



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



PAULO SÉRGIO DE ANDRADE

ESTUDO DA SECAGEM DE CAFÉ ARÁBICA (*Coffea arabica* L.)
DESPOLPADO EM SECADOR ROTO-AERADO

UBERLÂNDIA - MG

2023

PAULO SÉRGIO DE ANDRADE

**ESTUDO DA SECAGEM DE CAFÉ ARÁBICA (*Coffea arabica* L.) DESPOLPADO
EM SECADOR ROTO-AERADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal de Uberlândia, como exigência parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Químicos/ Processos de Separação

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo

Coorientador: Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

UBERLÂNDIA - MG

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A553 Andrade, Paulo Sérgio de, 1997-
2023 ESTUDO DA SECAGEM DE CAFÉ ARÁBICA (*Coffea arabica* L.)
DESPOLPADO EM SECADOR ROTO-AERADO [recurso eletrônico] /
Paulo Sérgio de Andrade. - 2023.

Orientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo.

Coorientador: Claudio Roberto Duarte.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.87>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. I. Barrozo, Marcos Antonio de
Souza, 1961-, (Orient.). II. Duarte, Claudio Roberto,
1975-, (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV.
Título.

CDU: 66.0

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Mestrado Acadêmico, 07/2023, PPGEQ				
Data:	10 de fevereiro de 2023	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	10:24
Matrícula do Discente:	12122EQU008				
Nome do Discente:	Paulo Sérgio de Andrade				
Título do Trabalho:	Estudo da secagem de café arábica (<i>Coffea arabica</i> L.) despolpado em secador roto-aerado				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Secagem em secador roto-fluidizado				
ODS-ONU:	ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável e ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Manoel Marcelo do Prado - DEQ/UFS, Líbia Diniz Santos - FEQUI/UFU, Cláudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU, coorientador e Marcos Antonio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antonio de Souza Barrozo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/02/2023, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Libia Diniz Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/02/2023, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Manoel Marcelo do Prado, Usuário Externo**, em 10/02/2023, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Roberto Duarte, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/02/2023, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4246712** e o código CRC **7C1D71C9**.

*Aos meus pais, Joaquim (in memoriam) e
Teresinha, que sempre acreditaram no poder
de realização dos meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Marcos Antonio de Souza Barrozo, e ao meu coorientador, professor Claudio Roberto Duarte, pela confiança depositada em mim e por me concederem esta oportunidade inigualável na pesquisa científica. Seus incentivos e reconhecimentos me impulsionaram a buscar meus objetivos com apreço e entrega.

Aos meus amigos do Laboratório de Sistemas Particulados (FEQ/UFU), pelo acolhimento, auxílio e descontração durante a jornada de trabalho. Vocês tornaram minha adaptação à Uberlândia muito mais fácil.

Aos governos Lula e Dilma, pelo investimento na educação de nível superior e pela promoção de políticas afirmativas que garantiram a conclusão de minha graduação e a minha entrada na pós-graduação. Nesses governos, a educação passou a ser ferramenta de combate às desigualdades, onde me tornei o primeiro graduado e mestre da minha família e, por isso, sempre serei grato.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado, a qual viabilizou minha permanência no curso.

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Química e aos professores e demais funcionários, pelas soluções, recursos e apoios inspiradores e pela oportunidade de concluir este curso.

À minha mãe, Teresinha, e aos meus amigos, por todo o apoio e ajuda e pelas palavras de encorajamento que foram incondicionais e me iluminaram nos momentos mais difíceis.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização da minha pesquisa.

Muito obrigado!

*“Ninguém caminha sem aprender a caminhar,
sem aprender a fazer o caminho caminhando,
refazendo e retocando o sonho pelo qual se pôs a
caminhar.”*

(Paulo Freire)

RESUMO

A secagem de café arábica é geralmente feita por via de secagem mecânica ou em terreiro, visando reduzir a umidade do grão a um nível seguro. As técnicas usadas têm como características um elevado tempo de secagem e degradação indesejável do material, sendo então oportuno a busca por técnicas alternativas que reduzam o tempo de processo e mantenham a qualidade do produto. Dessa forma, este estudo visou melhorar a operação de secagem de café arábica despulpado, sem pergaminho e na condição de meia-seca, por meio da caracterização da matéria-prima, seguida pela avaliação do desempenho da secagem, modelagem da transferência simultânea de calor e massa entre o café e o ar em um secador rotatório não convencional, correlação entre atributos físico-químicos e qualidade do café e, por fim, determinação de condições ótimas de operação de forma a equilibrar o desempenho da secagem e a qualidade do produto. A determinação dos parâmetros geométricos do material foi realizada através da análise de imagens obtidas por fluxo de partículas. A análise das imagens possibilitou também a determinação de diversos aspectos relativos à morfologia das partículas, entre eles a esfericidade e a relação de aspecto. A análise termogravimétrica (TGA) para o café despulpado também foi realizada. Os experimentos de secagem foram conduzidos em diferentes níveis de temperatura (T_f) e velocidade do ar (v_f), assim como da vazão de alimentação de sólidos (W_s). Após regime permanente, as amostras foram recolhidas para as análises do desempenho de secagem, modelagem e verificação de qualidade. As operações de secagem do café arábica despulpado foram realizadas de acordo com um Planejamento Composto Central (PCC) com 16 experimentos. Um modelo a duas fases, com um conjunto apropriado de equações constitutivas, foi usado para descrever o processo de secagem. O sistema de equações foi resolvido numericamente usando a técnica de colocação normal. A qualidade físico-química do café foi avaliada por meio da determinação da umidade, atividade de água, pH, acidez total titulável e teores de açúcares e de ácidos orgânicos. O tempo médio de residência do material dentro do secador variou de 14,60 a 27,47 min, o que é pequeno quando comparado com outros tipos de secadores utilizados para café, processado por diferentes maneiras, representando uma redução de até aproximadamente 88 % no tempo de secagem. As taxas de secagem obtidas no secador roto-aerado variaram de 0,09 a 0,24 p.p./min e foram até 120 vezes superiores às obtidas para o café em outras técnicas de secagem. Em geral, a maior diminuição da umidade do café esteve associada a condições que levaram a uma alta taxa de secagem e, conseqüentemente, maior aquecimento do café. Os resultados simulados mostraram boa concordância com os dados experimentais. A diferença média entre os resultados experimentais e simulados foi de 2,39 % para a umidade do café e de 0,89 % para a temperatura do café. Mesmo o café ultrapassando 40 ou 45 °C, durante alguns experimentos de secagem, o tempo de exposição foi tão baixo que não foi capaz de diminuir a qualidade do grão, no tocante à acidez total titulável (ATT) e no seu equilíbrio com a doçura (sacarose/ATT). Além de ter um desempenho de secagem superior a outros secadores, o roto-aerado também contribuiu para a manutenção da qualidade do café no tocante à acidez total, atividade de água, açúcares e ácidos orgânicos. A função de desejabilidade resultou nos níveis ótimos das variáveis operacionais de $v_f = 2,7$ m/s, $T_f = 81,8$ °C e $W_s = 40$ g/min.

Palavras-chave: Secagem; Roto-aerado; Café arábica despulpado; Caracterização; Análises físico-químicas; Qualidade; Modelagem matemática.

ABSTRACT

Arabica coffee post-harvest processing is usually done by mechanical or terrace drying, aiming to reduce the bean moisture content to a safe level. The techniques used have as characteristics a long drying time and undesirable material degradation. So, it is timely to investigate and propose an alternative technique that reduces processing time and maintains product quality. Thus, this study aimed to improve the drying operation of pulped arabica coffee, without parchment and previously dried on a terrace, through the: characterization of the raw material, followed by the evaluation of the drying performance, modeling of the simultaneous heat and mass transfer between the coffee and the air in a non-conventional rotary dryer, the correlation between physicochemical attributes and coffee quality and, finally, determination of optimal operating conditions to balance the drying performance and product quality. The material geometric parameters were obtained through image analysis by particle flow. The image analysis also made it possible to determine several aspects related to the particle morphology, including sphericity and aspect ratio. The thermal decomposition of pulped coffee was investigated by thermogravimetric analysis (TGA). Drying experiments were performed at distinct levels of temperature (T_f) and air velocity (v_f), as well as feed flow rate (W_s). After reaching a steady state, samples were collected for drying performance, modeling, and coffee quality verification. The drying operations were executed according to a Central Composite Design (CCD) with 16 experiments. A two-phase model with an appropriate set of constitutive equations was used to describe the drying process. The equations system was solved numerically using the collocation technique. The coffee quality was evaluated by determining moisture, water activity, pH, titratable acidity (TA), and sugar and organic acid contents. The average residence time of the material in the dryer varied from 14.60 to 27.47 min, which is shorter than in other types of dryers used for coffee processing, representing a reduction of up to approximately 88% in drying time. The drying rates in the roto-aerated dryer varied from 0.09 to 0.24 p.p./min and were much higher than those obtained for coffee in other drying techniques. In general, the higher reduction in coffee moisture was associated with conditions that led to a higher drying rate and heating of the coffee. The simulated results showed good agreement with the data. The average difference between experimental and simulated results was 2.39 % for coffee moisture and 0.89 % for coffee temperature. Even though the coffee temperature exceeded 40 or 45 °C during some experiments, the exposure time was so low that it did not decrease the quality of the bean, regarding titratable acidity and its balance with sweetness (sucrose/TA). Besides having a better drying performance than other dryers, the roto-aerated also contributed to the preservation of coffee quality regarding total acidity, water activity, sugars, and organic acids. The desirability function resulted in optimal levels of operational variables of $v_f = 2.7$ m/s, $T_f = 81.8$ °C, and $W_s = 40$ g/min.

Keywords: Drying; Roto-aerated dryer; Pulped arabica coffee; Characterization; Physical-chemical analysis; Quality; Mathematical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modelo teórico da curva de secagem, sendo N o fluxo de vapor e X o teor de água em base seca	24
Figura 2.2 - Cartograma da produção, em toneladas (t), de café arábica em MG (ano de 2022), com destaque para a cidade de Uberlândia.....	26
Figura 2.3 - Esquema generalizado do secador rotatório	30
Figura 2.4 - Visão interna do (a) secador rotatório convencional e (b) secador roto-aerado ...	31
Figura 2.5 - Esquema do elemento infinitesimal de volume do secador rotatório operando com fluxo cruzado	36
Figura 2.6 - Estrutura do fruto do café e representação esquemática dos métodos de processamento pós-colheita correlacionados com grandes mudanças bioquímicas que impactam na constituição volátil do café	43
Figura 3.1 - Fotografias do café arábica despulpado sem pergaminho	55
Figura 3.2 - Esquema da unidade experimental do processo de secagem: (1) recipiente de armazenamento do material, (2) esteira de transporte, (3) secador roto-aerado, (4) visão interna (minitubos), (5) sistema de aquecimento elétrico e (6) soprador	56
Figura 3.3 - Fotografia da saída dos grãos no secador roto-aerado.....	59
Figura 3.4 - Fotografias do café despulpado após a secagem (embalado)	63
Figura 3.5 - Processo de quarteamento do material: (a) homogeneização e divisão em quatro grupos e (b) seleção de dois grupos opostos diagonalmente e repetição do processo.....	64
Figura 3.6 - Fotografias do café (a) durante o processo de moagem e (b) moído	64
Figura 4.1 - Curva termogravimétrica (TGA) e termogravimétrica derivada (DTG) do café arábica despulpado	70
Figura 4.2 - Superfície de resposta para o tempo de secagem em relação à velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3).....	73
Figura 4.3 - Superfícies de resposta para a redução de umidade em relação à: (a) velocidade (X_1) e temperatura do ar (X_2); (b) temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3); e (c) velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3)	74
Figura 4.4 - Superfície de resposta para a variação de temperatura em relação à temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3).....	76
Figura 4.5 - Perfis experimental e simulado para a umidade (M) e temperatura do café (T_s) submetido à secagem em roto-aerado nas condições experimentais de 1 a 4	78

Figura 4.6 - Perfis experimental e simulado para a umidade (M) e temperatura do café (T_s) submetido à secagem em roto-aerado nas condições experimentais de 5 a 8	79
Figura 4.7 - Perfis experimental e simulado para a umidade (M) e temperatura do café (T_s) submetido à secagem em roto-aerado nas condições experimentais de 9 a 12	80
Figura 4.8 - Perfis experimental e simulado para a umidade (M) e temperatura do café (T_s) submetido à secagem em roto-aerado nas condições experimentais de 13 a 16	81
Figura 4.9 – Taxas de secagem (R_w) do café despulpado, ao longo do comprimento adimensional do roto-aerado (z), em diferentes condições de (a) velocidade e (b) temperatura do ar de secagem.....	82
Figura 4.10 - Resultados experimentais e simulados para o teor de umidade (M) e temperatura do café (T_s) no secador roto-aerado	84
Figura 4.11 - Superfície de resposta para a acidez total titulável (ATT) em relação à temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3).....	87
Figura 4.12 - Relação entre tempo de secagem e ATT (base seca).....	87
Figura 4.13 - Teores de açúcares do café despulpado úmido (CDU) e após cada condição de secagem no roto-aerado (base seca)	88
Figura 4.14 - Superfícies de resposta para o teor de sacarose em relação à: (a) velocidade (X_1) e temperatura do ar (X_2); (b) temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3); e (c) velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3).....	89
Figura 4.15 - Superfícies de resposta para o teor de açúcares totais em relação à: (a) velocidade (X_1) e temperatura do ar (X_2); (b) temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3); e (c) velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3)	90
Figura 4.16 - Teores de ácidos orgânicos do café despulpado antes e após cada condição de secagem no roto-aerado (base seca)	91
Figura 4.17 - Superfícies de resposta para o teor de ácido cítrico em relação à: (a) velocidade (X_1) e temperatura do ar (X_2); (b) temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3); e (c) velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3)	92
Figura 4.18 - Superfícies de resposta para o teor de ácido málico em relação à: (a) velocidade (X_1) e temperatura do ar (X_2); (b) temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3); e (c) velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3)	93
Figura 4.19 - Análise de desejabilidade para redução de umidade na secagem de café no roto-aerado.....	94
Figura 4.20 - Análise de desejabilidade para componentes de qualidade de café na secagem em roto-aerado.....	95

Figura 4.21 - Análise de desejabilidade para otimização da secagem de café no roto-aerado, levando em consideração o desempenho de secagem e atributos de qualidade96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Produção de espécies de café pelo Brasil	25
Tabela 2.2 - Propriedades físicas e térmicas do café arábica maduro	27
Tabela 2.3 - Características gerais de secadores rotatórios	35
Tabela 2.4 - Composição do café arábica cru (em base seca)	42
Tabela 2.5 - Níveis de compostos do grão de café arábica cru associados com a qualidade da bebida (em base seca)	51
Tabela 2.6 - Componentes associados à qualidade do café arábica (cultivar Catimor) cru processado por via úmida em diferentes condições de secagem (em base seca)	53
Tabela 2.7 - Componentes associados à qualidade do café robusta (cultivar RY1) cru processado por via seca em diferentes condições de secagem (em base seca)	54
Tabela 3.1 - PCC para as secagens do café despulpado em roto-aerado	60
Tabela 4.1 - Distribuição granulométrica e aspectos morfológicos do café despulpado, obtidos pelo Camsizer®	69
Tabela 4.2 - Resultados da secagem de café arábica despulpado no secador roto-aerado	71
Tabela 4.3 - Resultados de análises físico-químicas de qualidade do café despulpado no secador roto-aerado, antes e após cada ensaio de secagem	85
Tabela 4.4 - Resultados experimentais e preditos na condição otimizada	97

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Área da seção transversal do secador [m^2]
- ATT – Acidez total titulável [$\text{mL } 100 \text{ g}^{-1}$]
- A_w – Atividade de água [-]
- b. u. - Base úmida [-]
- b. s. - Base seca [-]
- C - Parâmetro do modelo de isoterma de equilíbrio [-]
- Cp_f - Calor específico do fluido [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]
- Cp_l - Calor específico do líquido [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]
- Cp_s - Calor específico do sólido [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]
- Cp_v - Calor específico do vapor [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]
- D – Desejabilidade [-]
- $\overline{d_{rel}}$ - Desvios relativos [%]
- $\overline{D_s}$ - Diâmetro médio de Sauter [mm]
- E_a – Energia de ativação [J mol^{-1}]
- G_f - Vazão mássica do ar em base seca [kg s^{-1}]
- G_s - Vazão mássica do sólido em base seca [kg s^{-1}]
- H^* - Carga total de sólidos no secador [kg]
- h_f – Entalpia do fluido [kJ kg^{-1}]
- h_s – Entalpia do sólido [kJ kg^{-1}]
- L – Comprimento do secador [m]
- K - Parâmetro do modelo de isoterma de equilíbrio [-]
- K_F – Parâmetro do coeficiente global volumétrico de transferência de calor [$\text{kW m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]
- k - Constante de secagem [s^{-n}]
- L - Comprimento do secador [m]
- M - Umidade do material, massa de água por massa de sólido seco [kg kg^{-1}]
- m_F – Parâmetro do coeficiente global volumétrico de transferência de calor [-]
- M_m - Parâmetro do modelo de isoterma de equilíbrio [kg kg^{-1}]
- M_0 - Umidade inicial do material, massa de água por massa de sólido seco [kg kg^{-1}]
- M_{eq} - Umidade de equilíbrio do material, massa de água por massa de sólido seco [kg kg^{-1}]
- MR - Adimensional de umidade [-]
- n - Constante de secagem [-]

n_F – Parâmetro do coeficiente global volumétrico de transferência de calor [-]
p. p. - Pontos percentuais, massa de água por massa de sólido seco [g 100 g⁻¹]
 R - Constante universal dos gases [J mol⁻¹ K⁻¹]
 RA – Razão de aspecto [-]
rpm - Rotações por minuto [-]
 R_w - Taxa de secagem do material [g 100 g⁻¹ min⁻¹]
 S – Sacarose [g 100 g⁻¹]
 T_f - Temperatura do fluido [°C]
 T_s - Temperatura do sólido [°C]
 t - Tempo [s]
 UR - Umidade relativa do ar decimal [-]
 U_{va} - Coeficiente global volumétrico de transferência de calor [kW m⁻³ °C⁻¹]
 V - Volume do secador [m³]
 v_f - Velocidade do fluido [m s⁻¹]
 v_s - Velocidade de escoamento do sólido através do secador [m s⁻¹]
 W_g – Vazão de alimentação de sólidos [kg s⁻¹]
 W – Umidade absoluta do ar, massa de água por massa de ar seco [kg kg⁻¹]
 x - Posição ao longo do secador [m]
 X_1 – Codificação da variável velocidade do fluido [-]
 X_2 – Codificação da variável temperatura do fluido [-]
 X_3 – Codificação da variável vazão de alimentação do sólido [-]
 z - Adimensional de comprimento (x L⁻¹) [-]

