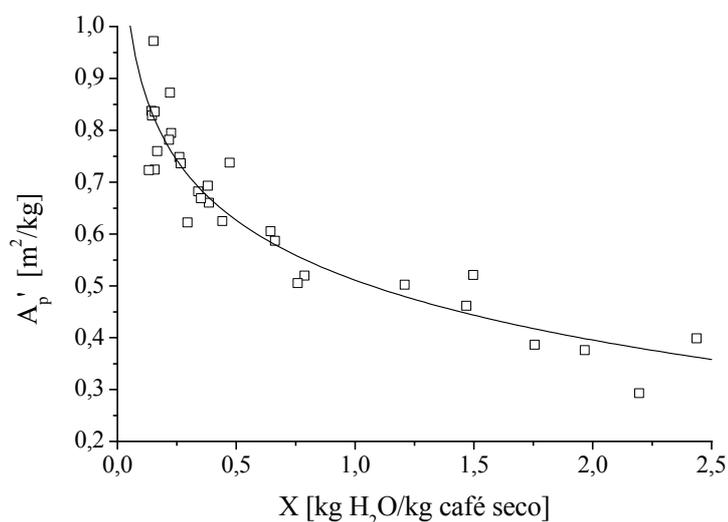


Figura 4.67 – Área superficial específica para o Experimento 8, variedade Acaia.

A Equação (4.19) foi ajustada aos dados experimentais de área superficial específica em função do conteúdo de umidade (intervalo de confiança de 95%) e os coeficientes “a” e “b” são mostrados na Tabela 4.17, bem como os coeficientes de correlação.

$$A'_p = a_{[i]} - b_{[i]} \ln X \tag{4.19}$$

Tabela 4.17 – Coeficientes da Equação (4.19).

Experimentos [i]	Variedade	Coeficientes		R ²
		a	b	
1	Mundo Novo	0,4778	0,1678	0,86
7	Catuaí	0,4854	0,1393	0,82
8	Acaia	0,5110	0,1668	0,87

4.6 – Densidade *Bulk* dos Frutos de Café

A densidade *bulk* dos frutos de café consiste em um parâmetro importante no manuseio do café, tanto para o dimensionamento de transportadores, secadores e sistemas de processamento e armazenamento.

Para determinar a densidade do café cereja determinou-se a massa de um béquer de 500 mL em balança OHAUS Precision Standard com resolução de 0,01 g e capacidade para 4 kg, modelo TS4000D e adicionou-se os frutos de café até preencher o volume de 200 mL indicado no béquer. Em seguida, determinou-se a massa do conjunto béquer-café para obter a massa dos frutos (m_{fc}) contida no béquer. Entretanto, o béquer possui uma graduação volumétrica grosseira, e por isso utilizou-se uma proveta graduada de 500 mL com resolução de 2 mL para calibrar o béquer (V_b), expressando o volume em m^3 . A Equação (4.20) foi utilizada para determinar a densidade *bulk* (ρ_b) dos frutos de café cereja, em kg/m^3 .

$$\rho_b = \frac{m_{fc}}{V_b} \quad (4.20)$$

Para determinar a densidade aparente (ρ_a) dos frutos de café, em kg/m^3 , bem como a porosidade do leito (ε), foi adicionada água com uma proveta graduada e café em um béquer até completar o volume de 500 mL, obtendo-se assim o volume de vazios (V_v), em m^3 . As Equações (4.21) e (4.22) foram empregadas para o cálculo da densidade aparente dos frutos de café e da porosidade do leito (ε).

$$\rho_a = \frac{m_{fc}}{V_b - V_v} \quad (4.21)$$

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_b} \quad (4.22)$$

A Tabela 4.18 apresenta os valores de densidade *bulk*, densidade aparente e porosidade iniciais, ou seja, antes da operação de secagem ser iniciada, para o primeiro planejamento de secagem.

Os valores de densidade e porosidade iniciais não apresentaram diferenças apreciáveis entre si, para as diferentes variedades de café. O valor médio para a densidade *bulk* foi de $656,9 kg/m^3$; para a densidade aparente $1122,6 kg/m^3$ e para a porosidade 0,41.

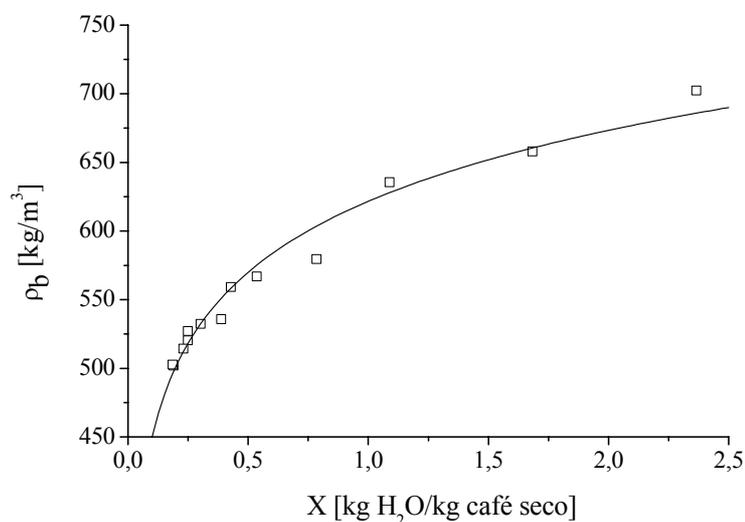
Tabela 4.18 – Densidade *bulk*, densidade aparente e porosidade dos frutos de café cereja, safra 2003.

Experimento	Variedade	X_0 [kg H ₂ O/kg cs]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_s [kg/m ³]	ε [-]
1	Mundo Novo	2,0163	665,3	1117,5	0,40
2	Mundo Novo	1,6831	712,6	1185,4	0,40
3	Mundo Novo	2,1990	640,2	1107,6	0,42
4	Mundo Novo	2,0079	654,3	1131,9	0,42
5	Catuaí	1,8576	668,8	1134,4	0,41
6	Catuaí	2,0072	611,7	1037,5	0,41
7	Catuaí	2,1106	654,6	1143,9	0,43
8	Acaíá	2,1454	655,1	1111,0	0,41
9	Mundo Novo	2,1041	649,1	1134,3	0,43

Afonso Jr. (2001) determinou a densidade *bulk* e a densidade aparente em função do conteúdo de umidade para frutos de café variedade Catuaí. A densidade *bulk*, determinada em balança de peso hectolitro, variou de 595,66 a 450,04 kg/m³, para um conteúdo de umidade de 2,27 a 0,11 kg H₂O/kg café seco.