Símbolos gregos

ρ – Densidade ou massa específica [g cm⁻³]
 λ - Calor latente de vaporização da água pura [kJ kg⁻¹]
 τ - Tempo de residência médio das partículas no secador [min]
 φ - Esfericidade do sólido [-]
 Δ - Variação [-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Princípios de secagem de alimentos	21
2.1.1	Curva de secagem	22
2.2	Secagem de café	25
2.3	Secador roto-aerado	29
2.3.1	Histórico do secador roto-aerado	31
2.3.2	Desidratação em secadores rotatórios	33
2.4	Modelagem matemática do processo de secagem no secador roto-aerado.....	35
2.4.1	Balanço de massa	37
2.4.2	Balanço de energia	38
2.4.3	Modelo	39
2.4.4	Equações constitutivas	40
2.5	Composição e técnicas de medição dos compostos do café	41
2.5.1	Açúcares.....	46
2.5.2	Componentes lipídicos.....	47
2.5.3	Ácidos orgânicos e clorogênicos	48
2.5.4	Compostos nitrogenados	48
2.5.5	Acidez total titulável e pH	50
2.6	Qualidade do café em diferentes condições de secagem.....	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1	Material	55
3.2	Unidade experimental	55
3.3	Metodologia experimental	56
3.3.1	Caracterização da matéria-prima	56
3.3.2	Experimentos de secagem.....	58
3.3.3	Resolução numérica do modelo matemático	60
3.3.4	Avaliação da qualidade do produto	63
3.3.5	Análise estatística e otimização	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1	Caracterização do café arábica despulpado.....	68
4.2	Desempenho da secagem de café no roto-aerado.....	71

4.3	Modelagem matemática e simulação do processo de secagem	77
4.4	Qualidade físico-química do grão	85
4.4.1	Composição de açúcares	88
4.4.2	Composição de ácidos	91
4.5	Otimização da operação de secagem.....	94
5	CONCLUSÕES.....	98
	REFERÊNCIAS	100
	APÊNDICE A – Algoritmo da resolução numérica do modelo em MATLAB®..	107
	APÊNDICE B – Propriedades físicas do café despulpado e do ar de secagem....	110

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022a), a cultura de café arábica (*Coffea arabica* L.) representa uma das mais importantes produções agrícolas do Brasil, com 64,76 % da produção nacional entre as espécies de café. A região sudeste é destacada como a maior produtora de café arábica, onde se produziu 1.874.321 toneladas na safra de 2022, equivalente a 92,43 % da produção nacional.

Os frutos do café (café cereja) geralmente são colhidos com teor de umidade entre 30 e 65 % b.u. e o café despulpado possui uma umidade de aproximadamente 20 a 40 % b.u. Nestas condições, o café está sujeito à rápida deterioração. Assim, antes de ser armazenado e comercializado, o café deve ser secado até uma umidade entre 10 e 12 % b.u., para aumentar sua vida útil e garantir que sua comercialização e consumo sejam seguros (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; DE MELO PEREIRA et al., 2019; GONELI et al., 2013).

O processo de secagem é uma das etapas de maior relevância na pós-colheita do café, tanto em relação ao consumo de energia e formação dos custos de processamento quanto do ponto de vista da preservação da qualidade do grão. A escolha da técnica de secagem depende de fatores econômicos e do tipo de processamento empregado, o que influencia nas propriedades físico-químicas do café e, conseqüentemente, na qualidade da bebida (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; LIVRAMENTO et al., 2017).

A secagem em terreiro é comumente usada, pois tende a produzir cafés torrados com propriedades sensoriais superiores à secagem mecânica. Contudo, possui desvantagens, como tempo de secagem prolongado (de até 7 dias), alto custo de mão de obra e a necessidade de uma grande área para secagem, além do alto risco de deterioração pela exposição do produto a condições não controladas (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; KULAPICHITR et al., 2019; LIVRAMENTO et al., 2017).

Por sua vez, quando se opta pela secagem mecânica do café, a temperatura do ar de secagem normalmente deve estar entre 45 e 50 °C, não devendo ultrapassar 60 °C em processos de secagem prolongados. A temperatura do café pode ser elevada até 45 °C para os cafés commodity e 40 °C para os cafés especiais (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; MUJUMDAR, 2006).

Alguns estudos compararam o impacto de diferentes técnicas de secagem (bomba de calor, leito fixo, solar, estufa e bandeja) sobre a qualidade do café e verificaram que, mesmo a secagem mecânica sendo mais rápida, ela apresenta desvantagens devido às temperaturas aplicadas (entre 40 e 60 °C) por um tempo prolongado de secagem (de 11 h a 5 dias),

ocasionando perdas significativas de componentes de qualidade do café (DONG et al., 2017; KULAPICHITR et al., 2019, 2022; LIVRAMENTO et al., 2017).

Em uma secagem em duas etapas (HII; BORÉM, 2019), o café despulpado é pré-secado em terreiro, podendo chegar a 18 % b.u. de umidade. Após atingir esta condição de meia seca (18 a 30 % b.u.), o café é colocado em um secador com um teor de umidade uniforme. A secagem é conduzida até que o café atinja 12,5 a 13 % b.u. de umidade e, então, o café é descarregado enquanto ainda está quente e passa por um período de têmpera até atingir 11 % b.u. de umidade final, antes da transferência para o armazenamento.

O secador roto-aerado é um equipamento que foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQ/UFU) e pode ser uma alternativa para a secagem de café. Ele possui uma configuração que é constituída por um cilindro rotatório, semelhante ao secador rotatório convencional, com o acréscimo de um sistema de fluidização interno e a retirada dos suspensores (ARRUDA, 2008).

Sua concepção não convencional, além de superar algumas limitações operacionais, tem como motivação o melhor contato fluido-partícula, esperando-se, desta forma, aumentar os coeficientes de transferência de calor e massa e, como consequência, possibilitar a redução do consumo energético e aumentar a eficiência do processo (LISBOA, 2005).

O modelo a duas fases tem sido utilizado com sucesso para modelar a transferência de calor e massa entre sólidos e ar (SOUZA et al., 2021). Este modelo compreende as equações de balanço de massa e energia aplicadas tanto às fases fluida como sólida e requer equações constitutivas para o coeficiente de transferência de calor entre estas duas fases, cinética de secagem e isoterma de sorção de umidade.

A modelagem adequada e a simulação dos perfis de temperatura e umidade do material no secador, uma vez validados por dados experimentais, permitem, por exemplo, examinar e interpretar o efeito das condições de operação do processo de secagem sem a necessidade de incorrer em um extenso conjunto de testes experimentais (SOUZA et al., 2021) e, assim, escolher as condições apropriadas para preservar a qualidade do café, por exemplo.

Sobre a qualidade do café, os principais compostos ativos do aroma de sua bebida, como furanos, pirazinas e pirróis, não são encontrados no fruto ou no grão cru. Assim, a qualidade do grão de café antes da torra é determinada pelos principais constituintes não voláteis presentes na matéria-prima (BARBOSA et al., 2019; FARAH et al., 2006; TORRES, 2014), como açúcares, compostos nitrogenados, lipídeos, ácidos fenólicos e orgânicos. Esses precursores de aroma ainda sofrerão modificações nas etapas de processamento pós-colheita (DE MELO

PEREIRA et al., 2019) e, por isso, devem ser avaliados antes e após o processo de secagem. A análise dos constituintes do café é geralmente realizada por via úmida, particularmente com cromatografia líquida de alta eficiência (DIAZ-DE-CERIO et al., 2019).

Deste modo, este trabalho teve como objetivo geral melhorar o desempenho da secagem de café arábica (*Coffea arabica* L.) despulpado, utilizando pela primeira vez o secador roto-aerado.

Os objetivos específicos foram:

- i.** Analisar de forma detalhada o processo do secador roto-aerado, à luz da transferência de calor e massa, a partir do estudo experimental, com obtenção dos dados de temperatura e umidade dos grãos de café; e do estudo teórico, que envolve previsões a partir da simulação numérica dessas variáveis, via modelo a duas fases, e os estudos da cinética de secagem, importante para a obtenção da equação constitutiva de taxa de secagem, e do coeficiente de transferência de calor, necessários para a modelagem;
- ii.** Avaliar macroscopicamente os efeitos das condições operacionais (temperatura e velocidade do ar e alimentação de sólidos) sobre as variáveis-resposta (tempo de residência, variação de umidade, temperatura do sólido na saída, atributos de qualidade);
- iii.** Reduzir o tempo do processo de secagem de café arábica despulpado frente a outras técnicas de secagem, apresentadas pela literatura, e preservar a qualidade do produto;
- iv.** Definir condições operacionais ótimas da secagem de café despulpado no roto-aerado, por meio da análise de desejabilidade (otimização multirresposta), que priorize o desempenho da secagem (em termos de redução de umidade) e a manutenção da qualidade do produto, possibilitando a produção de cafés de maior qualidade, como cafés especiais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Princípios de secagem de alimentos

A secagem ou desidratação, como é mais conhecida, é definida como a remoção de água de um material por evaporação, com a finalidade de obter um produto com um teor de água suficientemente baixo, de modo que atinja o objetivo de um processo (BERK, 2018; FELLOWS, 2018).

Segundo Berk (2018), os principais objetivos tecnológicos da desidratação de alimentos são:

- A preservação, como resultado da redução da atividade de água;
- A redução de massa e volume, de modo a reduzir custos com armazenamento e transporte;
- A transformação de um alimento em uma forma mais conveniente de armazenar, embalar, transportar e utilizar. Por exemplo, a transformação de líquidos ou pastas (como leite, ovos, sucos, polpas de frutas e vegetais ou extrato de café) em produtos instantâneos, os quais são reconstituídos à forma original por adição de água;
- O lançamento ou criação de um produto alimentício com uma característica desejável, como um sabor diferente, crocância, mastigabilidade, entre outras características sensoriais (por exemplo, transformação de uvas em passas).

Apesar dos recentes progressos na investigação da secagem, os princípios físicos dos fenômenos que ocorrem durante a desidratação e reidratação de alimentos não são inteiramente compreendidos. A modelagem da secagem é árdua no caso de materiais alimentares, dada a sua complexidade (FELLOWS, 2018).

Neste contexto, há uma utilização extensiva de modelos teóricos, que fazem aproximações dos fenômenos do processo, já que um modelo completamente satisfatório de cinética de secagem, aplicável a todos os alimentos, ainda não está disponível. De acordo com Berk (2018), as questões de engenharia e tecnologia mais importantes na desidratação de alimentos são:

- **A cinética da secagem:** A secagem é um processo relativamente lento, com algumas notáveis exceções, como a secagem por spray. O conhecimento dos fatores que afetam a taxa de secagem é essencial para a otimização do projeto e da operação dos sistemas de secagem;

- **A qualidade do produto:** A remoção da água não é a única consequência da maioria das operações de secagem de alimentos. Podem ocorrer, durante a desidratação, outras mudanças importantes relacionadas à qualidade do alimento, como alterações no gosto, sabor, aparência, textura, estrutura e valor nutritivo. A extensão de tais mudanças depende das condições do processo;
- **O consumo de energia:** A maioria dos processos de secagem comuns utiliza grandes quantidades de energia com eficiência relativamente baixa. Em termos energéticos, a secagem é um processo de remoção de água desperdiçada, em comparação com outras operações de remoção de água, como a separação por membranas.

O mecanismo de remoção de água por secagem de alimentos envolve dois processos simultâneos: a transferência de calor aos alimentos, para que haja a evaporação da água, e o transporte destes vapores de água formados para fora dos alimentos (FELLOWS, 2018).

A secagem é, portanto, uma operação baseada em transferências de calor e massa concomitantes. O mecanismo limitante da taxa de secagem pode ser a evaporação superficial ou o transporte interno de água, dependendo das condições (BERK, 2018).

Dependendo do modo de transferência de calor e massa, os processos de secagem industrial mais comuns podem ser agrupados em duas categorias: secagem convectiva e condutiva (BERK, 2018; FELLOWS, 2018; MUJUMDAR, 2006).

Na secagem convectiva, ou secagem por gás quente, o gás quente e seco (geralmente o ar) é utilizado para fornecer o calor necessário para a evaporação e remoção do vapor de água da superfície dos alimentos. Tanto as trocas de calor quanto as trocas de massa entre o gás e o alimento são essencialmente transferências convectivas, embora a condução e a radiação também possam estar envolvidas. É um processo inerentemente lento, em que cerca de 2/3 do tempo de secagem é usado para remover 1/3 da umidade (BERK, 2018; FELLOWS, 2018).

Na secagem condutiva, ou por superfícies aquecidas, o alimento úmido é levado ao contato com uma superfície quente e a água no alimento é evaporada. A secagem a vácuo, secagem em tambor e secagem com vapor superaquecido são casos deste modo de secagem. Este tipo de desidratação possui uma eficiência maior de secagem, porém é mais agressivo e pode expor o alimento a temperaturas mais altas (BERK, 2018; FELLOWS, 2018).

2.1.1 Curva de secagem

Como definida anteriormente, a secagem convectiva utiliza um gás quente e seco, normalmente o ar, que irá promover as trocas de calor e massa entre ele e o alimento

(FELLOWS, 2018). Neste modo de desidratação, é importante conhecer alguns conceitos, fundamentos e características que descrevem a transferência de calor e massa, os quais serão abordados a seguir.

Para a análise de processos de desidratação, as curvas de secagem são comumente utilizadas, onde pode ser calculado o tempo de secagem, além da estimativa da temperatura, distribuição da umidade, entre outros parâmetros (MUJUMDAR, 2006).

Neste processo, a taxa de secagem é de importância técnica e econômica, principalmente porque determina a capacidade de produção do secador, e é definida como a massa de água removida por unidade de tempo e de massa de matéria seca, designada como R_w , ou como a massa de água removida por unidade de tempo e de área, ou seja, fluxo de vapor, denotado por N (BERK, 2018; MUJUMDAR, 2006). Os fatores que afetam a taxa de secagem podem ser divididos em dois grupos (FELLOWS, 2018):

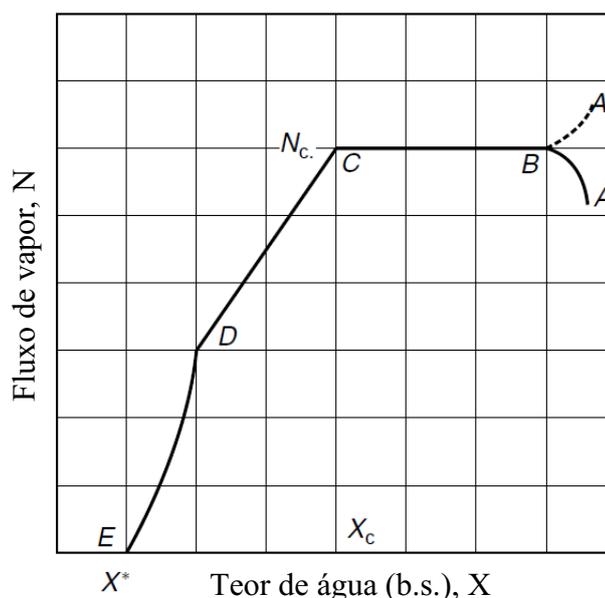
- **Condições internas:** Variáveis do material sujeito à secagem (por exemplo, forma e tamanho, porosidade, teor de umidade, pressão de vapor de água, como uma função da composição e temperatura, e isotermas de sorção de vapor de água em diferentes temperaturas);
- **Condições externas:** Temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem e características do secador.

Os dados da taxa de secagem são geralmente representados sob a forma de curvas de secagem. Uma curva de secagem é a parcela da taxa de secagem versus o teor de água restante. A curva de secagem é geralmente modelada de modo a mostrar três regiões ou fases, representadas da direita para a esquerda na Figura 2.1 (BERK, 2018; FELLOWS, 2018; MUJUMDAR, 2006):

- **Região I - Fase de adaptação (A-B ou A'-B):** A taxa de secagem aumenta ou diminui à medida que a água é retirada. Fisicamente, este comportamento é atribuído ao "condicionamento" da amostra, como, por exemplo, aquecimento ou resfriamento, abertura dos poros, entre outros. Esta fase é geralmente curta e não é sempre observada em experimentos de secagem. Muitas vezes é omitida no cálculo de tempo de secagem.
- **Região II - Fase de taxa constante (B-C):** A taxa de secagem permanece aproximadamente constante enquanto a água é removida. A teoria prevê que a taxa de evaporação convectiva de uma superfície saturada de água é constante se as condições externas (temperatura, umidade e velocidade do ar) são constantes.

- **Região III - Fase de taxa decrescente (C-D e D-E):** Abaixo de um certo teor de umidade, chamado de teor de umidade crítico (X_c), a taxa de secagem cai acentuadamente à medida que a água é removida. A taxa de transferência de água do interior da partícula para sua superfície decresce continuamente à medida que o produto se torna mais seco. Quando o suprimento de água para a superfície cai abaixo da taxa de evaporação, o teor de umidade da superfície começa a diminuir rapidamente e se aproxima do teor de umidade de equilíbrio (X^*), correspondente à umidade relativa do ar na isoterma de desorção do material. A partir desse momento, o transporte interno torna-se o limitador da taxa de secagem e não mais a evaporação.

Figura 2.1 - Modelo teórico da curva de secagem, sendo N o fluxo de vapor e X o teor de água em base seca



Fonte: Adaptado de Mujumdar (2006).