A densidade aparente, estimada a partir da massa unitária dividida pelo volume do fruto de café, variou de 1278,62 a 793,79 kg/m³, para o mesmo intervalo de umidade. A porosidade, calculada pela razão entre a densidade *bulk* e a aparente, variou de 0,5320 a 0,4287. O valor inicial de porosidade obtido por Afonso Jr. (2001) foi 23% maior do que o valor determinado neste trabalho.

Para o segundo planejamento de secagem, a densidade *bulk* foi determinada em função do conteúdo de umidade no decorrer da secagem. As Figuras 4.68 a 4.76 apresentam a variação da densidade *bulk* em função do conteúdo de umidade.

Figura 4.68 – Densidade *bulk* para o Experimento 1.

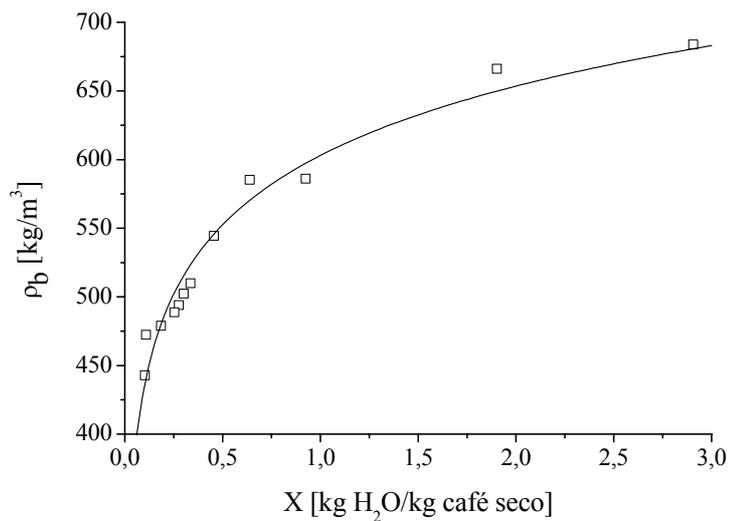


Figura 4.69 – Densidade *bulk* para o Experimento 2.

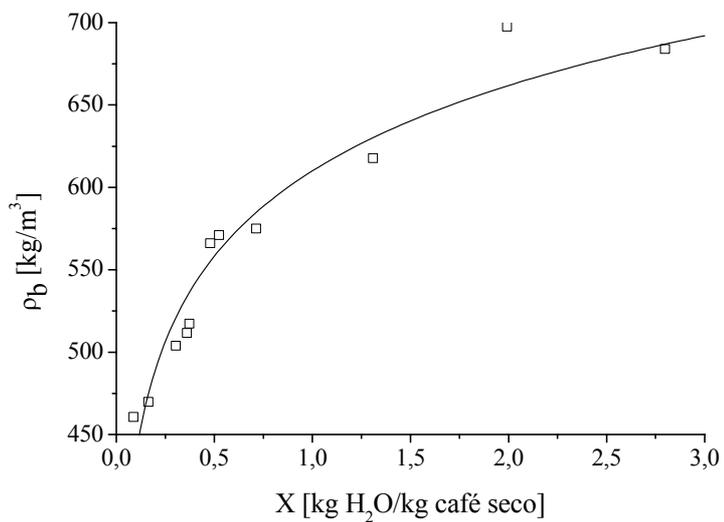


Figura 4.70 – Densidade *bulk* para o Experimento 3.

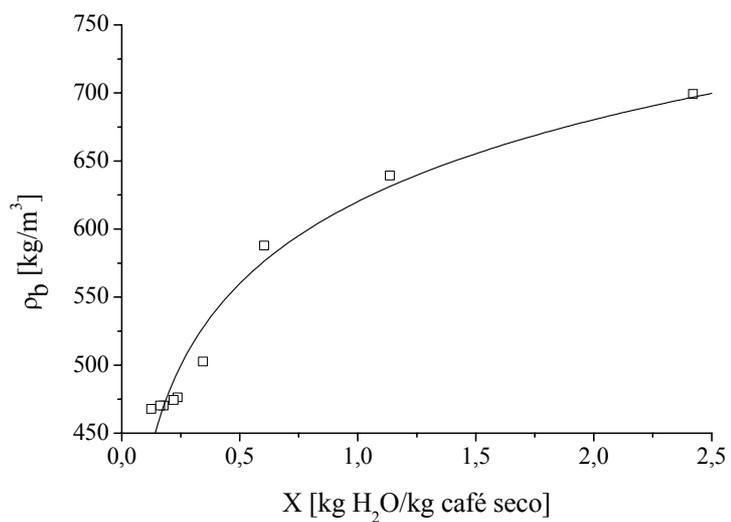


Figura 4.71 – Densidade *bulk* para o Experimento 4.

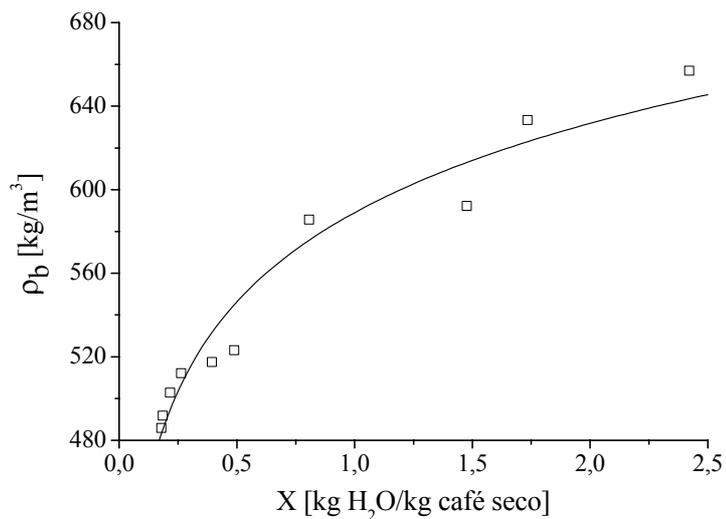


Figura 4.72 – Densidade *bulk* para o Experimento 5.

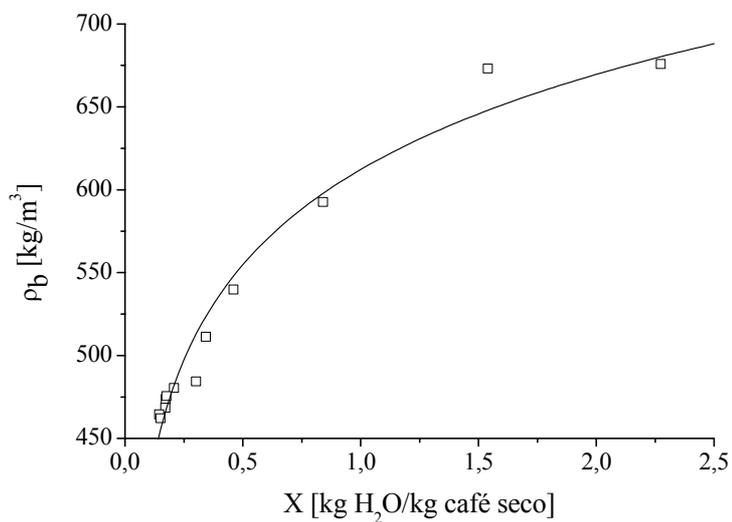


Figura 4.73 – Densidade *bulk* para o Experimento 6.

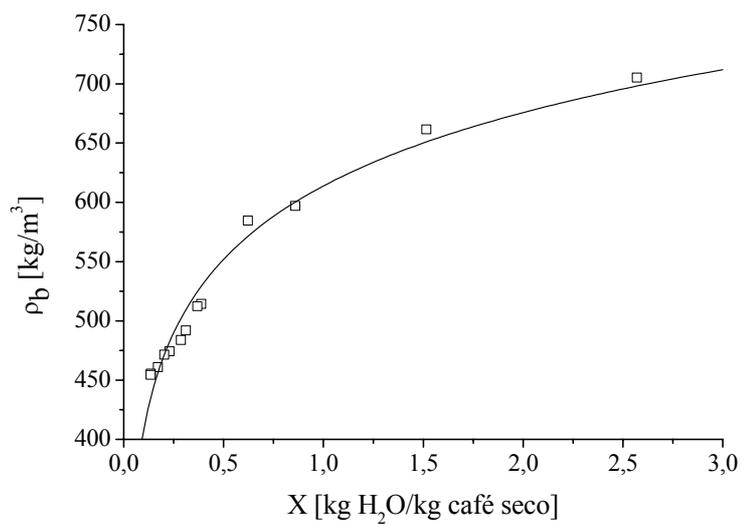
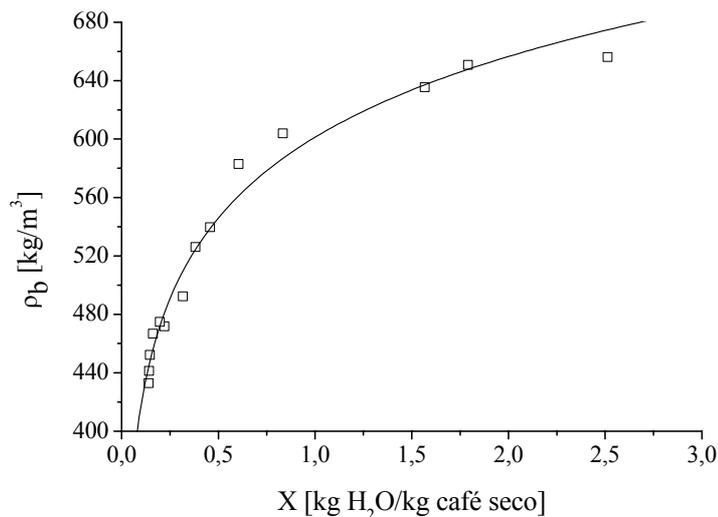
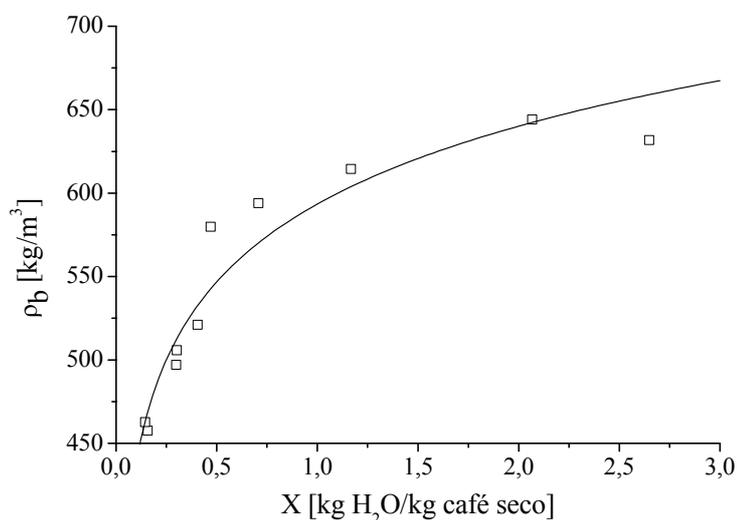


Figura 4.74 – Densidade *bulk* para o Experimento 7.

Figura 4.75 – Densidade *bulk* para o Experimento 8.Figura 4.76 – Densidade *bulk* para o Experimento 9.