Se um determinado material for seco sob diferentes condições externas, por exemplo diferentes temperaturas do gás de secagem, o resultado é uma família de curvas de secagem. Na prática, é impossível manter condições externas constantes. As condições mudam em virtude do próprio processo (BERK, 2018).

Quando o alimento é seco, o ar é umedecido e resfriado. As condições de ar quase constantes requeridas para a determinação experimental das curvas de secagem são obtidas mantendo uma alta relação de massa de ar por massa de alimento (também conhecida como secagem em camada fina), de modo que as mudanças nas propriedades do ar, durante a secagem, são insignificantes (MUJUMDAR, 2006).

Segundo Berk (2018), para a análise de processos de secagem onde a relação massa de ar por massa de alimento é mais realista, o método de cálculo aceito é considerar o leito (ou a bandeja) como consistindo em um número de elementos finitos (camadas finas ou comprimentos curtos). Dessa forma, calcula-se a extensão da secagem em cada elemento como secagem em condições constantes, a fim de determinar as condições alteradas do ar que emerge de cada elemento e calcular a secagem no elemento seguinte utilizando as condições alteradas do ar.

2.2 Secagem de café

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022a), a cultura de café arábica (*Coffea arabica* L.) representa uma das mais importantes produções agrícolas do Brasil, sobretudo da região sudeste (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Produção de espécies de café pelo Brasil

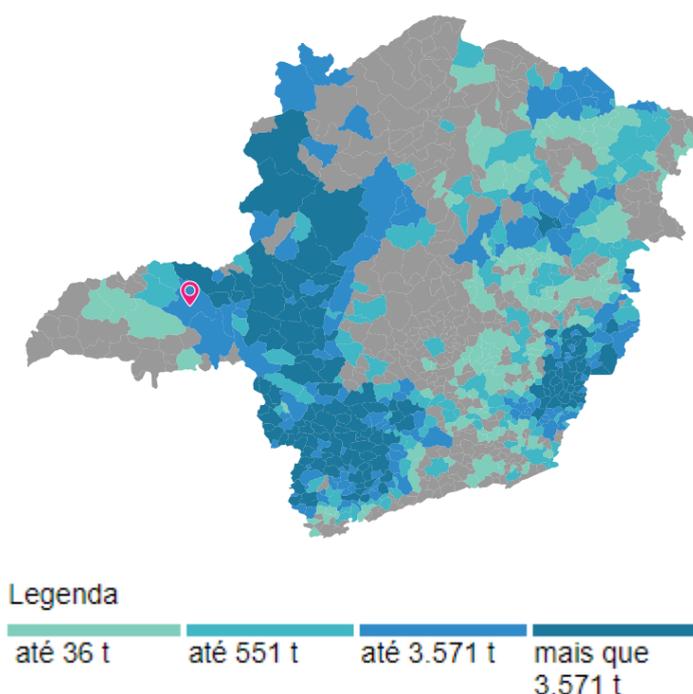
Produto	Produção (em toneladas)					
	No Brasil		No Sudeste		Em Minas Gerais	
	# ^a	Safra 2022	#	Safra 2022	#	Safra 2022
Café arábica	14	2.027.476	9	1.874.321	6	1.373.871
Café canéfora	20	1.103.443	14	753.526	20	23.399

^a# é a posição no ranking entre as maiores produções agrícolas da região. Fonte: IBGE (2022a).

Analisando especificamente para o estado de Minas Gerais, é possível notar que as regiões intermediárias de Uberlândia, Uberaba, Patos de Minas (com destaque para Patrocínio, município de maior produção de café arábica no país), Pouso Alegre e Varginha (onde se situam os municípios de Campos Gerais e Três Pontas, respectivamente, 2º e 3º maiores produtores) apresentam uma produção notável de café arábica (Figura 2.2). Em 2022, o café arábica representou quase 65 % da produção nacional entre as espécies de café (IBGE, 2022a).

Os frutos do café geralmente são colhidos com teor de umidade entre 30 e 65 % (em base úmida), dependendo do seu estado de maturação (verde, cereja ou passa), e estão sujeitos a condições favoráveis à rápida deterioração. Assim, antes de ser armazenado, o café deve ser desidratado até uma umidade de aproximadamente 10 a 12 % b.u. Para tal, o café passa por diferentes métodos de processamento, podendo ser divididos em, basicamente, em via seca ou despulpada (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; DE MELO PEREIRA et al., 2019).

Figura 2.2 - Cartograma da produção, em toneladas (t), de café arábica em MG (ano de 2022), com destaque para a cidade de Uberlândia



Fonte: IBGE (2022b).

Na via seca, os cafés são processados como café cereja, que corresponde ao café em formato de fruto com todas as suas partes e constituições: com os dois cotilédones (ou sementes, grãos, endosperma) envolvidos pela película prateada (tegumento), pelo pergaminho (ou endocarpo), pela mucilagem, pela polpa (mesocarpo) e pela camada externa, conhecida como casca (ou exocarpo). Nesta condição, o café possui maior risco de deterioração por se apresentar em um estado com maior umidade (BARBOSA et al., 2019; HII; BORÉM, 2019).

O outro processamento corresponde à via semiseca, onde o café cereja é descascado e despulpado, para remover o exocarpo e a polpa e separar os cotilédones, podendo também ser desmucilado por fermentação (via úmida) ou mecanicamente (via semiúmida), para remover a mucilagem. Na via de despulpamento, parte da umidade é removida e, por isso, o grão de café possui menor risco de deterioração, mas ainda é necessário que seja secado (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; DE MELO PEREIRA et al., 2019). Algumas propriedades físicas e térmicas do café cereja e café despulpado são apresentadas na Tabela 2.2.

O café também pode ser caracterizado quanto a sua composição química, por meio da quantificação de sólidos solúveis, extrato aquoso, flavonoides, taninos, aminoácidos, açúcares, lipídeos, trigonelina, ácidos clorogênicos, cafeína, compostos voláteis, acidez total titulável, entre outros (DE MELO PEREIRA et al., 2019; DONG et al., 2017; LIVRAMENTO et al.,

2017; MARTÍN; PABLOS; GONZÁLEZ, 1998; OLIVEIRA et al., 2019). A quantificação de cada composto dependerá da etapa de processamento, desde o fruto até o café torrado, já que alguns deles são precursores na formação de outros compostos e algumas análises são de maior interesse no café após a torra.

Tabela 2.2 - Propriedades físicas e térmicas do café arábica maduro

Propriedade	Café cereja	Café despulpado
Formato ^a	Elipsoide	Semielipsoide
Comprimento ^b [mm]	15,65	11,95
Largura ^b [mm]	13,90	8,45
Espessura ^b [mm]	-	4,90
Densidade aparente ^b [kg/m ³]	921	400 a 480
Densidade verdadeira ^{a,b} [kg/m ³]	757 a 1216	750 a 1086
Porosidade ^b	-	0,47 a 0,54
Condutividade térmica ^b [W/(m.K)]	-	0,10 a 0,20
Difusividade térmica ^b [m ² /s]	-	1,69 a 2,36 × 10 ⁻⁷
Calor específico ^b [kJ/(kg.K)]	-	1,04 a 2,36
Esfericidade ^{a,b}	0,82 a 0,87	0,67 a 0,69

Fonte: ^aAfonso Júnior et al. (2007); ^bChandrasekar e Viswanathan (1999).

A partir do processamento, por via seca ou despulpada, o café passa então para a etapa de secagem. Considerando as diversas etapas da pós-colheita, a secagem é uma das etapas de maior relevância, tanto em relação ao consumo de energia e formação dos custos de processamento quanto do ponto de vista da preservação da qualidade (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; LIVRAMENTO et al., 2017).

Independentemente do método de secagem utilizado, ter uma etapa de pré-secagem ou realizar uma secagem com técnicas diferentes combinadas pode aumentar o desempenho do processo de desidratação do café, já que o fruto maduro possui uma umidade inicial que varia de moderada a alta (LIVRAMENTO et al., 2017).

A escolha da técnica de secagem utilizada depende de fatores econômicos e/ou do tipo de processamento empregado, o que influencia nas propriedades físico-químicas do grão de café cru e na qualidade da bebida. A secagem artificial do café pode ser realizada por meio de secagem em terreiro ou por meio de secagem mecânica (com secadores), sendo a secagem mecânica mais utilizada para café despulpado (DE MELO PEREIRA et al., 2019).

A secagem em terreiro é comumente usada, pois tende a produzir cafés torrados com propriedades sensoriais superiores à secagem mecânica, uma vez que a secagem em terreiro

permite maior metabolismo (via germinação) e formação de importantes precursores de aroma, além de ser um processo com temperaturas mais baixas. Contudo, possui desvantagens, como tempo de secagem prolongado, alto custo de mão de obra e a necessidade de uma grande área para secagem, além do alto risco de deterioração (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; KULAPICHITR et al., 2019; LIVRAMENTO et al., 2017).

Por sua vez, quando se opta pela secagem mecânica do café, a temperatura do ar de secagem normalmente deve estar entre 45 e 50 °C, não devendo ultrapassar 60 °C em processos de secagem prolongados. A temperatura do café pode ser elevada até 45 °C para os cafés commodity e 40 °C para os cafés especiais (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; MUJUMDAR, 2006).

Em uma secagem em duas etapas (HII; BORÉM, 2019), o café despulpado é pré-secado em terreiro, podendo chegar a 18 % b.u. de umidade. Após atingir esta condição de meia-seca (18 a 35 % b.u.), o café é colocado em um secador com um teor de umidade uniforme. A secagem é conduzida até que o café atinja 12,5 a 13 % b.u. de umidade e, então, o café é descarregado enquanto ainda está quente e passa por um período de têmpera até atingir 11 % b.u. de umidade final, antes da transferência para o armazenamento.

Alguns estudos compararam o impacto das diferentes técnicas de secagem na qualidade do café. A secagem mecânica em leito fixo (a 60 °C), comparada à secagem em terreiro, diminuiu o teor de proteínas, tanto pelo processamento via seca quanto pela via úmida, o que pode interferir negativamente na qualidade da bebida (LIVRAMENTO et al., 2017). Este efeito pode ser resultado da alta temperatura do ar aplicada na secagem do café por um longo período, mostrando uma deficiência da secagem mecânica que pode ser solucionada. Durante a secagem mecânica do café, a temperatura do ar de secagem comumente está entre 45 e 50 °C (HII; BORÉM, 2019; MUJUMDAR, 2006).

Kulapichitr et al. (2019) secaram café processado pela via úmida em bomba de calor (40 a 50 °C, de 11 a 23 h), em secador de bandeja (50 °C, por 18 h) e pela secagem em terreiro (20-30 °C, por 3 dias). Os autores verificaram que o teor de sacarose, que é importante nas reações de escurecimento não enzimático e formação de aromas do café, foi maior na secagem mecânica (secador de bandeja e bomba de calor) do que na secagem em terreiro. Além disso, os cafés secos pela bomba de calor, por 11 h a 50 °C, foram os únicos que não diferiram dos cafés da secagem em terreiro em relação à percepção de aroma, mesmo em uma temperatura mais alta de secagem, devido ao menor tempo do processo de desidratação do café. Este resultado também evidencia a importância da redução do tempo de secagem do café nos

processos com altas temperaturas e estimula a busca por uma secagem de café mais rápida sem que haja perda da qualidade do produto.

Um outro estudo (DONG et al., 2017) investigou o efeito de diferentes técnicas de secagem sobre componentes bioativos, composição de ácidos graxos e o perfil de compostos voláteis de café robusta processados por via seca. Foram utilizadas a secagem em terreiro (20-30 °C, por 7 dias), secagem solar (por 5 dias), secagem por bomba de calor (50 °C, por 72 h), secagem pelo ar quente em estufa (50 °C, por 108 h) e liofilização (25 h). Os métodos de secagem pelo ar quente e pela bomba de calor resultaram em uma alteração significativa no perfil de compostos voláteis do café seco, provavelmente devido à exposição do material às altas temperaturas por tempos prolongados. A liofilização foi um bom método de secagem para preservação de lipídeos, ácidos orgânicos e ácidos graxos monoinsaturados. O método com ar quente foi ideal para reter ácidos graxos poli-insaturados e aminoácidos, enquanto a bomba de calor produziu o maior número de voláteis, bem como o maior teor de ácidos graxos saturados e maior proporção de ácidos graxos insaturados por ácidos graxos saturados. Os resultados demonstraram que os métodos convencionais de secagem (em terreiro) podem ser efetivamente substituídos pelos métodos com ar quente e com bomba de calor. Porém, ainda é necessário otimizar o tempo e o desempenho da secagem sem afetar tão agressivamente a qualidade do grão de café cru.

O secador roto-aerado, devido ao seu excelente desempenho de secagem, principalmente por possuir tempo de residência reduzido e alta taxa de secagem em relação a outros secadores convencionais (ARRUDA et al., 2009; SILVA; DUARTE; BARROZO, 2016; SOUZA et al., 2021), pode ser uma alternativa viável para a secagem de café. Este secador tem potencial de acelerar a secagem, não necessitando expor o material a condições de alta temperatura por tempos muito longos. Ou seja, o secador promoveria uma redução do tempo de secagem, o que poderia diminuir os efeitos do processo na qualidade do café frente a outros métodos de secagem já utilizados. Outro fator relevante é que o café possui propriedades físicas adequadas para a aplicação do secador roto-aerado, como material granular, teor de umidade moderado e alta esfericidade.

2.3 Secador roto-aerado

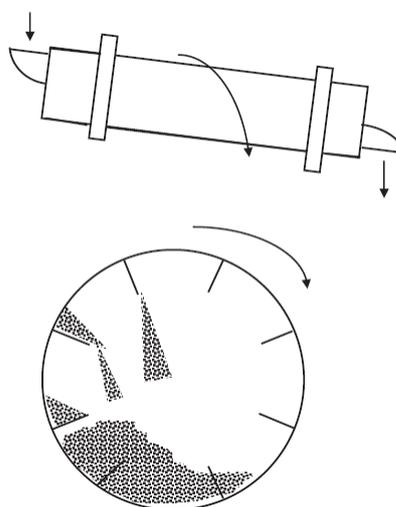
O secador roto-aerado possui uma configuração adaptada que é constituída por um cilindro rotatório, semelhante ao secador rotatório convencional, com o acréscimo de um sistema de fluidização interno. Sua concepção não convencional, além de superar algumas

limitações operacionais, tem como motivação o melhor contato fluido-partícula, proporcionado pelo sistema de fluidização, esperando-se, desta forma, aumentar os coeficientes de transferência de calor e massa e, como consequência, possibilitar a redução do consumo energético (ARRUDA, 2008; ARRUDA et al., 2009).

Este secador também permite a operação com uma menor vazão de ar, possibilitando a sua aplicação na secagem de partículas mais finas que as usualmente utilizadas no secador rotatório convencional, as quais poderiam ser arrastadas (LISBOA, 2005).

Antes de detalhar a estrutura do secador roto-aerado, descreve-se o comportamento do secador rotatório com cascadeamento (secador convencional) para efeito de comparação. O secador convencional (Figura 2.3) é constituído de um tambor cilíndrico, com uma inclinação em relação à horizontal de até 5°, e gira em torno do seu próprio eixo longitudinal. Alguns suspensores (*flights*) são acoplados internamente ao tambor, os quais promovem o cascadeamento do sólido, aumentando o contato entre o sólido e o ar de secagem. A razão entre o comprimento e o diâmetro neste equipamento pode variar de quatro a dez, enquanto que o diâmetro pode medir desde 0,2 m até 3 m (PERRY; GREEN; MALONEY, 1997).

Figura 2.3 - Esquema generalizado do secador rotatório



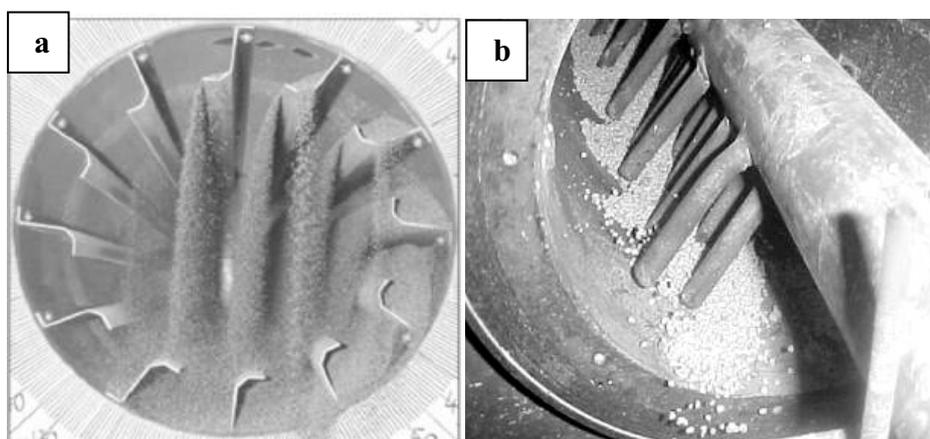
Fonte: Berk (2018).

O material granular úmido é alimentado em uma extremidade do tambor, onde é coletado pelos suspensores. O ar de secagem é aquecido e direcionado em concorrente ou contracorrente. Os suspensores carregam os sólidos até a metade superior do tambor, de onde são descarregados, e formam uma “cortina” de sólidos na seção transversal do tambor (LISBOA, 2005).

Estas partículas caem, devido à ação da gravidade, e entram em contato com o gás de secagem e chegam novamente ao fundo do tambor, onde são novamente carregadas pelos suspensores. A queda dos sólidos em cascata, a partir dos suspensores, e a inclinação em relação à horizontal contribuem para o transporte das partículas na direção axial do secador (NASCIMENTO, 2018).

A diferença do equipamento não convencional está na alimentação de ar, que é feita por um duto central, onde o ar é distribuído, a partir deste duto, em diversos minitubos que estão em contato direto com o sólido. Além disso, o material permanece no fundo do tambor, já que o secador não possui suspensores. As configurações podem ser comparadas na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Visão interna do (a) secador rotatório convencional e (b) secador roto-aerado



Fonte: Lisboa (2005).

2.3.1 Histórico do secador roto-aerado

O secador roto-aerado é um equipamento que foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQ/UFU). Neste equipamento, o contato gás-partículas ocorre durante todo o tempo de residência do material dentro do secador, diferente do secador rotatório convencional, em que neste o contato ocorre, principalmente, durante o tempo que as partículas estão cascadeando (LISBOA, 2005).

Lisboa (2005), Arruda et al. (2009) e Silvério et al. (2015) compararam o desempenho dos secadores rotatórios em configurações convencional e roto-aerado na secagem do fertilizante superfosfato, o qual possuía umidades inicial e final de 15 % e 3 %, respectivamente.

Nas condições avaliadas, foi observado que o coeficiente global de transferência de calor para roto-aerado foi em torno de 50 % maior do que aquele relativo ao secador

convencional e a taxa de secagem também foi 3,6 vezes superior na nova configuração do que na configuração com suspensores (LISBOA, 2005), evidenciando maiores taxas de transferência de calor e de massa para a secagem no roto-aerado.

Nos estudos seguintes, foi visto que o tempo médio de residência do material no secador roto-aerado era até 48 % menor que no convencional (com suspensores). Além disso, foi evidenciado que as versões híbridas do roto-aerado (com minitubos de diferentes diâmetros) proporcionaram carregamentos distintos em cada etapa, onde a redução no diâmetro favoreceu o processo, apresentando maiores valores para taxa de secagem e menores tempos de residência (ARRUDA et al., 2009).

Silvério et al. (2015) relataram que, neste novo secador, foram encontradas taxas de secagem 18 vezes superiores às taxas do secador convencional nas mesmas condições operacionais. Outro aspecto relatado foi que a diferença da temperatura dos sólidos (fertilizante), na entrada e saída do secador, foi até 5 vezes maior no secador roto-aerado do que no secador com suspensores.

Em vista do aumento no desempenho durante as secagens de fertilizante no secador roto-aerado, em comparação com o secador rotatório convencional, outros materiais foram desidratados no novo secador de forma alternativa, incluindo materiais alimentícios.

Silva, Duarte e Barrozo (2016) realizaram secagens de resíduo de acerola no secador roto-aerado e observaram a remoção de até 45,8 % da umidade do material. A remoção foi maior nas condições de maiores velocidade e temperatura do ar de secagem. Neste estudo, os autores realizaram o pré-tratamento do material com imersão ou pulverização de etanol e relataram que foi possível aumentar a remoção da umidade em até 80 % quando as sementes foram imersas em etanol e secas a 80 °C e 1,5 m/s (condições mais baixas de temperatura e velocidade do ar do estudo). Entretanto, quando se utilizou o pré-tratamento com etanol nas condições com elevadas temperatura e velocidade do ar de secagem (150 °C e 3,0 m/s) a remoção foi apenas 15,1 % superior.

Silva (2014) fez a recirculação do resíduo de acerola no secador roto-aerado. Foram necessários 3, 4 e 5 estágios para reduzir a umidade do material a 6,7 % (em 150 °C e 3,0 m/s), a 10,7 % (em 115 °C e 2,25 m/s) e 17,2 % (na condição de 80 °C e 1,5 m/s), respectivamente. Em relação à qualidade do material, os teores dos compostos bioativos analisados, em sua maioria, foram superiores nos resíduos de acerola após a secagem.

Silva et al. (2021) estudaram a secagem híbrida por meio de uma pré-secagem com infravermelho dos resíduos de acerola antes de passarem pelo secador roto-aerado. A combinação se mostrou uma excelente alternativa para a secagem do resíduo do processamento

de acerola, com o tempo total variando de 12 a 16 min, tornando possível desidratar o resíduo em um tempo de secagem reduzido, preservando sua qualidade e permitindo que a secagem ocorra em um único estágio. A redução da umidade na pré-secagem com infravermelho chegou até a 24,3 % em 9 min de exposição (a 1188,3 W) e no roto-aerado a remoção de umidade foi de até 59,1 % em 7 min (temperatura do ar de 180 °C).

Por fim, foi analisada a utilização do secador roto-aerado na secagem de sementes de soja (SOUZA et al., 2021). As taxas de secagem obtidas no roto-aerado de 0,030 a 0,095 pontos percentuais por minuto (g água/(100 g sólido seco.min)) foram muito superiores àquelas obtidas para as sementes de soja em outros secadores. As sementes com baixa qualidade fisiológica foram obtidas quando a temperatura do ar de secagem foi mais elevada (62 e 65 °C), o que também acarretou altas taxas de secagem e altas temperaturas das sementes. O tempo médio de residência do material no secador roto-aerado variou de 21 a 23,7 min, o qual é muito mais curto quando comparado a outras técnicas já utilizadas para a secagem de sementes de soja. O modelo a duas fases previu, com sucesso, o teor de umidade e a temperatura da semente durante a secagem, em que resultados simulados estiveram em bom acordo com os dados experimentais.

2.3.2 Desidratação em secadores rotatórios

O roto-aerado é um secador rotatório e conhecer as peculiaridades deste tipo de secador é determinante para a escolha do material a ser desidratado. Para Perry, Green e Maloney, (1997), o equipamento rotatório é aplicável ao processamento, em batelada ou contínuo, de sólidos que são relativamente de escoamento livre e apresentam a forma granular quando descarregados do secador. Estes materiais são provenientes principalmente da indústria química e mineral, como, por exemplo, fertilizantes e produtos da mineração. Porém, como visto nas aplicações anteriores do roto-aerado, este tipo de secador também pode ser utilizado na secagem de alimentos.

Berk (2018) faz a classificação dos tipos de secadores empregados na indústria de alimentos. Para secadores rotatórios, o autor caracteriza sua operação como principalmente contínua e o sólido a ser desidratado está em movimento durante a secagem. Além disso, no secador, a troca de calor ocorre de forma direta, sendo a convecção o principal mecanismo de transferência de energia. Alguns exemplos de materiais alternativos que podem ser desidratados em secadores rotatórios, citados pelo autor, são os resíduos do processamento de frutas e vegetais, grãos e componentes de rações animais. Estes secadores também podem funcionar

como torradores para nozes, sementes de gergelim e grãos de cacau, usando o ar em temperaturas muito elevadas.

Fellows (2018) também descreveu as características dos secadores aplicados em materiais alimentícios quanto às condições do material e da secagem. Se tratando do secador rotatório, os alimentos devem apresentar umidade inicial moderada. Ainda, este tipo de secador geralmente possui taxa de secagem moderada a alta e é indicado para sementes de cacau, nozes, bagaço e cereais cozidos. Um outro ponto que o autor destaca é que a secagem pode provocar alterações indesejáveis.

As principais alterações nos alimentos desidratados são na textura e perdas no sabor e aroma, mas mudanças na cor e no valor nutricional também podem ser significativas para alguns alimentos. O objetivo de melhorar as tecnologias de secagem é minimizar essas mudanças e maximizar a eficiência do processo.

Delele, Weigler e Mellmann (2015) discutiram os avanços na aplicação de secadores rotatórios para secagem de produtos agrícolas. Para os autores, como benefícios, este tipo de secador é adequado para produtos com diversos formatos e tamanhos, possui alta uniformidade de secagem e é altamente flexível, além de possibilitar uma alta taxa de produção. Como desafio, o secador rotatório convencional não pode ser usado para materiais altamente frágeis. Dentre os produtos potenciais estão a biomassa, ração animal, subprodutos, bagaços, resíduos, grãos, ervas e legumes.

Contudo, o roto-aerado possui uma aplicação mais restrita quanto ao formato e tamanho do material, devido à ausência dos suspensores, os quais facilitam o transporte de material não esférico e/ou de difícil escoamento, e por sua particularidade de possuir minitubos de distribuição do ar de secagem muito próximos ao material, o que aumenta a eficiência da secagem, mas se torna um obstáculo para passagem de materiais grandes e diminui a capacidade do secador. Por outro lado, por não haver o cascadeamento do material, o roto-aerado oferece menores danos à estrutura dos materiais.

Embora o secador rotatório use muita energia (Tabela 2.3), ele pode ser eficiente em condições operacionais adequadas para atingir taxas de evaporação mais altas e pode operar com partículas um pouco maiores que as utilizadas em outros secadores. Isso é interessante porque, por exemplo, pode retirar do processo uma etapa de moagem para reduzir o tamanho das partículas antes da secagem, o que diminui o consumo de energia. Além disso, os secadores rotatórios são o carro-chefe da indústria de secagem por causa de sua grande capacidade, eficiência e versatilidade para se adaptar a vários casos de uso (MUJUMDAR, 2006).

Tabela 2.3 - Características gerais de secadores rotatórios

Característica	Secador rotatório
Tempo de residência [min]	Até 60
Temperatura de entrada do ar de secagem [°C]	Até 600
Capacidade de evaporação [kg de H ₂ O/h·m ³]	30–80
Tamanho da partícula	Faixa variada
Consumo de energia [kJ/kg de H ₂ O evaporada]	4.600–9.200

Fonte: Mujumdar (2006).

As características do material determinam o método de alimentação do secador rotatório, que pode ser feito por uma calha, que se estende para dentro do tambor cilíndrico, ou por uma rosca alimentadora, para fins de vedação ou para o caso da alimentação por gravidade não for conveniente. A taxa de alimentação deve ser controlada e uniforme em qualidade e quantidade. Na extremidade de saída do secador, os ciclones são instalados situacionalmente para a remoção de pó arrastado no fluxo de gás de saída (MUJUMDAR, 2006).

2.4 Modelagem matemática do processo de secagem no secador roto-aerado

A descrição das distribuições de umidade e temperatura do material, ao longo do comprimento do secador roto-aerado, já foi desenvolvida via modelo a duas fases em trabalhos anteriores realizados pelo Grupo de Pesquisa em Sistemas Particulados da FEQ/UFU (ARRUDA, 2008; SOUZA et al., 2021). Esse modelo é baseado nas características fluidodinâmicas do equipamento e do material.

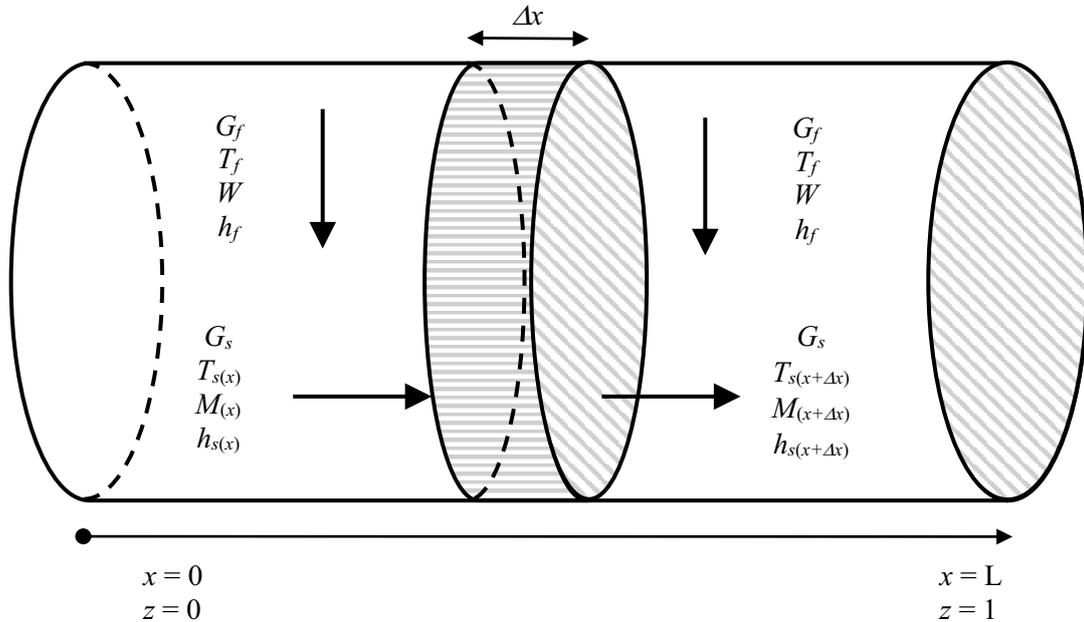
A Figura 2.5 mostra o esquema do elemento infinitesimal de volume de um secador rotatório operando em fluxo cruzado, sobre o qual foram realizados os balanços de massa e energia que deram origem a um sistema de equações diferenciais. Tais equações devem ser resolvidas simultaneamente para as variáveis envolvidas no processo de secagem de materiais particulados (no caso, secagem de café despulpado) no roto-aerado.

Na formulação deste modelo, foram feitas as seguintes considerações:

- i. A forma e as propriedades físicas do grão não se alteram durante a secagem;
- ii. As condições de entrada de vazão de alimentação, umidade e temperatura do sólido no secador são conhecidas e constantes;
- iii. A velocidade da partícula através do tambor é constante;

- iv. A temperatura e a umidade do ar são conhecidas e constantes na condição de entrada.

Figura 2.5 - Esquema do elemento infinitesimal de volume do secador rotatório operando com fluxo cruzado



Fonte: Adaptado de Arruda (2008).

Para o desenvolvimento da modelagem foi necessário estabelecer um conjunto de definições, em que todas as propriedades, apresentadas a seguir, estão em base mássica.

- Velocidade de escoamento dos sólidos no tambor na direção x (v_s):

$$v_s = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = \frac{L}{\tau} \quad (2.1)$$

Sendo L o comprimento do secador e τ o tempo médio de residência do material.

- Taxa de secagem (R_w):

$$R_w = -\frac{\Delta M}{\Delta t} = -\frac{dM}{dt} = -\frac{(M - M_0)}{t} = -\frac{(MR - 1)(M_0 - M_{eq})}{t} \quad (2.2)$$

Sendo M a massa de água pela massa de matéria seca do café (unidade em b.u.) em um tempo qualquer t , M_0 a umidade inicial, M_{eq} a umidade de equilíbrio e MR o adimensional de umidade da cinética de secagem:

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (2.3)$$

- Adimensional de comprimento (z):

$$z = \frac{x}{L} \quad (2.4)$$

Sendo x uma posição qualquer ao longo do comprimento (L) secador.

- Carga total de sólidos no secador (*holdup*, H^*):

$$H^* = \tau G_s \quad (2.5)$$

Sendo G_s a vazão mássica de sólidos.

- Entalpia do ar úmido (h_f):

$$h_f = C_{pf} T_f + W(\lambda + C_{pv} T_f) \quad (2.6)$$

Sendo C_{pf} o calor específico do ar, T_f a temperatura do ar, W a umidade específica do ar, λ o calor latente de vaporização da água e C_{pv} o calor específico do vapor de água.

- Entalpia do sólido úmido (h_s):

$$h_s = C_{ps} T_s + M C_{pl} T_s \quad (2.7)$$

Sendo que C_{ps} é o calor específico do sólido, T_s é a temperatura do sólido e C_{pl} é o calor específico da água líquida.

2.4.1 Balanço de massa

Para o fluido, é considerado que, no eixo x , não há variação de sua umidade.

O balanço global de massa para a água no elemento de volume do secador, considerando a troca entre o sólido úmido e o ar de secagem, pode ser descrito como:

Da Equação (2.1), têm-se:

$$\frac{dM}{dx} = \frac{dM}{dt} \frac{dt}{dx} = -R_w \frac{\tau}{L} \quad (2.8)$$

Já a variação da quantidade de água no sólido pode ser descrita por:

$$G_s M_{(x)} = G_s M_{(x+\Delta x)} + R_w G_s \Delta t \quad (2.9)$$

$$G_s [M_{(x+\Delta x)} - M_{(x)}] = -R_w G_s \Delta t \quad (2.10)$$

Dividindo os dois lados da expressão por Δx e aplicando $\lim_{\Delta x \rightarrow 0}$:

$$\frac{dM}{dx} = -R_w \frac{dt}{dx} = -R_w \frac{\tau}{L} \quad (2.11)$$

Substituindo as Equações (2.4) e (2.5) em (2.11), obtêm-se a expressão final do balanço de massa que avalia a variação da umidade do sólido ao longo do secador:

$$\frac{dM}{dz} = -\frac{R_w H^*}{G_s} \quad (2.12)$$

2.4.2 Balanço de energia

Para o fluido, é considerado que, no eixo x , não há variação de sua temperatura.

O balanço de energia para a fase sólida considera que o aquecimento do sólido se deve ao calor recebido do ar, descontando o calor necessário para vaporizar a água presente no sólido e aquecê-la até a temperatura do gás.

$$G_s h_{s(x+\Delta x)} = G_s h_{s(x)} + U_{va} A \Delta x (T_f - T_s) - G_s [M_{(x)} - M_{(x+\Delta x)}] [\lambda + C_{p_v} (T_f - T_s)] \quad (2.13)$$

Ao multiplicar o terceiro termo do lado direito da Equação (2.13) por $\Delta t/\Delta t$, obtêm-se a expressão da taxa de secagem, descrita pela Equação (2.2):

$$G_s h_{s(x+\Delta x)} = G_s h_{s(x)} + U_{va} A \Delta x (T_f - T_s) - G_s R_w [\lambda + C_{p_v} (T_f - T_s)] \Delta t \quad (2.14)$$

Substituindo a Equação (2.1) em (2.14) e rearranjando os termos, têm-se:

$$G_s [h_{s(x+\Delta x)} - h_{s(x)}] = U_{va} A \Delta x (T_f - T_s) - G_s R_w [\lambda + C_{p_v} (T_f - T_s)] \frac{\tau \Delta x}{L} \quad (2.15)$$

Dividindo os dois lados da expressão por Δx e aplicando $\lim_{\Delta x \rightarrow 0}$:

$$G_s \frac{dh_s}{dx} = U_{va}A(T_f - T_s) - G_s R_w [\lambda + C_{pv}(T_f - T_s)] \frac{\tau}{L} \quad (2.16)$$

Substituindo a Equação (2.5) em (2.16):

$$G_s \frac{dh_s}{dx} = U_{va}A(T_f - T_s) - \frac{R_w H^*}{L} [\lambda + C_{pv}(T_f - T_s)] \quad (2.17)$$

A variação de entalpia do sólido ao longo do secador roto-aerado é obtida derivando a Equação (2.7) em relação ao comprimento do secador:

$$\frac{dh_s}{dx} = (C_{ps} + C_{pl}M) \frac{dT_s}{dx} + C_{pl}T_s \frac{dM}{dx} \quad (2.18)$$

Substituindo a Equação (2.18) em (2.17), obtêm-se:

$$G_s \left[(C_{ps} + C_{pl}M) \frac{dT_s}{dx} + C_{pl}T_s \frac{dM}{dx} \right] = U_{va}A(T_f - T_s) - \frac{R_w H^*}{L} [\lambda + C_{pv}(T_f - T_s)] \quad (2.19)$$

Substituindo as Equações (2.4) e (2.12) em (2.19), têm-se:

$$G_s (C_{ps} + C_{pl}M) \frac{dT_s}{dz} = U_{va}V(T_f - T_s) + R_w H^* C_{pl}T_s - R_w H^* [\lambda + C_{pv}(T_f - T_s)] \quad (2.20)$$

Explicitando a Equação (2.20), obtêm-se a equação final do balanço de energia para a variação da temperatura do sólido em função do comprimento adimensional do secador:

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{U_{va}V(T_f - T_s) + R_w H^* C_{pl}T_s - R_w H^* [\lambda + C_{pv}(T_f - T_s)]}{G_s (C_{ps} + C_{pl}M)} \quad (2.21)$$

2.4.3 Modelo

Dessa forma, o modelo para determinação dos perfis de umidade e temperatura do sólido no interior do secador roto-aerado, operando com sentido de fluxo cruzado, pode ser descrito pelo sistema de equações diferenciais ordinárias representado pelas Equações (2.12) e (2.21).