Os pontos experimentais das Figuras 4.68 à 4.76 indicam que a densidade *bulk* diminui, em média, 25 a 38% com a diminuição do conteúdo de umidade. A diminuição da densidade *bulk* deve-se à expressiva diminuição da massa dos frutos de café e do volume. A diminuição volumétrica (cerca de 47% para a variedade Mundo Novo) é menor em relação à redução da massa (em torno de 70%), portanto ocorre a redução na densidade *bulk*. A Equação (4.23) representa a equação de ajuste aos dados experimentais de densidade *bulk* em função do conteúdo de umidade dos frutos de café.

$$\rho_{b[i]} = a_{[i]} + b_{[i]} \ln X \quad (4.23)$$

A Tabela 4.19 mostra os coeficientes “a” e “b” da Equação (4.23), para os experimentos do segundo planejamento de secagem.

Tabela 4.19 – Coeficientes da Equação (4.23), safra 2004.

Experimento [i]	Coeficiente		R ²
	a	b	
1	621,65	74,57	0,97
2	603,01	72,82	0,96
3	610,05	74,69	0,94
4	620,18	86,77	0,96
5	589,04	61,66	0,95
6	612,18	82,84	0,97
7	613,86	89,28	0,97
8	601,26	79,77	0,98
9	593,44	67,30	0,92

4.7 – Beneficiamento

Após a secagem dos frutos de café, obteve-se o café coco, que foi armazenado no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento (LPD), da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, em sacos de juta. Os sacos de juta foram confeccionados a partir de um saco de juta de 60 kg utilizado na armazenagem de cafés. O saco foi previamente lavado e seco, sendo então dividido em quatro partes, que costuradas com barbante nas laterais e no fundo originaram os sacos de juta, com capacidade para 4 kg de café coco.

4.7.1 – Descascamento dos Frutos de Café

O café coco foi descascado em um descascador Pinhalense modelo DRC-2 de escala laboratorial, com dimensões de 1,15 m x 0,90 m x 0,48 m, mostrado na Figura 4.77.



Figura 4.77 – Descascador de café Pinhalense.

1: alimentador; 2: regulagem; 3: descarga do café descascado; 4: recipiente retangular; 5: descarga das cascas.

Para efetuar a retirada das cascas do café é necessário adicionar o café coco vagorosamente no alimentador (1), com o aparelho já em funcionamento. Pela calha de separação e descarga (3) caem os grãos de café verde descascados que são coletados em um recipiente retangular (4).

O descascador possui um dispositivo que permite a regulagem (2) para diferentes tamanhos de frutos de café. A regulagem é decisiva para obter o café verde com menor número de defeitos (menos grãos quebrados e menor quantidade de cascas). Portanto para frutos maiores deve-se utilizar o maior orifício de regulagem, para frutos médios o intermediário e para frutos menores o orifício menor.

As cascas são separadas no interior do equipamento e lançadas para fora em uma calha de descarga (5) na extremidade oposta da descarga dos grãos descascados.

A Tabela 4.20 mostra o percentual de cascas geradas para todos os experimentos de secagem, safra 2003.

Tabela 4.20 – Quantidade de cascas para os experimentos do primeiro planejamento de secagem (safra 2003).

Experimentos	Variedade	Casca [kg]	Grãos café [kg]	% Casca (m/m)
1	Mundo Novo	1,1500	0,9442	53,87
2	Mundo Novo	1,2636	1,0514	53,29
3	Mundo Novo	1,2118	1,0775	52,16
4	Mundo Novo	1,3161	1,1290	53,48
5	Catuaí	0,9517	1,0081	48,48
6	Catuaí	1,2562	1,2667	49,45
7	Catuaí	1,0206	1,0783	47,57
8	Acaiá	1,2619	0,8070	60,39
9	Mundo Novo	1,2817	1,0681	54,19

A maior quantidade de cascas foi obtida para a variedade Acaiá, aproximadamente 60%, em massa, seguida da variedade Mundo Novo, com cerca de 53,4% (m/m) de cascas e a variedade Catuaí, com aproximadamente 48,5% (m/m) de cascas. Convém ressaltar que os resultados obtidos no estudo do encolhimento foram influenciados pela quantidade de cascas presentes no fruto de café.

A Tabela 4.21 mostra a quantidade de cascas e grãos de café para os experimentos do segundo planejamento de secagem, safra 2004. Utilizou-se a mesma metodologia empregada para o descascamento realizado no primeiro planejamento de secagem (safra 2003).

Tabela 4.21 – Quantidade de cascas para os experimentos do segundo planejamento de secagem (safra 2004).

Experimentos	Casca [kg]	Grãos café [kg]	% Casca (m/m)
1	1,3788	1,1711	54,07
2	1,1290	1,0635	51,49
3	1,1592	1,1171	50,92
4	1,5170	1,2927	53,99
5	1,4439	1,3061	52,50
6	1,4506	1,2108	54,51
7	1,3721	1,2413	52,50
8	1,4293	1,3156	52,07
9	1,2875	1,3112	49,54

Apesar dos experimentos serem realizados com a mesma variedade (Mundo Novo), proveniente da mesma propriedade, a quantidade de cascas apresentou alguma variabilidade entre 49% e 54%. Contudo o valor médio foi de aproximadamente 52,4%, em massa, muito próximo do valor médio dos experimentos realizados no ano de 2003 para essa variedade. A variedade Catuaí, de menores dimensões, foi a variedade que possibilitou a maior quantidade de grãos de café por unidade de massa de café coco, o que é importante em termos de rendimento industrial e comercialização.

4.7.2 – Classificação Quanto ao Tamanho e Conformação do Grão

Os grãos de café verde foram classificados quanto ao tamanho da fava e quanto à sua conformação. A distribuição de tamanho do grão de café foi realizada pelo peneiramento da amostra em peneiras padronizadas, com aberturas próprias para grãos de café, como mostra a Figura 4.78.

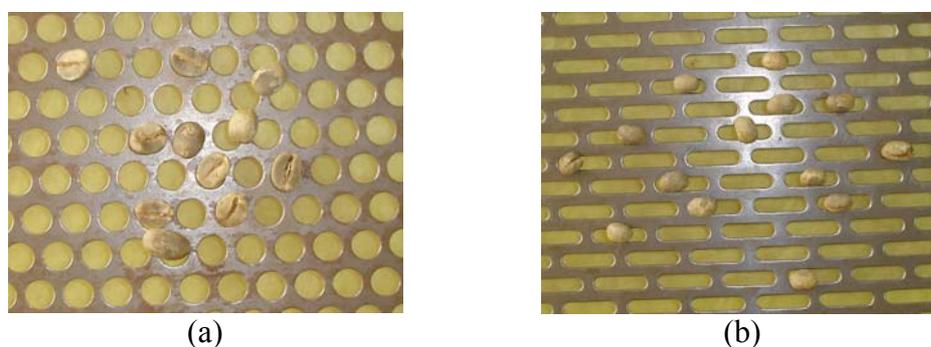


Figura 4.78 – Peneiras padronizadas para grãos de café: chatos (a) e moca (b).

A Figura 4.78 mostra a diferença entre os formatos do grão de café chato e o grão de café moca, que é mais arredondado. Por essa razão a abertura da peneira para grãos mocas e

chatos também possui formato diferente: furos redondos para reter grãos chatos e furos oblongos para reter grãos mocas.

Todas as amostras foram quarteadas antes do peneiramento até obter-se aproximadamente 100 gramas de grãos de café. Os resultados estão indicados nas Tabelas 4.22 a 4.24, para a safra de 2003, sendo χ a fração em massa não retida pela peneira.

Tabela 4.22 – Distribuição do tamanho dos grãos de café verde (2003).

Peneiras		Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
Nº	Abertura [in]	% retida	χ	% retida	χ	% retida	χ
18	18/24	31,88	0,6812	9,72	0,9028	17,02	0,8298
17	17/24	28,72	0,3940	30,97	0,5931	27,39	0,5559
16	16/24	18,21	0,2120	31,63	0,2768	23,52	0,3207
Moca 10	10/24	9,40	0,1179	3,13	0,2455	5,33	0,2673
15	15/24	6,07	0,0573	12,36	0,1219	12,49	0,1424
Moca 9	9/24	1,71	0,0402	1,98	0,1021	1,90	0,1234
14	14/24	0,77	0,0325	3,38	0,0684	3,36	0,0898
13	13/24	0,85	0,0239	1,89	0,0494	3,14	0,0584
F	-	2,39	0,0000	4,94	0,0000	5,84	0,0000

Tabela 4.23 – Distribuição do tamanho dos grãos de café verde (2003).

Peneiras		Experimento 4		Experimento 5		Experimento 6	
Nº	Abertura [in]	% retida	χ	% retida	χ	% retida	χ
18	18/24	0,33	0,9967	24,31	0,7569	14,81	0,8519
17	17/24	8,08	0,9158	24,41	0,5128	27,22	0,5797
16	16/24	32,56	0,5903	23,24	0,2804	25,25	0,3272
Moca 10	10/24	28,35	0,3068	5,33	0,2271	8,32	0,2440
15	15/24	11,41	0,1927	11,19	0,1151	14,10	0,1030
Moca 9	9/24	3,88	0,1539	2,45	0,0906	1,83	0,0846
14	14/24	4,43	0,1096	3,09	0,0597	4,09	0,0437
13	13/24	4,32	0,0664	2,35	0,0362	2,40	0,0197
F	-	6,64	0,0000	3,62	0,0000	1,97	0,0000

Tabela 4.24 – Distribuição do tamanho dos grãos de café verde (2003).

Peneiras		Experimento 7		Experimento 8		Experimento 9	
Nº	Abertura [in]	% retida	χ	% retida	χ	% retida	χ
18	18/24	15,71	0,8429	37,86	0,6214	14,09	0,8591
17	17/24	25,45	0,5885	14,05	0,4809	20,30	0,6561
16	16/24	23,21	0,3564	7,06	0,4103	20,83	0,4478
Moca 10	10/24	7,14	0,2850	3,43	0,3760	8,80	0,3598
15	15/24	12,20	0,1630	4,35	0,3325	13,43	0,2255
Moca 9	9/24	3,10	0,1320	3,03	0,3021	3,97	0,1858
14	14/24	4,38	0,0882	4,62	0,2559	5,09	0,1349
13	13/24	2,96	0,0587	6,60	0,1900	3,17	0,1032
F	-	5,87	0,0000	19,00	0,0000	10,32	0,0000

A maior fração de grãos de café ficou retida nas peneiras 18, 17 e 16, o que reflete a qualidade do café, pois os grãos retidos nessas peneiras são maiores, inteiros e os mais apreciáveis e valorizados para comercialização. A importância de realizar o peneiramento é a separação por tamanhos e conformação, que facilita e melhora o aspecto da torrefação dos grãos.

A partir da peneira moca 9, praticamente todos os grãos retidos estavam quebrados. A maior porcentagem de grãos retidos nas peneiras 18, 17 e 16 foi obtida para os três primeiros experimentos, que foram realizados com temperatura dos frutos de café de 40°C e variedade Mundo Novo. Os menores valores foram obtidos nos experimentos realizados com temperatura do fruto de 50°C, indicando que a rápida secagem diminui a porcentagem de grãos mais nobres.

Os experimentos realizados com temperatura do fruto de 45°C apresentaram valores muito próximos daqueles secos à 40°C, exceto o Experimento 4. O café processado neste experimento apresentou grande quantidade de grãos mocas retidos na peneira moca 10, com um aumento de 316% em relação aos Experimentos 5 e 6. Segundo Matiello (1991), o grão moca é proveniente da falta de fecundação de um óvulo e, por isso, há apenas uma semente por fruto. A quantidade de grãos mocas encontrado em uma amostra de café pode ser influenciada pela variedade, pela precipitação pluviométrica durante a formação do fruto e por algumas carências nutricionais.

As Tabelas 4.25 a 4.27 apresentam os resultados da análise granulométrica dos grãos de café verde para os experimentos realizados no segundo planejamento de secagem (safra 2004). Utilizou-se a mesma metodologia empregada na análise granulométrica dos grãos de café verde do primeiro planejamento de secagem (safra 2003).

Tabela 4.25 – Distribuição do tamanho dos grãos de café verde (2004).