As variáveis desse modelo são: $T_s(z)$ e $M(z)$. No caso do secador roto-aerado, operando com sentido de escoamento cruzado entre o material e o ar, o sistema de equações diferenciais obtido deve ser resolvido simultaneamente para as duas variáveis envolvidas, levando-se em consideração as seguintes condições de contorno: $T_s(z = 0) = T_{s_0}$ e $M(z = 0) = M_0$.

Para a solução do modelo, pode ser utilizada a técnica de colocação normal com 10 pontos de colocação para a aproximação polinomial de quarta ordem. Esse número de pontos foi empregado mediante testes que mostraram que valores acima deste não traziam melhorias na precisão dos resultados obtidos com o modelo (ARRUDA, 2008). Em trabalhos anteriores (ARRUDA, 2008; SOUZA et al., 2021), para resolução das equações diferenciais foi utilizada a tolerância relativa da ordem de 10^{-6} e foi empregada a sub-rotina ‘BVP4C’ do software Matlab® 7.1.

2.4.4 Equações constitutivas

O modelo proposto necessita de equações auxiliares que aparecem de forma implícita, também conhecidas como equações constitutivas. São necessárias as equações constitutivas para a umidade de equilíbrio do café despulpado, para a cinética de secagem desse material e para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor. Estas correlações são apresentadas a seguir.

A equação para a umidade de equilíbrio de café despulpado foi determinada por Afonso Júnior (2001), por meio da Equação (2.22):

$$M_{eq} = (2,96 + 0,053T_s - 10,78UR^{4,51})^{-1,65} \quad (2.22)$$

Sendo UR a umidade relativa decimal do ar.

A umidade de equilíbrio para café despulpado também foi determinada pelo modelo de GAB por Goneli et al. (2013):

$$M_{eq} = \frac{0,0254 \exp\left(\frac{930,263}{T_s}\right) UR}{\left[1 - 1,414 \exp\left(\frac{-186,321}{T_s}\right) UR\right] \left[1 - 1,414 \exp\left(\frac{-186,321}{T_s}\right) UR + 4,543 \exp\left(\frac{167,215}{T_s}\right) UR\right]} \quad (2.23)$$

Sendo T_s em K.

Afonso Júnior (2001) também determinou a correlação para o adimensional de umidade em camada delgada, para o café despulpado, pelo modelo de Page:

$$MR = \exp(-Kt^n) \quad (2.24)$$

Sendo:

$$K = -0,12 + 4,2 \times 10^{-3}T_f + 3,38 \times 10^{-5}T_f^2 + 0,31UR - 0,13UR^2 - 8,23 \times 10^{-3}T_fUR \quad (2.25)$$

$$n = 1,47 - 2,1 \times 10^{-2}T_f + 3,34 \times 10^{-4}T_f^2 - 0,44UR + 0,67UR^2 - 2,26 \times 10^{-3}T_fUR \quad (2.26)$$

A melhor correlação para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}) foi determinada para o secador roto-aerado por Arruda (2008):

$$U_{va} = 29,765G_f^{-0,129}G_s^{0,968} \quad (2.27)$$

Sendo G_s e G_f as vazões mássicas do sólido seco e do ar seco, respectivamente.

2.5 Composição e técnicas de medição dos compostos do café

Os principais compostos ativos do aroma nas bebidas de café, como furanos, pirazinas e pirróis, não são encontrados no fruto ou no grão cru. Assim, a qualidade do grão de café antes da torra é determinada pelos principais constituintes não voláteis presentes na matéria-prima, como açúcares, aminoácidos e lipídeos. Esses precursores de aroma ainda sofrerão modificações nas etapas de processamento pós-colheita, devido ao processo de germinação das sementes e oxidação lipídica (DE MELO PEREIRA et al., 2019).

Os principais compostos do café cru e suas quantidades são apresentados na Tabela 2.4. Antes de abordar as técnicas de detecção e medição de compostos do café, é importante conhecer os principais componentes do café e como eles variam com as etapas de processamento até a torra. Para tal, De Melo Pereira et al. (2019) levantaram, em sua revisão, os impactos do processamento pós-colheita na formação do aroma dos grãos de café, os quais serão apresentados a seguir (Figura 2.6).

Primeiramente, quando maduros, os frutos do café apresentam menores concentrações de compostos fenólicos, o que implica em uma redução da adstringência. Além disso, os cafés cereja apresentam um maior teor de compostos voláteis (aldeídos, cetonas e álcoois superiores) em comparação com os frutos imaturos (WINTGENS, 2009). Assim, a colheita do café deve

ser iniciada quando os frutos da planta atingem um estágio homogêneo de maturação com prevalência mínima de frutos imaturos (BEE et al., 2005).

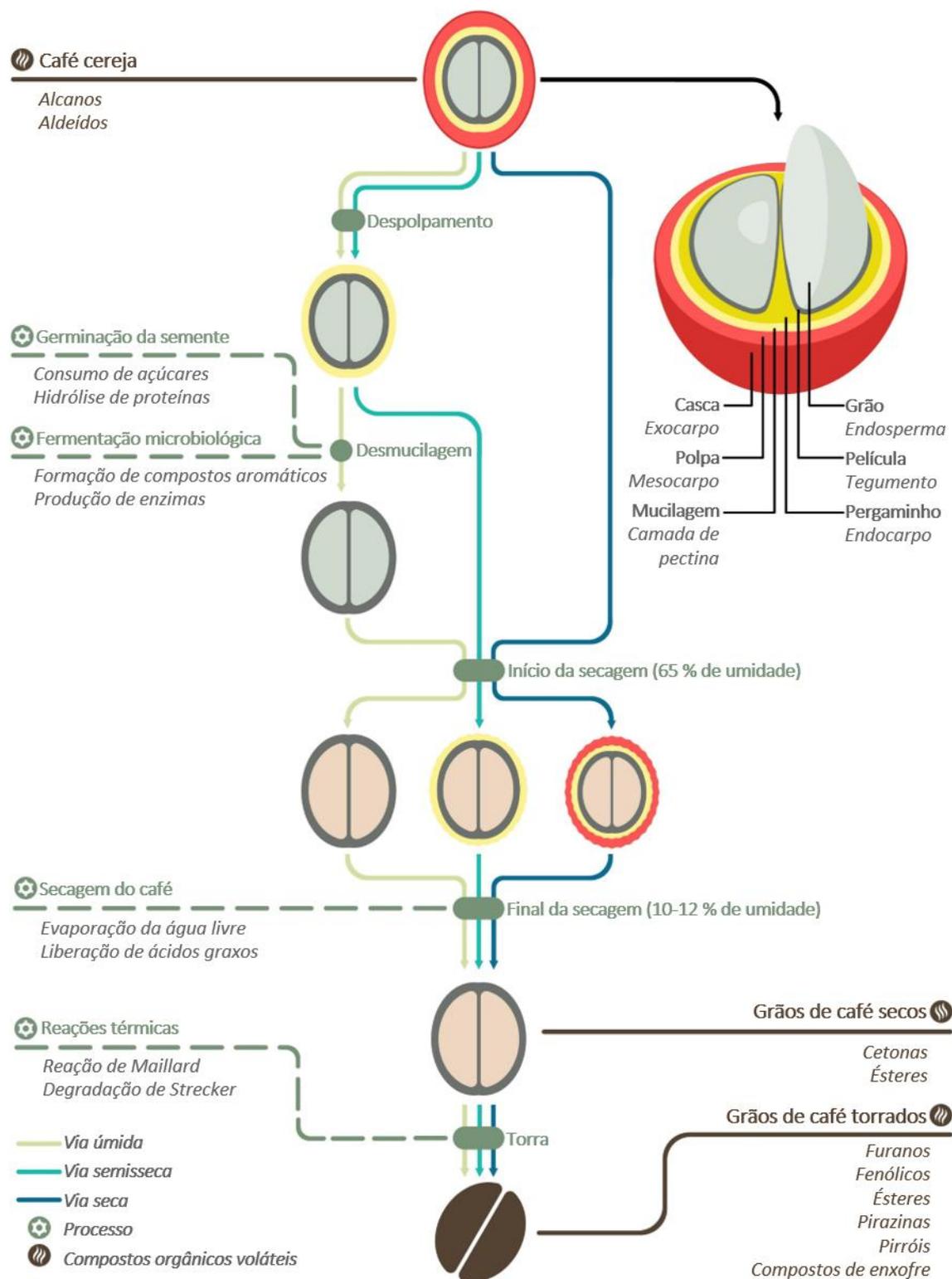
Tabela 2.4 - Composição do café arábica cru (em base seca)

Classe	Tipo	Composição (%)	Componentes
Carboidratos	Açúcares	5,3–9,3	Sacarose (9 %), rafinose (0-0,9 %), estaquiase (0-0,13 %), frutose, glicose, galactose e arabinose (traços)
	Polissacarídeos	46–59	Solúveis: manana (22 %) e arabinogalactana (14–17 %) Insolúveis: celulose (7 %), hemicelulose (3-10 %), lignina (1–3 %) e pectina (2 %)
Lipídeos	Óleo do café	14,8–17,7	Triacilgliceróis (75 %), ácidos graxos livres (0,5-1,9 %), diterpenos livres e esterificados (0,4 % e 18,5 %, respectivamente), esteróis livres e esterificados (2 % e 3 %, respectivamente), e tocoferóis (0,04-0,06 %)
	Cera do café	0,2–0,3	Derivados da triptamina (0,6-1 %): homólogos de ácido carboxílico-5-hidroxitriptamidas (C-5HT) ligados a ácidos araquidônico, beênico e lignocérico
Minerais		3–4,2	Até 30 minerais. Potássio (40 %), magnésio e fósforo (≈ 4%)
Compostos nitrogenados	Proteínas	10–12,4	Globulinas (85 %) e albuminas (15 %)
	Aminoácidos	0,4–2,4	Até 29 aminoácidos. Ácido glutâmico (0,13 %); alanina, asparagina, ácido gama-aminobutírico e ácido aspártico (0,05 %); prolina e serina (0,03%)
	Cafeína	0,6–1,5	Vestígios de teobromina e teofilina
	Trigonelina	0,6–1,2	
Fenólicos e outros ácidos	Ácidos clorogênicos	3,4–9,2	Até 82 ácidos clorogênicos. Principais: ácidos 3-, 4- e 5-cafeoilquínico (10, 10, > 50 %, respectivamente); ácidos dicafeoilquínicos (11-20 %); ácidos feruloilquínicos (5-13 %)
	Outros ácidos	2–2,9	Ácido cítrico (0,3-0,5 %), ácido málico (0,3-0,7 %), ácido quínico (0,3-0,6 %) e ácido acético (0,07%)

Fonte: Adaptado de Diaz-De-Cerio et al. (2019).

A composição química do fruto do café é muito complexa, incluindo mais de 1000 substâncias com diferentes propriedades químicas e físicas (BAGCHI; MORIYAMA; SWAROOP, 2016).

Figura 2.6 - Estrutura do fruto do café e representação esquemática dos métodos de processamento pós-colheita correlacionados com grandes mudanças bioquímicas que impactam na constituição volátil do café



Fonte: Adaptado de Bytof et al. (2005); De Melo Pereira et al. (2017, 2019); Lee et al. (2015); Selmar et al. (2006).

Os principais precursores do aroma são carboidratos insolúveis (celulose e hemicelulose), carboidratos solúveis (arabinose, frutose, galactose, glicose, sacarose, rafinose e estaquiase), lipídeos, ácidos clorogênicos e compostos nitrogenados (FADAI et al., 2017; POISSON et al., 2018).

Os carboidratos de baixo peso molecular, como sacarose, glicose e frutose, contribuem para a formação de ácidos e outros compostos voláteis durante a torra (CLARKE; VITZTHUM, 2008). Além disso, os polissacarídeos são constituintes importantes para a retenção de voláteis e, conseqüentemente, para a formação do sabor (BUFFO; CARDELLI-FREIRE, 2004).

A fração lipídica do café é composta principalmente de triacilgliceróis, esteróis, arabiol e tocoferóis. Esses compostos estão localizados principalmente no endosperma dos grãos de café e apenas uma pequena quantidade (a cera de café) está localizada na camada externa do grão (ESQUIVEL; JIMÉNEZ, 2012; SPEER; KÖLLING-SPEER, 2006).

Compostos nitrogenados, como alcalóides (por exemplo, cafeína e trigonelina) e proteínas, bem como ácidos alifáticos não voláteis (ácidos cítrico, málico e quínico) e ácidos voláteis (como os ácidos acético, butanóico, decanóico, fórmico, hexanóico, isovalérico e propanóico), também são encontrados em altas concentrações no fruto do café. Esses compostos se quebram durante o processo de torra e geram importantes metabólitos ativos de sabor, como piridinas e pirróis (POISSON et al., 2018; SUNARHARUM; WILLIAMS; SMYTH, 2014).

Outros compostos presentes em menor quantidade no fruto do café incluem fenólicos, tióis e minerais. Os tióis são compostos cruciais responsáveis pelas notas de cheiro distintas de “café” e “torrado”, influenciando a percepção sensorial do café (DULSAT-SERRA; QUINTANILLA-CASAS; VICHI, 2016).

Os compostos fenólicos mais importantes do café são os ácidos cafeoilquínicos, feruloilquínicos e dicafeoilquínicos. Esses componentes são conhecidos por terem atividade antioxidante e várias propriedades benéficas à saúde humana (OGAWA, 2015).

A composição mineral dos grãos de café cru está relacionada à constituição do solo e também a outros fatores ambientais, como altitude, umidade, temperatura e sombreamento durante a formação dos frutos do café. Em geral, o potássio aparece em grandes quantidades, seguido pelo fósforo, magnésio e cálcio (DE CARVALHO NETO et al., 2017).

O fruto do café tem apenas uma composição básica de voláteis quando comparados aos grãos torrados. Enquanto, em média, mais de 1000 compostos voláteis são detectados no café torrado, apenas 200 são encontrados nos frutos não processados (DE MELO PEREIRA et al., 2019). Lee e Shibamoto (2002) relataram que dos mais de 350 compostos heterocíclicos identificados no café torrado (componentes importantes para fornecer o sabor característico dos

grãos torrados), apenas a 2-metoxi-3-(2-metilpropil)-pirazina foi encontrada em amostras de café não processado. Assim, essa e outras moléculas odoríferas são formadas principalmente durante o processo de torra a partir de precursores não voláteis presentes nos frutos de café, como açúcares, lipídios, proteínas e aminoácidos livres, por meio de reações predominantes de Strecker e Maillard (LEE; SHIBAMOTO, 2002).

Os compostos voláteis dos frutos de café compreendem hidrocarbonetos, álcoois superiores, aldeídos, cetonas, ácidos, ésteres, lactonas, compostos de enxofre, furanos e fenóis. Entre estes, os aldeídos e alcanos são as classes químicas mais abundantes (DE MELO PEREIRA et al., 2019). Muitos voláteis do fruto são perdidos durante o processo de torra, especialmente aqueles de origem não térmica (ERÖZ POYRAZ et al., 2016; GONZALEZ-RIOS et al., 2007).

Em geral, cafés processados por via úmida são conhecidos por apresentarem maior acidez e aroma do que cafés processados por via seca (MAZZAFERA; PURCINO, 2004). Esse fato pode ser atribuído às diferentes atividades metabólicas do açúcar e dos aminoácidos livres no interior das sementes em cada processamento, além de que, pela via seca, o café sofre estresse hídrico durante a longa exposição de secagem (DE MELO PEREIRA et al., 2019).

Os açúcares e aminoácidos livres são importantes precursores do aroma na formação de muitos voláteis durante a torrefação, como furanos, dicetonas, pirazinas, pirrolinas, lactonas e ácidos fenólicos (BYTOF et al., 2005; KNOPP; BYTOF; SELMAR, 2006; SELMAR et al., 2006).

Durante o processo de secagem, os grãos de café permanecem viáveis com atividades metabólicas intensas (BYTOF et al., 2005; KNOPP; BYTOF; SELMAR, 2006). Isso inclui reações de interconversão de açúcares de baixo peso molecular (glicose, frutose e manose) e hidrólise de proteínas, resultando no acúmulo de uma ampla variedade de aminoácidos livres (JOËT et al., 2010; KNOPP; BYTOF; SELMAR, 2006; SELMAR et al., 2006).

A análise dos constituintes do café é geralmente realizada por via úmida, particularmente com cromatografia líquida de alta eficiência (DIAZ-DE-CERIO et al., 2019). O termo cromatografia é aplicado a diversos sistemas e técnicas. Contudo estes métodos apresentam em comum o uso de uma fase estacionária e de uma fase móvel. Os componentes de uma mistura são transportados através da fase estacionária pelo fluxo da fase móvel e as separações ocorrem com base nas diferenças de velocidade de migração entre os componentes da fase móvel (SKOOG; WEST; CROUCH, 2005).

A cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE ou HPLC) é o tipo mais versátil e mais amplamente empregado de cromatografia por eluição. Essa técnica é utilizada pelos

químicos para separar e determinar espécies em uma grande variedade de materiais orgânicos, inorgânicos e biológicos. Na cromatografia líquida, a fase móvel é um solvente líquido, o qual contém a amostra na forma de uma mistura de solutos.

O tipo de cromatografia líquida de alta eficiência é geralmente definido pelo mecanismo de separação ou pelo tipo de fase estacionária. Por exemplo, um octadecil (C18) ligado à sílica (ODS) é uma fase sólida muito comum. Os grupos funcionais ligados à fase sólida atraem os compostos hidrofóbicos presentes na amostra por meio de interações de van der Waals e os extraem da solução aquosa. (SKOOG; WEST; CROUCH, 2005).

Na cromatografia gasosa (CG ou GC), os componentes de uma amostra vaporizada são separados em consequência de sua partição entre uma fase móvel gasosa e uma fase estacionária líquida ou sólida contida dentro da coluna. Ao realizar-se uma separação por cromatografia gasosa, a amostra é vaporizada e injetada na cabeça da coluna cromatográfica. A eluição é feita por um fluxo de fase móvel gasosa inerte. Em contraste com muitos outros tipos de cromatografia, a fase móvel não interage com as moléculas do analito e sua única função é transportar o analito através da coluna (SKOOG; WEST; CROUCH, 2005).

A técnica de cromatografia é utilizada em quantificação de compostos fenólicos, açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, proteínas e outros compostos. A separação e quantificação de diversos tipos de amostras em análises demoram poucos minutos, com alta resolução, eficiência e sensibilidade (SKOOG; WEST; CROUCH, 2005).

Mais recentemente, CLAE acoplada à Espectrometria de Massas (MS) também permitiu a identificação e quantificação da sacarose (CAPORASO et al., 2018). CLAE acoplada com Detector de Arranjo de Diodos (DAD) tem sido aplicada para a análise simultânea de trigonelina, ácido nicotínico e cafeína em café e, em vista das pesquisas realizadas nos últimos 5 anos, o uso de cromatografia líquida de alta eficiência, acoplada a vários detectores, predomina na detecção de compostos. Enquanto a cromatografia gasosa (CG) tem sido utilizada para classificar os cafés de acordo com suas origens (DIAZ-DE-CERIO et al., 2019).

A seguir são apresentadas as principais metodologias para quantificação de componentes precursores do aroma do café e aspectos físico-químicos importantes.

2.5.1 Açúcares

Kulapichitr et al. (2019) fizeram a determinação dos açúcares totais em café pelo método de CLAE com detector de índice de refração (IR). A fase móvel consistia de acetonitrila e água desionizada (70:30 v/v) e a coluna continha fase estacionária de propil-amino silano (NH₂),

com tamanho da partícula de 5 µm e dimensões de 25 cm x 4,6 mm (comprimento x diâmetro interno). Os açúcares foram quantificados com base em calibrações de padrão externo (áreas de pico versus concentrações para padrões de frutose, glicose e sacarose).

2.5.2 Componentes lipídicos

O procedimento padrão descrito pela Association of Official Agricultural Chemists (AOAC) e pela German Society for Fat Science (DGF), para extração de óleo de café, sugere o uso do aparelho de Soxhlet com solventes orgânicos (por 16 e 4 h, respectivamente). Outros estudos tratam de diferentes períodos de extração de óleo e utilizam principalmente hexano, éter de petróleo e éter metil-terc-butilico (MTBE), visando um aumento no rendimento do óleo de café cru. Métodos de extração como prensa mecânica, agitador orbital e extração com CO₂ supercrítico também podem ser encontrados (TSUKUI et al., 2014).

Dong et al. (2017) fizeram a análise do conteúdo de gorduras totais de café usando o método de extração em Soxhlet. A gordura total foi extraída do pó de café seco usando éter de petróleo em um aparelho de Soxhlet. A extração foi realizada a 50 °C por 16 a 18 h, até o éter de petróleo ficar incolor.

A composição de ácidos graxos de café pode ser determinada por cromatografia gasosa (GC) após transmetilação com hidróxido de potássio metanólico 2 M (DONG et al., 2017). Os autores utilizaram a CG com uma coluna capilar de sílica com cianopropil (HP-88) (comprimento de 100 m x diâmetro interno (d.i.) de 0,25 mm e espessura do filme 0,20 µm) equipada com um detector de ionização de chama (FID) e um amostrador automático para a análise. O hélio foi usado como gás de arraste. Padrões de referência dos ácidos graxos foram analisados nas mesmas condições dos extratos de café para identificar os picos cromatográficos, comparando seus tempos de retenção.

A determinação de kahweol e cafestol dos grãos de café cru foi realizada por Barbosa et al. (2019) usando um espectrômetro de infravermelho próximo (NIR) equipado com detector de refletância difusa em uma região espectral de 400 a 2500 nm. As curvas analíticas para os respectivos compostos foram construídas no mesmo equipamento (SCHOLZ et al., 2014).

Scholz et al. (2014) também realizaram a determinação de kahweol e cafestol dos grãos de café cru por CLAE. A análise de CLAE foi conduzida usando uma coluna ODS-C18 de fase reversa (25 cm x 4,6 mm, 5 µm) equipada com um detector de arranjo de diodos (DAD). Para a eluição isocrática foi usada uma fase móvel de acetonitrila/água (55/45 v/v) e a detecção foi realizada em 220 e 290 nm para cafestol e kahweol, respectivamente. A identificação foi

baseada na comparação do tempo de retenção e co-eluição com os padrões autênticos e a quantificação foi realizada por padronização externa, que gerou curvas de calibração nas faixas de concentração mais adequadas. As curvas de calibração foram construídas para concentrações de cafestol e kahweol de 50-1000 mg/100 g de matéria seca.

2.5.3 Ácidos orgânicos e clorogênicos

A determinação de ácidos orgânicos (ácidos oxálico, tartárico, quínico, fórmico, málico, cítrico e succínico) em café foi realizada por Dong et al. (2017). A análise foi realizada utilizando um sistema de CLAE equipado com um detector de arranjo de diodos (DAD) em 210 nm. A fase móvel consistia de uma mistura de metanol e solução tampão de NaH_2PO_4 0,01 mol/L (pH ajustado com ácido o-fosfórico) e a coluna utilizada foi a de octadecil (C18), com tamanho da partícula de 5 μm e dimensões de 25 cm x 4,6 mm (comprimento x diâmetro interno). A quantificação dos ácidos orgânicos foi realizada por meio de uma curva padrão. O método foi uma adaptação do trabalho relatado por Niu et al. (2012), sendo que, neste último estudo com vinho de cerejas, a cromatografia líquida foi acoplada com um detector de absorvância (UV/Vis).

Duarte, Pereira e Farah (2010) analisaram os ácidos clorogênicos de café usando um sistema de gradiente em CLAE de fase reversa com um detector de absorvância (UV/Vis) operando em 325 nm. O gradiente foi performado usando uma solução de ácido cítrico 10 mM e metanol. A coluna utilizada foi a ODS-C18 (tamanho de partícula de 5 μm e comprimento por diâmetro interno de 250 x 4,6 mm) acoplada a uma coluna de guarda (tamanho de partícula de 5 μm e 1 cm de comprimento x 3 mm d.i.). A identidade dos ácidos clorogênicos foi confirmada por análises de CLAE-MS. Oliveira et al. (2019) analisou o perfil fenólico dos extratos de café (incluindo os ácidos clorogênicos) pelo método de CLAE acoplado com um detector de arranjo de diodos (DAD), que foi estabelecido de 210 a 360 nm, usando uma coluna C18 (5 μm , 25 cm x 4,6 mm). Foram utilizados padrões externos de ácido gálico, catequina, ácido clorogênico, ácido cafeico, vanilina, ácido ferúlico, ácido p-cumárico, ácido o-cumárico, ácido m-cumárico, resveratrol e ácido trans-cinâmico.

2.5.4 Compostos nitrogenados

O método mais comum para a determinação de nitrogênio orgânico é o método de Kjeldahl, que é baseado em uma titulação de neutralização. O procedimento é direto, não requer

equipamentos especiais e é facilmente adaptado para a rotina de análises de um grande número de amostras. Esse (ou uma de suas modificações) é o método padrão de determinação de proteínas contidas em grãos, carnes e outros materiais biológicos. Uma vez que a maioria das proteínas contém aproximadamente a mesma porcentagem de nitrogênio, a multiplicação desta porcentagem por um fator adequado (6,25 para carnes, 6,38 para laticínios e 5,70 para cereais) fornece a porcentagem de proteína na amostra (SKOOG; WEST; CROUCH, 2005).

Dong et al. (2017) empregaram o método por combustão (método Dumas) para determinar a proteína bruta de café. O pó de café foi pesado em folha de estanho e analisado usando o equipamento de Dumas com ácido etilenodiaminotetracético como padrão. O teor de nitrogênio foi multiplicado por um fator de 6,5 para calcular o teor de proteína bruta. Contudo, devido à demora para a inicialização, o analisador Dumas deve ser usado em operação contínua. O Kjeldahl, por outro lado, pode ser utilizado para testes imediatos. A análise de Kjeldahl é mais utilizada (SKOOG; WEST; CROUCH, 2005) e com ela é possível lidar com amostras de até aproximadamente 10 g, enquanto que, com o Dumas, o máximo que se pode processar é 1 g.

Dong et al. (2017) também determinaram cafeína e trigonelina nos extratos de café, os quais foram quantificados por CLAE acoplada a um detector de absorvância (UV/Vis), com pequenas modificações do método desenvolvido por Smrke et al. (2015). A fase móvel consistiu em metanol e solução aquosa de ácido acético glacial 0,1 %. O detector foi ajustado para 275 nm para cafeína e 268 nm para trigonelina e os extratos foram separados usando uma coluna C18 de fase reversa (10 cm x 2,1 mm, d.i., tamanho de partícula de 1,7 µm). Já no estudo desenvolvido por Kulapichitr et al. (2019), a cafeína foi analisada usando CLAE com coluna C18 (4,6 mm x 25 cm, 5 µm) equipada com um detector de arranjo de diodos (DAD). As separações foram realizadas usando uma fase móvel isocrática de metanol, água e ácido acético (80:19:1 v/v/v) e os picos foram monitorados em um comprimento de onda de 276 nm. A cafeína foi quantificada com base na calibração das áreas de pico de padrão externo versus concentração de cafeína.

Martín, Pablos e González (1998) determinaram os aminoácidos livres totais do café por espectrofotometria usando um método baseado em ninidrina. O complexo roxo formado é detectado em um espectrofotômetro UV/Vis no comprimento de onda de 570 nm. Dong et al. (2017) analisaram os aminoácidos do café usando um analisador de aminoácidos automático (SYKAM S-433D), baseado em CLAE, com uma coluna de poliéter-éter-cetona (PEEK) (4,6 mm x 15 cm, 7 µm) equipada com um detector de arranjo de diodos (DAD). O conteúdo de aminoácidos foi quantificado comparando os tempos de retenção e áreas de pico com aqueles

das curvas padrão. Kulapichitr et al. (2019) também analisaram os aminoácidos do café. Os aminoácidos totais do café cru foram determinados usando um sistema de CLAE com coluna C18 (4,6 mm x 15 cm, 3 μ m) equipada com um aquecedor de coluna e um detector de fluorescência (FL, λ_{Ex} 250 nm/ λ_{Em} 395 nm), usando tampão de acetato de sódio (pH 4,9) e 60 % acetonitrila como eluentes A e B. Os aminoácidos foram identificados por comparação de seus tempos de retenção com aqueles de um padrão de aminoácidos. A análise quantitativa foi realizada usando calibrações de áreas de pico de padrão externo versus concentrações de padrões autênticos.

2.5.5 Acidez total titulável e pH

A acidez total titulável (ATT) pode ser obtida pela titulação com solução de NaOH 0,1 M, usando uma solução de fenolftaleína a 1 % como indicador, e os resultados são expressos em mL de NaOH (0,1 mol/L) por 100 g de grãos de café cru (BARBOSA et al., 2019). O pH é avaliado pela leitura em pHmetro. O método se baseia na determinação hidrogeniônica fazendo uso de um potenciômetro (TORRES, 2014).

2.6 Qualidade do café em diferentes condições de secagem

A geração do sabor do café começa na planta, cujos precursores do sabor se formam à medida que os frutos do café se desenvolvem. A complexidade do sabor se desenvolve ainda mais ao longo das várias etapas do processamento do café, como visto anteriormente, e das técnicas subsequentes de preparação da xícara. Os não voláteis presentes nos grãos crus são importantes para a qualidade sensorial e têm sido relacionados a aspectos positivos e negativos do sabor da bebida de café (Tabela 2.5).

Os carboidratos afetam a doçura, as notas de caramelo surgem das reações de Maillard, entre os açúcares e os aminoácidos, e a cafeína e os ácidos clorogênicos contribuem para o amargor (SUNARHARUM; WILLIAMS; SMYTH, 2014). O impacto da torra no sabor vem da degradação e formação ou liberação de numerosos compostos químicos por meio de reações de Maillard, degradação de Strecker, quebra de aminoácidos, degradação de trigonelina, ácido quínico, pigmentos, lipídios e interação entre produtos intermediários (BUFFO; CARDELLI-FREIRE, 2004).

Tabela 2.5 - Níveis de compostos do grão de café arábica cru associados com a qualidade da bebida (em base seca)

Componente	Níveis		Referência
	Com efeito positivo na qualidade da bebida	Com efeito negativo na qualidade da bebida	
Açúcares totais ^a	7,40-8,39	5,91-6,68	Torres (2014)
Sacarose ^a	6,76-7,85	4,88-6,20	Barbosa et al. (2019); Farah et al. (2006)
Acidez total titulável (ATT) ^b	207,20-287,33	314,23-331,13	Barbosa et al. (2019); Franca, Mendonça e Oliveira (2005)
pH	5,5-5,72	5,30	Franca, Mendonça e Oliveira (2005); Torres (2014)
Sacarose/ATT	5,93	4,95-5,15	Barbosa et al. (2019)
Lipídeos totais ^a	11,13-15,05	9,65-10,53	Barbosa et al. (2019); Franca, Mendonça e Oliveira (2005)
Cafestol ^a	0,51-0,56	0,39	Barbosa et al. (2019)
Cafestol/kahweol	0,73	0,48-0,51	Barbosa et al. (2019)
Proteína bruta ^a	13,42	14,61-15,31	Barbosa et al. (2019)
Cafeína ^a	1,01-1,21	1,24-1,36	Barbosa et al. (2019); Torres (2014)
Trigonelina ^a	1,32-1,34	0,91-0,96	Farah et al. (2006); Franca, Mendonça e Oliveira (2005); Torres (2014)
Ácidos clorogênicos totais ^a	3,99-5,78	7,02-8,04	Barbosa et al. (2019); Farah et al. (2006)
Ácido 5-cafeoilquínico ^a	2,39-5,63	6,21-6,42	Franca, Mendonça e Oliveira (2005); Torres (2014)
Ácidos monoclorogênicos ^a	3,60	6,42	Kulapichitr et al. (2022)
Ácidos dicafeoilquínicos ^c	443,5	336	Kulapichitr et al. (2022)
Ácido málico ^c	266-352	606-639	Torres (2014)
Ácido quínico ^c	434-479	535-570	Torres (2014)
Ácido cítrico ^c	1255-1284	1067-1117	Torres (2014)

Unidades em ^a[g/100 g de café], ^b[mL de NaOH (0,1 mol/L)/100 g de café] e ^c[mg/100 g de café].

Por meio da investigação de Barbosa et al. (2019), foi verificado que, em geral, a qualidade da bebida de café está associada a um conjunto de compostos químicos dos grãos de café. Neste estudo, a composição química do grão de café arábica cru, de concursos de qualidade de café, foi analisada por espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS). Foram utilizadas técnicas de análise multivariada (Análise de Componentes Principais - PCA - e Análise de Agrupamentos Hierárquicos - HCA) para separação das amostras em grupos. As

bebidas de café com escores de qualidade mais baixos foram correlacionadas com altos níveis de cafeína, ácidos clorogênicos, proteína e acidez total titulável nos grãos de café cru. Altas proporções de cafestol, sacarose/ATT e cafestol/kahweol nos grãos de café cru foram geralmente associadas a maiores escores de qualidade para as bebidas de café. A quantidade de lipídeos totais não mostrou influência significativa na pontuação global da qualidade da bebida do café (que variou de 77,67 a 80,54).

Torres (2014) também buscou avaliar a influência da composição bioativa, da atividade antioxidante e da relação entre os conteúdos de ácidos orgânicos, açúcares totais, pH e acidez total titulável sobre a qualidade de cafés crus e torrados em diferentes padrões de bebida. Foram analisados grãos crus e torrados do café arábica, classificados nos padrões de bebida estritamente mole, mole, apenas mole, dura, riada e rio, provenientes das regiões sul e cerrado do estado de Minas Gerais. Os dados foram submetidos à análise multivariada e os resultados do estudo mostraram que os cafés crus classificados nos padrões de bebida de pior qualidade apresentaram maiores teores de cafeína, ácido 5-cafeoilquínico, fenólicos totais, ácido málico, ácido quínico, acidez total titulável e atividade antioxidante e menores teores de trigonelina, ácido cítrico e açúcares totais, quando comparados com cafés de melhor qualidade.

Em outro estudo realizado (FARAH et al., 2006), grãos de café cru e torrado foram analisados para possíveis correlações entre a qualidade da xícara e os níveis de sacarose, cafeína, trigonelina e ácidos clorogênicos, determinados por análise de CLAE. Os níveis de trigonelina e ácido 3,4-dicafeoilquínico no café cru correlacionaram-se fortemente com a alta qualidade da bebida. Por outro lado, os níveis de ácidos cafeoilquínicos (predominantemente ácido 5-cafeoilquínico), ácidos feruloilquínicos e seus produtos de oxidação no café cru foram associados à má qualidade da xícara. O maior conteúdo de ácidos clorogênicos no café cru foi observado para a amostra de pior qualidade, rio zona.