Peneiras		Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
Nº	Abertura [in]	% retida	χ	% retida	χ	% retida	χ
18	18/24	55,54	0,4446	37,38	0,6262	39,71	0,6029
17	17/24	12,47	0,3199	34,09	0,2852	30,65	0,2963
16	16/24	4,65	0,2734	9,25	0,1928	8,31	0,2132
Moca 10	10/24	2,54	0,2480	3,18	0,1610	2,93	0,1839
15	15/24	3,36	0,2144	2,23	0,1387	2,86	0,1553
Moca 9	9/24	5,57	0,1586	1,78	0,1209	2,04	0,1349
14	14/24	3,07	0,1280	2,62	0,0947	3,34	0,1015
13	13/24	3,36	0,0943	3,23	0,0624	3,54	0,0661
F	-	9,43	-	6,24	-	6,61	-

Tabela 4.26 – Distribuição do tamanho dos grãos de café verde (2004).

Peneiras		Experimento 4		Experimento 5		Experimento 6	
Nº	Abertura [in]	% retida	χ	% retida	χ	% retida	χ
18	18/24	33,01	0,6699	30,27	0,6973	48,54	0,5146
17	17/24	29,21	0,3779	34,03	0,3570	24,38	0,2709
16	16/24	11,52	0,2627	14,90	0,2080	5,82	0,2127
Moca 10	10/24	3,05	0,2321	4,74	0,1606	3,94	0,1733
15	15/24	3,51	0,1970	2,95	0,1311	2,34	0,1499
Moca 9	9/24	2,88	0,1682	1,56	0,1155	1,57	0,1342
14	14/24	3,05	0,1377	1,79	0,0976	2,09	0,1133
13	13/24	4,38	0,0939	2,77	0,0699	3,39	0,0794
F	-	9,39	-	6,99	-	7,94	-

Tabela 4.27 – Distribuição do tamanho dos grãos de café verde (2004).

Peneiras		Experimento 7		Experimento 8		Experimento 9	
Nº	Abertura [in]	% retida	χ	% retida	χ	% retida	χ
18	18/24	38,20	0,6180	41,14	0,5886	27,16	0,7284
17	17/24	29,03	0,3277	38,13	0,2073	39,34	0,3351
16	16/24	10,42	0,2235	5,56	0,1517	16,43	0,1707
Moca 10	10/24	4,24	0,1810	3,95	0,1122	4,02	0,1305
15	15/24	2,37	0,1573	2,03	0,0919	2,45	0,1061
Moca 9	9/24	1,69	0,1404	1,25	0,0795	1,46	0,0915
14	14/24	2,62	0,1142	1,82	0,0613	2,39	0,0676
13	13/24	4,37	0,0705	2,18	0,0395	2,68	0,0408
F	-	7,05	-	3,95	-	4,08	-

A maior fração de grãos de café ficou retida nas peneiras 18 e 17 o que reflete a característica da variedade Mundo Novo na qualidade do café, pois os grãos retidos nessas peneiras são maiores, inteiros e os mais apreciáveis para comercialização. A porcentagem média de grãos retidos nas peneiras 18, 17 e 16 foi de 78,69%. Quanto ao tamanho do grão, essa variedade de café pode alcançar maior valor comercial. A partir da peneira 15, praticamente todos os grãos retidos estavam quebrados. Os menores valores, mais ainda assim bastante altos, foram obtidos nos experimentos com menor vazão mássica de ar (Experimentos 1, 4 e 7). Em comparação com os resultados do primeiro planejamento de secagem (somente da variedade Mundo Novo), a porcentagem de grãos retidos nas peneiras 18, 17 e 16 aumentou em aproximadamente 25%.

4.7.2.1 – Estudo Qualitativo da Secagem

A característica mecânica e, em particular a resistência e o comportamento de materiais úmidos depende do conteúdo de umidade. Materiais submetidos à secagem são

viscoelásticos ou plásticos no início da operação e elásticos ou mesmo quebradiços (*brittle*) ao final da secagem. Quando o material encolhe, a força de coesão aumenta com o decréscimo da distância entre partículas (KOWALSKI, 2001).

Com o desenvolvimento da secagem ocorre o acréscimo da resistência do material à deformação, entretanto, há um aumento iminente de fraturas. Ultrapassada a resistência mecânica do material, ocorre a fratura. A principal razão para a ocorrência de fraturas é o fenômeno de encolhimento não uniforme e as tensões induzidas pela secagem. O surgimento de fraturas torna-se mais acentuado quando a distribuição do conteúdo de umidade é muito desuniforme. Para muitos materiais, tais como madeira ou cerâmica, o encolhimento é pouco expressivo, entretanto, as tensões provocadas pela secagem são de intensidade suficiente para causar a sua ruptura. Essas tensões ocorrem devido ao encolhimento não homogêneo do material que está secando (KOWALSKI, 2001).

O fruto de café apresenta encolhimento expressivo na secagem, mas o grão de café contido no interior do fruto sofre pequena contração volumétrica. Contudo, ele é bastante afetado pelas condições de secagem, quebrando-se facilmente em vários locais. A percepção deste fenômeno dá-se no momento do beneficiamento, pela retirada das cascas e peneiramento para classificação quanto ao tamanho da fava. Os grãos de café que apresentaram fraturas durante a secagem serão facilmente quebrados pelo rotor do descascador. Os grãos quebrados ficam retidos nas peneiras de menor abertura e no fundo. Portanto, a porcentagem de grãos retidos no fundo pode ser um indicativo da qualidade da secagem.

A Tabela 4.28 apresenta os resultados para a análise granulométrica do grão de café proveniente do primeiro planejamento de secagem, safra 2003.

Tabela 4.28 – Resultados da análise granulométrica, safra 2003.

Experimentos	% retida fundo	Variáveis	Efeitos	<i>p-level</i>
1	2,39	T	7,34	0,2575
2	4,94	T ²	-3,98	0,4295
3	5,84	M	1,08	0,8395
4	6,64	M ²	3,68	0,4597
5	3,62	Q	-0,49	0,9267
6	1,97	Q ²	-2,43	0,6093
7	5,87	-	-	-
8	19,00	-	-	-
9	10,32	-	-	-

Os resultados apresentados na Tabela 4.28 indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos, com intervalo de confiança de 95%. Entretanto, a análise estatística não contabiliza o efeito das diferentes variedades de café utilizadas na secagem, as quais têm influência no tamanho do grão, na sua conformação e, portanto, na porcentagem de grãos retidos nas peneiras.

A Tabela 4.29 apresenta o quadro de análise de variância (ANOVA) que foi desenvolvido no *software* STATISTICA 5.0, para evidenciar os fatores significativos, com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.29 – Quadro de ANOVA, safra 2003.

Efeitos	% retida fundo			
	SQ	GL	F	<i>p-level</i>
T	80,81	1	2,46	0,2575
T ²	31,73	1	0,96	0,4295
M	1,74	1	0,05	0,8395
M ²	24,11	1	0,82	0,4597
Q	0,35	1	0,01	0,9267
Q ²	11,84	1	0,36	0,6093
Erro	65,76	2	-	-
Total	219,35	8	-	-

A maior porcentagem de grãos quebrados foi proveniente do Experimento 8 (variedade Acaiá) e 9 (variedade Mundo Novo), secos à temperatura do fruto de 50°C. A temperatura foi a variável que apresentou o maior efeito sobre a porcentagem de grãos retidos no fundo, ou seja, aumentando-se a temperatura do menor para o maior nível tem-se um aumento de 7,34% na porcentagem de grãos retidos no fundo. Os frutos de café das variedades Acaiá e Mundo Novo possuem os maiores diâmetros de partícula. Já a variedade Catuai, menores frutos, propiciou menos grãos quebrados. Convém lembrar que essa variedade já tinha a característica de gerar menor quantidade de casca. As Figuras 4.79 a 4.81 apresentam a superfície de resposta para a porcentagem de grãos retidos no fundo do conjunto de peneiras para o primeiro planejamento de secagem.

As superfícies de resposta mostram que a temperatura é a variável que mais propicia a geração de finos (grãos quebrados retidos no fundo), seguida da massa de café. A carga de café em menor quantidade possibilita canalizações, o que foi discutido na Seção 4.4.2.1, aumentando o tempo de secagem do café e o número de choques durante a secagem, o que deve influenciar nas quebras, sobretudo em maior temperatura.

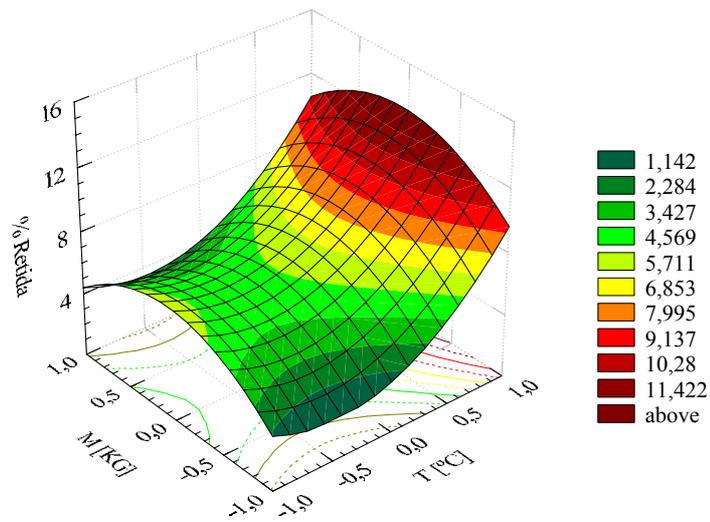


Figura 4.79 – Superfície de resposta para % retida no fundo com relação às variáveis T e M.

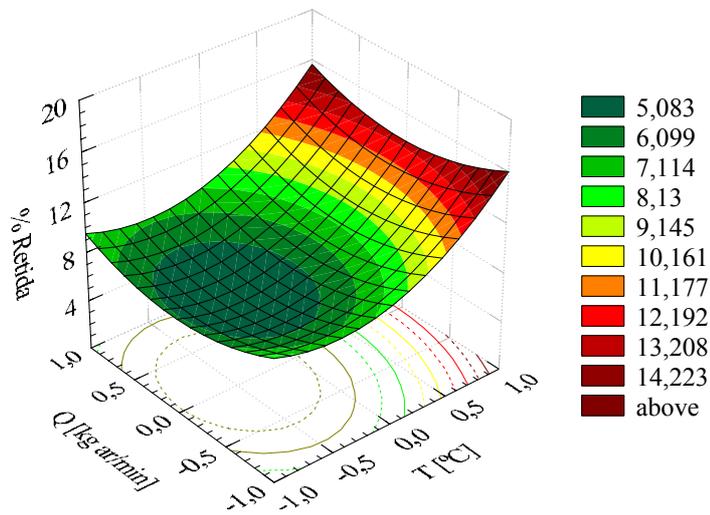


Figura 4.80 – Superfície de resposta para % retida no fundo com relação às variáveis T e Q.

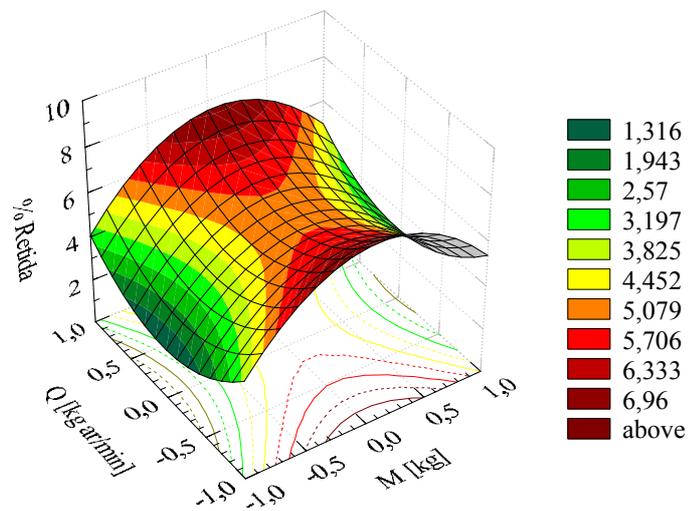


Figura 4.81 – Superfície de resposta para % retida no fundo com relação às variáveis M e Q.