A pesquisa de Franca, Mendonça e Oliveira (2005) teve como objetivo uma avaliação dos atributos físicos e químicos de café arábica de diferentes qualidades, tanto cru quanto torrado. A bebida riada apresentou menores teores de lipídios, provavelmente associados à presença de defeitos. A acidez aumentou e os níveis de pH diminuíram conforme a qualidade da xícara diminuiu, provavelmente devido ao efeito de grãos defeituosos que sofreram fermentação.

Sualeh, Tolessa e Mohammed (2020) determinaram as composições bioquímicas e a atividade antioxidante em café cru e torrado e sua correlação com a qualidade da xícara. Os resultados mostraram correlação negativa dos níveis de trigonelina estudados com os

parâmetros de qualidade corpo e sabor e correlação positiva dos níveis de ácidos clorogênicos com a acidez e corpo, além da correlação positiva da cafeína com a adstringência e amargura.

Por conta dessas influências da composição do grão de café cru na qualidade da bebida de café, é possível correlacionar como a secagem pode interferir de forma negativa ou positiva na composição do café cru, cuja essa interferência poderá provocar alterações na qualidade do café após a torrefação e, conseqüentemente, na sua bebida.

Para tal, foram reunidos nas Tabelas Tabela 2.6 e Tabela 2.7 os resultados da quantificação de alguns componentes do café, com umidade inicial próxima de 65 % b.u. (não especificada pelos autores), após diferentes condições de secagem. Pelos dados, é possível verificar que a secagem em bomba de calor e em bandeja resultam em maiores teores de açúcares que a secagem em terreiro (KULAPICHITR et al., 2019).

Tabela 2.6 - Componentes associados à qualidade do café arábica (cultivar Catimor) cru processado por via úmida em diferentes condições de secagem (em base seca)

Condições	Método de secagem				
	Bomba de calor			Terreiro	Bandeja
Temperatura [°C]	40	45	50	20 a 30	50
Tempo de secagem [h]	23	16	11	72	18
Componente					
Umidade final ^a	9,66	10,48	10	9,10	10,71
Atividade de água	0,59	0,59	0,59	0,59	0,56
Sacarose ^b	4,85	4,43	4,55	3,96	4,96
Cafeína ^b	1,26	1,2	1,22	1,21	1,25
Ácidos clorogênicos ^c	4248,5	4166,5	4016	4453,5	4008
Ácido 5-cafeoilquínico ^c	2783,5	2719,5	2686	2896,5	2590
Ácidos monoclorogênicos ^c	3860	3817	3601,5	4024,5	3630
Ácidos dicafeoilquínicos ^c	370,5	336	443,5	414	367,5

^aUnidade em [g/100 g de café]. ^bUnidade em [g/100 g de café]. ^cUnidade em [mg/100 g de café].

Ácidos clorogênicos totais: inclui os ácidos monoclorogênicos e dicafeoilquínicos.

Fonte: Kulapichitr et al. (2019, 2022).

A desidratação em bomba de calor e em terreiro diminuem o teor de lipídeos e os grãos de café secos pelo método de liofilização apresentam maior teor de ácidos orgânicos totais, enquanto pelo método em terreiro apresentam menor teor (DONG et al., 2017). Os cafés secos em bomba de calor (50 °C) contêm menores quantidades de ácidos monoclorogênicos e maiores quantidades de ácidos dicafeoilquínicos.

Enquanto isso, os cafés secos em temperaturas menores na bomba de calor (40-45 °C) e em terreiro contêm maiores quantidades de ácidos monoclorogênicos e menores quantidades de ácidos dicafeoilquínicos (KULAPICHITR et al., 2022).

Tabela 2.7 - Componentes associados à qualidade do café robusta (cultivar RY1) cru processado por via seca em diferentes condições de secagem (em base seca)

Condições	Método de secagem				
	Terreiro	Solar	Bomba de calor	Estufa	Liofilizador
Temperatura [°C]	20 a 30	-	50	50	-40 a 40
Tempo de secagem [h]	168	120	72	72	25
Componente					
Umidade final ^a	11	11	11	11	11
Lípídeos totais ^b	6,63	8,74	7,47	8,31	~8,9
Proteína bruta ^b	~14,2	~15	~14,6	14,83	14,71
Cafeína ^b	2,3	2,47	~2,4	2,31	2,4
Trigonelina ^b	0,87	~0,9	0,86	~0,9	0,88
Ácido málico ^c	4464,68	4235,16	4304,69	5525,58	4170,15
Ácido quínico ^c	ND	ND	ND	ND	690,98
Ácido cítrico ^c	1708,06	1580,02	1688,4	1905,66	1445,24

^aUnidade em [g/100 g de café]. ^bUnidade em [g/100 g de café]. ^cUnidade em [mg/100 g de café].
ND: Não detectado. Fonte: Dong et al. (2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material

O café arábica (*Coffea arabica*. L) despulpado, Figura 3.1, utilizado nos experimentos, foi da variedade Mundo Novo e foi obtido na Região do Cerrado Mineiro. Foi adquirido em parceria com o Grupo DKB, provindo do talhão 4 da fazenda Santa Bárbara (Monte Carmelo - MG) e plantado em 2009, em agricultura de sequeiro (sem irrigação), na altitude de 960 m, com 3,80 m de altura e 0,70 m de espaçamento do plantio (3.759 plantas/ha).

O lote de café recebido estava homogeneizado e apresentava uma parcela de aproximadamente 0,5 % (m/m) de impurezas e matérias estranhas, as quais foram retiradas da matéria-prima antes de serem armazenadas para os testes de secagem. Não houve qualquer separação por tamanho dos grãos antes da secagem.

O café, que já se encontrava na condição de meia-seca e com o pergaminho removido, foi armazenado em freezer (aproximadamente -18 °C) em bombonas de 40 L e descongelado em temperatura de refrigeração por 12 horas antes da realização da secagem.

Figura 3.1 - Fotografias do café arábica despulpado sem pergaminho



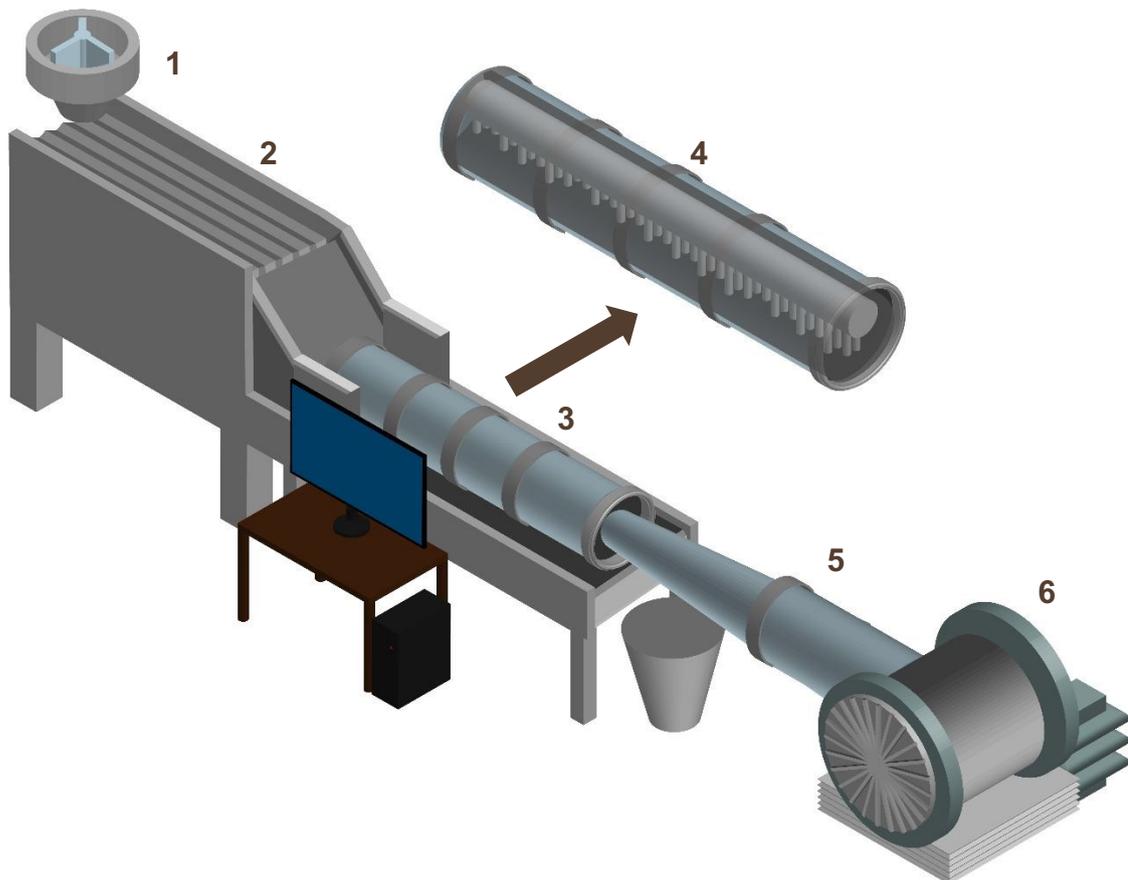
Fonte: De autoria própria (2022).

3.2 Unidade experimental

A unidade experimental utilizada é mostrada na Figura 3.2. A unidade é constituída por: um soprador de 7,5 hp do tipo ventilador radial (6) acoplado a um duto de 2 m e 0,2 m de

diâmetro (5), com um sistema de aquecimento do ar composto por resistências elétricas controladas por dois variadores de tensão; o secador rotatório (3) com superfície interna coberta por chapas de aço inoxidável de 0,5 mm de espessura, sendo que a estrutura permitia variações de inclinação e rotação; e uma correia transportadora (2) montada debaixo de um recipiente para armazenamento e alimentação gravitacional dos sólidos (1). O secador roto-aerado tem comprimento de 1,4 m e 0,28 m de diâmetro (relação $L/D = 5$), com 56 minitubos (4) com diâmetro de 0,02 m e 0,095 m de comprimento, os quais direcionam o ar para o material, colocados a 0,02 m do café.

Figura 3.2 - Esquema da unidade experimental do processo de secagem: (1) recipiente de armazenamento do material, (2) esteira de transporte, (3) secador roto-aerado, (4) visão interna (minitubos), (5) sistema de aquecimento elétrico e (6) soprador



Fonte: De autoria própria (2022).

3.3 Metodologia experimental

3.3.1 Caracterização da matéria-prima

3.3.1.1 Umidade

Foram usados aproximadamente 3 g de café despolpado para avaliar a umidade do café pelo método de estufa a 105 ± 1 °C (REH et al., 2006), até peso constante (por 24 horas, aproximadamente).

3.3.1.2 Massa específica aparente

A determinação da massa específica ou densidade aparente do café despolpado úmido foi realizada por picnometria, utilizando-se éter de petróleo ($\rho = 0,6465$ g/cm³) como fluido. A temperatura foi registrada para determinar a densidade de referência do fluido.

3.3.1.3 Análise granulométrica e aspectos morfológicos

A determinação dos parâmetros geométricos do material foi realizada através da análise de imagens obtidas por fluxo de partículas. Este método de medida é descrito na norma ISO 13322-2/2021. O equipamento utilizado para a análise granulométrica foi o Camsizer® P4, que é um analisador de tamanho e formas das partículas por imagem dinâmica digital. Foram analisadas a esfericidade (φ), a simetria e a razão de aspecto (RA) do café. Por meio da distribuição cumulativa, foi-se obtido o diâmetro médio de Sauter (\overline{D}_s) do café.

Foram necessários aproximadamente 400 g de café despolpado úmido por análise, a qual foi feita em duplicata, com espaçamento temporal de 2 meses entre as réplicas, e os valores médios representaram o resultado.

A análise das imagens possibilitou também a determinação de diversos aspectos relativos à morfologia das partículas, entre eles a esfericidade ($4\pi \cdot \text{área}/\text{perímetro}^2$) e a relação de aspecto (diâmetro mínimo/diâmetro máximo de Feret). Quanto menores os valores de relação de aspecto, mais alongadas são as partículas. Já a esfericidade representa a irregularidade do seu perímetro projetado. Portanto, quanto mais próximo de 1 mais se aproxima de uma esfera e, quanto mais próximo de 0, mais irregular (ISLAM et al., 2022).

3.3.1.4 Análise termogravimétrica

As análises termogravimétricas (TGA) para o café despolpado foram realizadas em um analisador termogravimétrico de modelo TGA-50, marca Shimadzu, sob fluxo contínuo de

atmosfera inerte de gás hélio à 50 mL/min. Amostras de aproximadamente 14 mg foram alocadas em um cadinho de alumina e aquecidas até 950 °C, empregando uma taxa de aquecimento de 20 °C/min. Com os dados de perda de massa das amostras com o tempo e temperatura, registrados pelo software do equipamento, foi possível obter as curvas de TGA.

3.3.2 Experimentos de secagem

3.3.2.1 Procedimento experimental

Os experimentos foram conduzidos em diferentes níveis de temperatura e velocidade do ar de secagem, assim como da vazão de alimentação de sólidos, como detalhado na seção 3.3.2.2. O ângulo de inclinação do tambor foi de 0,2° e a velocidade de rotação foi de 1,5 rpm, os quais são os menores níveis de operação destes dois parâmetros, de modo que promovessem uma maior permanência dos sólidos dentro do secador, retardando seu escoamento, a fim de aumentar o desempenho da secagem.

Os experimentos de secagem no roto-aerado foram realizados em uma faixa de 30 a 40 % de umidade relativa do ar ambiente. As temperaturas do ar e dos sólidos foram medidas usando termopares de cobre-constantan, previamente calibrados usando um banho termostático e termômetro de mercúrio (com uma precisão de 0,05 °C). A velocidade do ar foi medida no duto de alimentação de ar (0,2 m de diâmetro), utilizando um anemômetro de fio quente *Incorporated*, modelo 9545. A vazão mássica de sólidos foi determinada pela coleta periódica de amostra na entrada do secador e, por conseguinte, sua pesagem em balança analítica da marca Marte, modelo AY220, com precisão de 0,0001 g.

Após certificar, por meio do acompanhamento da vazão de saída de sólidos, de que o sistema estava em regime permanente (condições em regime permanente foram atingidas após aproximadamente 1 hora de alimentação), as amostras foram recolhidas para as análises do desempenho de secagem, modelagem e verificação de qualidade.

Para avaliar o desempenho da secagem e seu efeito na qualidade do café, foram coletadas amostras na entrada e na saída do secador. Para modelagem, a amostragem da temperatura e umidade foi feita ao longo do secador nas posições axiais (direção x): 0 (entrada); 0,15; 0,3; 0,45; 0,7; 1,1 e 1,4 m (saída). Para obter a temperatura do café no secador, o material foi recolhido em um recipiente isolado termicamente contendo um termopar. O teor de umidade do café (% b.s.) foi determinado pelo método em estufa a 105 °C até peso constante, o que levava aproximadamente 24 horas (SILVA, 2018).

O cálculo da taxa de secagem ($\text{g água}/(100 \text{ g sólido seco.min})$) foi feito considerando a diferença entre a umidade inicial e final em relação ao tempo de residência de cada ensaio. O tempo de residência (τ) foi determinado pela razão entre a carga de sólidos no secador e a vazão de alimentação de sólidos. Os cálculos foram feitos utilizando base seca.

Para medir a carga de sólidos (kg), o secador foi parado e o material foi recolhido para pesagem em uma balança analítica. Vale ressaltar que esta última medida foi realizada apenas no final de cada corrida, considerando a necessidade de remoção dos grãos do leito do secador (Figura 3.3). O café seco foi armazenado em embalagens de polietileno de baixa densidade (PEBD), em freezer, até execução das análises de qualidade.

Figura 3.3 - Fotografia da saída dos grãos no secador roto-aerado



Fonte: De autoria própria (2022).

3.3.2.2 *Planejamento experimental*

As operações de secagem do café arábica despulpado foram realizadas de acordo com um Planejamento Composto Central (PCC) com 16 experimentos (detalhados na Tabela 3.1), dos quais 8 pontos são fatoriais, 6 pontos axiais e 2 experimentos são réplicas no ponto central (com um α de rotabilidade de 1,68). A rotabilidade proporciona variâncias idênticas para pontos situados à mesma distância do centro, em qualquer direção (DRAPER; YING, 1994).

As variáveis independentes foram: velocidade do ar de secagem (v_f , m/s), codificada como X_1 , temperatura do ar de secagem (T_f , °C), codificada como X_2 , e vazão de alimentação

de sólidos (W_s , g/min), codificada como X_3 . As equações de codificação para estas variáveis são representadas pelas Equações (3.1), (3.2) e (3.3), respectivamente. As respostas avaliadas foram redução de umidade, tempo de secagem, temperatura do sólido, acidez total titulável, teores de açúcares e ácidos orgânicos.

Tabela 3.1 - PCC para as secagens do café despulpado em roto-aerado

Experimento	X_1	X_2	X_3	v_f [m/s]	T_f [°C]	W_s [g/min]
1	-1	-1	-1	3,0	55,0	40
2	-1	-1	1	3,0	55,0	60
3	-1	1	-1	3,0	75,0	40
4	-1	1	1	3,0	75,0	60
5	1	-1	-1	5,0	55,0	40
6	1	-1	1	5,0	55,0	60
7	1	1	-1	5,0	75,0	40
8	1	1	1	5,0	75,0	60
9	-1,68	0	0	2,3	65,0	50
10	1,68	0	0	5,7	65,0	50
11	0	-1,68	0	4,0	48,2	50
12	0	1,68	0	4,0	81,8	50
13	0	0	-1,68	4,0	65,0	33
14	0	0	1,68	4,0	65,0	67
15	0	0	0	4,0	65,0	50
16	0	0	0	4,0	65,0	50

$$X_1 = v_f - 4 \text{ m/s} \quad (3.1)$$

$$X_2 = \frac{T_f - 65 \text{ °C}}{10 \text{ °C}} \quad (3.2)$$

$$X_3 = \frac{W_s - 50 \text{ g/min}}{10 \text{ g/min}} \quad (3.3)$$

3.3.3 Resolução numérica do modelo matemático

O sistema de equações diferenciais alcançado neste trabalho, e descrito no item 2.4, foi resolvido simultaneamente para as variáveis envolvidas, levando-se em consideração que a temperatura ($T_s(0) = T_{s_0}$) e a umidade ($M(0) = M_0$) do sólido na entrada eram conhecidas e selecionadas como condições de contorno do problema.