A condição de operação que minimiza a resposta é obtida para vazões próximas à intermediária (8 kg ar/min) e temperatura próxima ao menor nível (40°C), como indica a Figura 4.80.

A Tabela 4.30 apresenta os coeficientes do modelo polinomial de segunda ordem, dado pela Equação (4.6), que representa as superfícies de resposta mostradas nas Figuras 4.79 a 4.81. As variáveis x_1 e x_2 da Equação (4.6) são representadas por T, M e Q.

Tabela 4.30 – Coeficientes da Equação (4.6) para porcentagem retida no fundo das peneiras.

Coeficientes	% retida fundo		
	T x M	T x Q	M x Q
β_0	4,9089	4,9089	4,9089
β_1	3,6700	3,6700	0,5383
β_{11}	3,9833	3,9833	-3,6817
β_2	0,5383	-0,2433	-0,2433
β_{22}	-3,6817	2,4333	2,4333
β_{12}	0,0000	0,0000	0,0000

A Tabela 4.31 apresenta os resultados para a análise granulométrica do grão de café proveniente do segundo planejamento de secagem, safra 2004.

Tabela 4.31 – Resultados da análise granulométrica, safra 2004.

Experimentos	% retida fundo	Variáveis	Efeitos	<i>p-level</i>
1	9,43	M	-2,40	0,0090
2	6,24	M²	1,88	0,0119
3	6,61	Q	-2,41	0,0089
4	9,39	Q²	-1,69	0,0160
5	6,99	MQ	-0,075	0,8869
6	7,94	-	-	-
7	7,05	-	-	-
8	3,95	-	-	-
9	4,08	-	-	-

Os resultados apresentados na Tabela 4.31 indicam que houve diferença significativa entre os tratamentos, com intervalo de confiança de 95%. A maior influência foi obtida com os termos lineares da vazão de ar e da massa de frutos de café. Os termos quadráticos das variáveis também apresentaram diferença significativa. Não houve efeito significativo nas interações entre as variáveis, ou seja, alterar o nível de um fator não influencia nos efeitos de outros fatores. A alteração da massa de frutos de café e da vazão de ar do menor nível para o maior reduz 2,40% a porcentagem de grãos retidos no fundo. Neste caso, o melhor é operar com maior massa e maior vazão de ar.

A Tabela 4.32 apresenta o quadro de análise de variância (ANOVA) que foi desenvolvido no *software* STATISTICA 5.0, para evidenciar os fatores significativos e as interações entre os fatores, com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.32 – Quadro de ANOVA, safra 2004.

Efeitos	% retida fundo			
	SQ	GL	F	<i>p-level</i>
M	8,64	1	36,75	0,0090
M²	7,07	1	30,07	0,0119
Q	8,74	1	37,16	0,0089
Q²	5,71	1	24,30	0,0160
MQ	0,006	1	0,024	0,8869
Erro	0,70	3	-	-
Total	30,87	8	-	-

A análise da Tabela 4.32 mostra que tanto M quanto Q influenciam a geração de finos. A maior geração de finos decorreu da operação com menor carga de frutos de café, na secagem, M = 10 kg e menor vazão de ar (7 kg/min), o que propiciava uma possibilidade de canalização do ar e aumento do tempo de secagem, conforme discutido na Seção 4.4.2.1. Os Experimentos 4 e 7, também foram realizados com a menor vazão de ar, os quais geraram maiores quantidades de finos. Uma secagem irregular de frutos de café, com a provável ocorrência de canais preferenciais, poderia propiciar tensões nos grãos tornando-os mais suscetíveis a fraturas. Esse fato possui grande importância na qualidade do produto e também está associado aos custos operacionais da secagem.

A Figura 4.82 apresenta a superfície de resposta para a porcentagem de grãos retidos no fundo do conjunto de peneiras, para o segundo planejamento de secagem.

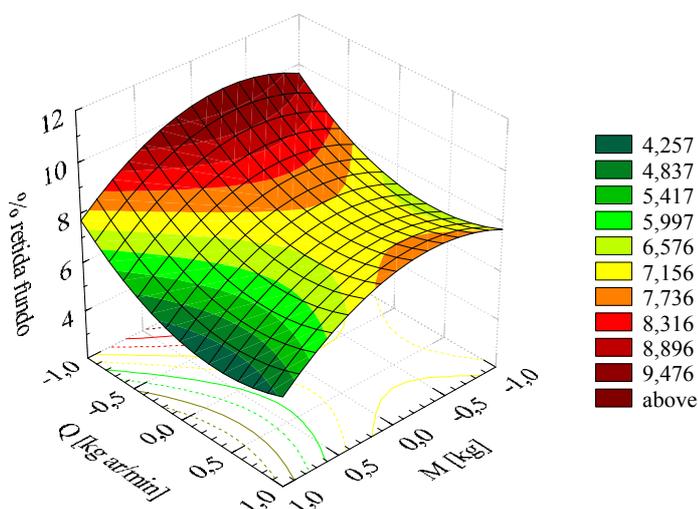


Figura 4.82 – Superfície de resposta para % retida no fundo, safra 2004.

A Figura 4.82 indica que, nas condições de operação do secador, não se obteve uma condição que minimiza a resposta porcentagem de grãos retidos no fundo.

A Equação (4.24) representa o modelo para a superfície de resposta da Figura 4.82.

$$\% \text{ retida} = 6,98 - 1,2M - 1,88M^2 - 1,21Q + 1,69Q^2 - 0,04MQ \quad (4.24)$$

Pelos coeficientes da Equação (4.24) percebe-se a grande influência da carga de café na secagem (M^2), mostrando que cargas menores irão propiciar maior quantidade de grãos quebrados.

Os resultados discutidos neste capítulo sofreram a influência da vibração, que não foi considerada nos planejamentos experimentais, mas foi de fundamental importância para a secagem dos frutos de café, possibilitando o escoamento dos mesmos sobre as bandejas. O Capítulo 5, descrito a seguir, apresenta a quantificação da amplitude e do adimensional de vibração durante a secagem dos frutos de café.