O método de colocação normal com dez pontos de colocação e uma aproximação polinomial de quarta ordem foram utilizados para a resolução numérica do modelo. Este número de pontos foi escolhido através de testes que mostraram que valores acima deste não trouxeram melhorias na precisão dos resultados obtidos com este modelo (ARRUDA et al., 2009).

A tolerância relativa definida foi da ordem de 10^{-10} e foi utilizada a sub-rotina 'BVP4C' do software Matlab® para solução do problema de valor de contorno modelado para o processo de secagem. O algoritmo utilizado para a solução numérica se encontra no Apêndice A – Algoritmo da resolução numérica do modelo em MATLAB®.

3.3.3.1 Equações constitutivas e informações requeridas pelo modelo

A equação constitutiva para a cinética de secagem foi obtida por meio dos dados experimentais de umidade, coletados ao longo do secador em cada ensaio de secagem do PCC, cujo leito de partículas pode ser considerado uma camada fina. Este estudo foi necessário, pois a Equação (2.24) não foi adequada para descrever a cinética de secagem do café no secador.

A umidade em cada ponto no sentido axial do secador, da entrada à saída, foi correlacionada com a temperatura de secagem, com o tempo de residência, com a umidade do café na entrada do secador e com a isoterma de equilíbrio do material, obtida por Goneli et al. (2013) e representada na Equação (2.23), a qual foi a que melhor descreveu o comportamento de desorção da água no café despolpado. Assim, obteve-se a relação entre o adimensional de umidade (MR), a temperatura do ar e o tempo.

Então, foi utilizado o modelo de Page, Equação (3.4), com relação do tipo Arrhenius, Equação (3.5), para descrever a cinética de secagem, por meio dos dados experimentais no secador. Entre os modelos de secagem, o modelo de Page é um dos modelos mais utilizados devido a sua alta precisão e simplicidade (CAI et al., 2017).

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt^n) \quad (3.4)$$

Sendo k a pseudo-difusividade de umidade, que pode ser calculada a partir da seguinte fórmula:

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_f}\right) \quad (3.5)$$

Sendo A o fator pseudo-pré-exponencial.

Assim, o comportamento cinético da secagem do café arábica despulpado, em diferentes temperaturas, pode ser descrito por este conjunto de parâmetros (A , E_a , e n). Sendo A e k em s^{-n} , T_f em Kelvin, t em s, E_a em J/mol e $R = 8,314$ J/mol.K.

Para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_{va}), a Equação (2.27) também não foi ideal para descrever o comportamento do processo. Isto era esperado, pois esta correlação foi modelada para secagem de outro material (fertilizante) em diferentes condições experimentais das do café, o que acabou subestimando a previsão para os valores experimentais obtidos para o U_{va} na secagem de café no roto-aerado.

Para corrigir este efeito, a mesma correlação, Equação (3.6) (FRIEDMAN; MARSHALL, 1949), foi reajustada, correlacionando os valores experimentais de U_{va} , alcançados pelo balanço de energia no secador, com as vazões de alimentação de sólido e do ar de secagem.

$$U_{va} = K_F G_f^{m_F} G_s^{n_F} \quad (3.6)$$

Sendo que G_s e G_f são as vazões mássicas de sólido e do fluido, em base seca, respectivamente. K_F , m_F e n_F são parâmetros da equação.

Os parâmetros do modelo de cinética de secagem e do coeficiente global volumétrico de transferência de calor foram estimados pela técnica de regressão não linear direta, no software STATISTICA®. O coeficiente de determinação (R^2) e a análise de resíduos foram usados para avaliar a qualidade do ajuste do modelo.

O calor específico do café despulpado (C_{p_s}) foi estudado por Chandrasekar e Viswanathan (1999) e pode ser representado pela Equação (3.7). A expressão também foi uma das equações constitutivas do modelo.

$$C_{p_s} = 8,1387 \times U + 0,2482 \quad (3.7)$$

Sendo U (b.u.) a umidade decimal (kg água/kg café) em base úmida do café despulpado.

As demais informações e dados, inerentes ao material ou ao ar de secagem, e necessários para a resolução numérica do modelo podem ser encontrados no Apêndice B – .

3.3.4 Avaliação da qualidade do produto

3.3.4.1 Preparo de amostras

O café que foi embalado (aproximadamente 5 kg por experimento), Figura 3.4, e armazenado em freezer após cada ensaio de secagem, foi descongelado por 12 horas sob refrigeração para ser reduzido, por quarteamento, nas amostras para análise de qualidade do café.

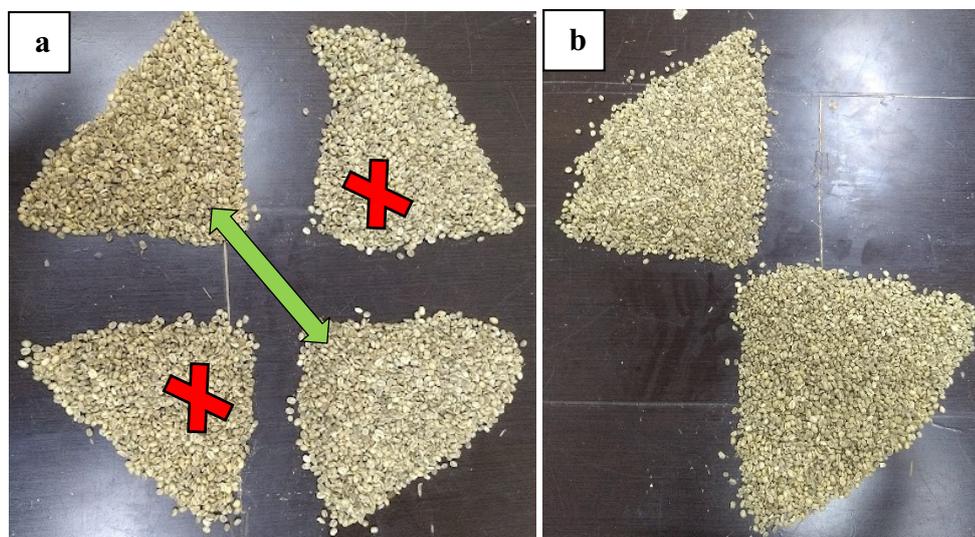
Figura 3.4 - Fotografias do café despulpado após a secagem (embalado)



Fonte: De autoria própria (2022).

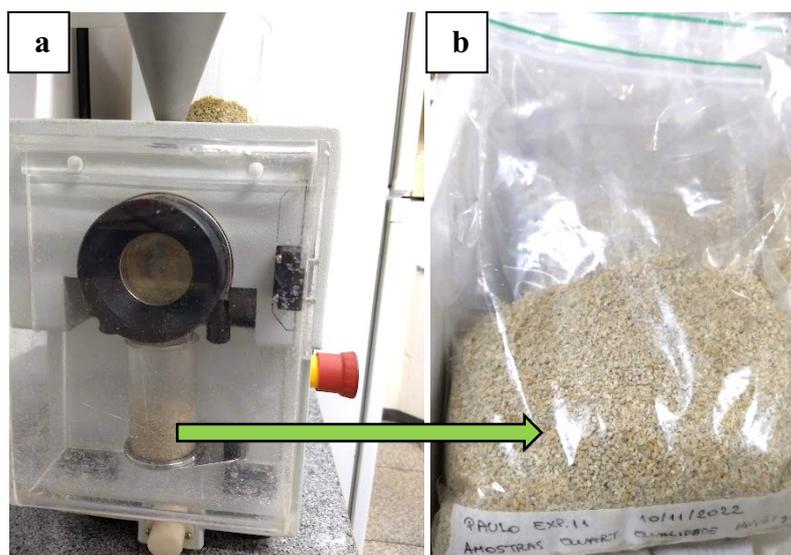
As amostras foram então obtidas pelo processo de quarteamento manual (Figura 3.5) do café, de modo a se obter um material representativo (cerca de 140 g). Após o quarteamento, os grãos da amostragem passaram por um moinho de facas da Marconi, modelo MA048 (Figura 3.6.a), e o material foi moído até 1,7 mm, embalado novamente em sacos vedados do tipo ziplock (Figura 3.6.b) e armazenado a uma temperatura de freezer (-18°C) até ser analisado. A matéria-prima também foi preparada e analisada pelos mesmos procedimentos que as amostras dos cafés secos.

Figura 3.5 - Processo de quarteamento do material: (a) homogeneização e divisão em quatro grupos e (b) seleção de dois grupos opostos diagonalmente e repetição do processo



Fonte: De autoria própria (2022).

Figura 3.6 - Fotografias do café (a) durante o processo de moagem e (b) moído



Fonte: De autoria própria (2022).

As análises de qualidade realizadas são descritas nas subseções a seguir.

3.3.4.2 Umidade e atividade de água (A_w)

A umidade do café após a secagem foi avaliada em estufa no mesmo método realizado para a matéria-prima. Com relação à análise de atividade de água, cerca de 1 g de café foi analisado usando o equipamento Labswift, com resolução de $0,001 A_w \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3.4.3 Determinação do pH e acidez total titulável (ATT)

A partir do filtrado obtido por agitação de 2 g de amostra em 50 mL de água destilada, a acidez total titulável (ATT) foi obtida pela titulação com solução de NaOH 0,1 M, usando uma solução de fenolftaleína a 1 % como indicador. Os resultados foram expressos em mL de NaOH (0,1 mol/L) por 100 g de grãos de café cru (BARBOSA et al., 2019). O pH do filtrado foi avaliado pela leitura em pHmetro.

3.3.4.4 Açúcares e ácidos orgânicos

Para extração e análise de açúcares e ácidos orgânicos, a metodologia foi baseada nos trabalhos de Bressani et al. (2020); Jham et al. (2002) e Somporn et al. (2012) com modificações. Dissolveu-se 1 g da amostra em 10 mL de solvente contendo ácido ortofosfórico (H_3PO_4 , 0,1 % v/v). A amostra foi então centrifugada a 4.000 rpm por 40 minutos à temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C). O sobrenadante foi recolhido em um recipiente. A amostra foi filtrada através de filtro seringa de nylon de 0,45 μm e a amostra final foi armazenada em refrigerador a 4 °C até a análise dos açúcares e ácidos orgânicos.

Uma alíquota de 20 μL foi injetada em uma coluna de troca iônica SUPELCOGE™ C-610H (300 mm \times 7,8 mm id., 9 μm) conectada a um HPLC Prominence da Shimadzu, equipado com detectores de índice de refração (RID), para detecção de açúcares, e de UV-Vis (em 210 nm), para detecção de ácidos orgânicos. A vazão da fase móvel, consistindo em eluição isocrática de solução aquosa de ácido ortofosfórico (H_3PO_4 , 0,1 % v/v), foi de 0,5 mL/min. A análise ocorreu na temperatura de 32 °C. Os açúcares (com concentração entre 0,5 e 10 g/L) e ácidos (com concentração entre 0,05 e 1 g/L) foram quantificados com base em calibrações de padrões externos de áreas de pico versus concentrações para padrões autênticos.

3.3.5 Análise estatística e otimização

Os dados experimentais, que foram obtidos seguindo o planejamento experimental (PCC), foram tratados pelas técnicas de regressão e de superfície de respostas (BOX; HUNTER; HUNTER, 1978). Por meio de tais técnicas as respostas foram previstas pelo modelo teórico, descrito pela Equação (3.8), com o propósito de avaliar os efeitos lineares, quadráticos e de interação das variáveis independentes.

$$\hat{y} = b_0 + x'b + x'Bx \quad (3.8)$$

Em que:

- \hat{y} : resposta prevista pelo modelo;
- b_0 : coeficiente linear;
- $x'b$: termos de primeira ordem;
- b : vetor com parâmetros ligados às variáveis independentes (efeito linear);
- $x'Bx$: contribuição quadrática;
- B : matriz com parâmetros ligados aos efeitos quadráticos e de interações das variáveis independentes;
- x : vetor das variáveis independentes codificadas.

A análise estatística, realizada no software STATISTICA®, foi feita através da análise de variância (ANOVA) e do teste F de Fisher-Snedecor. Os parâmetros com nível de significância (valor p) superior a 10 % ($\alpha = 0,10$) foram desprezados e, conseqüentemente, as variáveis vinculadas a eles foram consideradas irrelevantes para a resposta, ou seja, seus efeitos não foram significativos. A significância foi determinada por meio comparativo entre o valor do F observado e do valor tabelado na distribuição F. O coeficiente de determinação (R^2) e a análise de resíduos foram usados para avaliar a qualidade dos ajustes dos modelos.

Para a otimização multirresposta, foi utilizada a função de Desejabilidade (DERRINGER; SUICH, 1980). Os valores preditos pelos modelos (\hat{y}_n) foram transformados na escala adimensional (d_n), Equação (3.9), com valores de desejabilidade variando de 0 a 1, sendo que 0 representa a resposta completamente indesejável e 1 indica a resposta otimizada.

$$d_n = \begin{cases} 0, & \hat{y}_n = \hat{y}_n^{\min} (\text{max.}) \text{ ou } \hat{y}_n^{\max} (\text{min.}) \\ \left(\frac{\hat{y}_n - \hat{y}_n^{\min}}{\hat{y}_n^{\max} - \hat{y}_n^{\min}} \right)^s, & \hat{y}_n^{\min} < \hat{y}_n < \hat{y}_n^{\max} \\ 1, & \hat{y}_n = \hat{y}_n^{\max} (\text{max.}) \text{ ou } \hat{y}_n^{\min} (\text{min.}) \end{cases} \quad (3.9)$$

Em que \hat{y}_n^{\min} é o valor mínimo e \hat{y}_n^{\max} o valor máximo de \hat{y}_n e s é uma constante positiva. Quando $s = 1$, a função desejabilidade é linear. Com as desejabilidades individuais combinadas é possível obter a desejabilidade geral (D), como uma raiz do produto das desejabilidades individuais, conforme apresentado na Equação (3.10).

$$D = \sqrt[n]{d_1 d_2 \dots d_n} \quad (3.10)$$

Sendo n o número de respostas a serem otimizadas.

Desse modo, o processo de otimização multirresposta encontra os níveis das variáveis independentes codificadas que resultam na desejabilidade geral máxima. Logo, valores de D mais próximos de 1 indicam as funções mais desejáveis do sistema e, portanto, são consideradas as soluções ótimas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados da caracterização do café arábica despulpado, do desempenho dos ensaios de secagem de café realizados no secador roto-aerado, da modelagem matemática e simulação do processo de secagem, da qualidade físico-química do grão e da otimização da operação de secagem.

4.1 Caracterização do café arábica despulpado

A umidade do café despulpado úmido, que estava na condição próxima à meia-seca, foi de $19,36 \pm 0,77$ % b.s., pois foi previamente seco em terreiro. Esta é uma condição desejável quando se tem uma etapa de pré-secagem em pátio e o secador complementa a operação de secagem do café até níveis seguros, como no estudo em questão (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; HII; BORÉM, 2019). Esse método de processamento de café tem sido utilizado por muitos pesquisadores, principalmente no Brasil, pela facilidade de mesclar os métodos de secagem mecânica e em terreiro (SIQUEIRA et al., 2017; VALDINEY et al., 2016).

Neste tipo de processamento, o café cereja é processado de forma semelhante à via seca. Quando o café atinge a meia-seca (de 18 a 35 % b.u.), todo o pericarpo (ou seja, da casca ao pergaminho) é removido e a secagem é conduzida até que o café atinja 12,5 a 13 % b.u. de umidade. Então, deve ser descarregado enquanto ainda está quente e passa por um período de têmpera até atingir 11 % b.u., antes do armazenamento (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; HII; BORÉM, 2019; POLTRONIERI; ROSSI, 2016).

A massa específica aparente do café despulpado, com o pergaminho já removido, foi de $0,461 \pm 0,005$ g/cm³. Este valor esteve dentro do esperado de acordo com resultados de outros trabalhos (que variou aproximadamente de 0,440 a 0,510 g/cm³), os quais estão incluídos na Tabela 2.2 (AFONSO JÚNIOR et al., 2007; CHANDRASEKAR; VISWANATHAN, 1999).

O café também foi caracterizado quanto à sua distribuição granulométrica, dimensões e forma de partículas. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1. A esfericidade ficou acima da faixa de referência de 0,67 a 0,69 da Tabela 2.2 (AFONSO JÚNIOR et al., 2007), devido à diferença de metodologia e, possivelmente, pela diferença de variedade do café. Por ser uma análise de imagens dinâmica, os resultados são influenciados pela posição da partícula e a forma projetada durante sua queda, o que pode ter superestimado sua esfericidade. Além disso, o fato de o café despulpado ainda não estar totalmente seco também pode ter provocado um

inchamento no grão após a retirada do pergaminho e ter influenciado no aumento de sua esfericidade.

Tabela 4.1 - Distribuição granulométrica e aspectos morfológicos do café despulpado, obtidos pelo Camsizer®

Distribuição granulométrica	
Diâmetro (D) [mm]	Fração menor que D (X) [%]
9,6	100,0
9,0	99,8
8,4	99,2
7,8	95,4
7,2	81,4
6,6	59,8
6,0	40,7
5,4	23,9
4,8	12,1
4,2	3,0
3,6	0,2
3,0	0,1
-	0,0
Propriedade física	Resultado
\overline{D}_s [mm]	5,99 ± 0,09
φ	0,89 ± 0,06
Simetria	0,94 ± 0,05
RA	0,69 ± 0,03

\overline{D}_s é o diâmetro médio de Sauter, φ a esfericidade e a RA a razão de aspecto do café.

Porém, quanto maior a esfericidade melhor será o escoamento do material no tambor e, em se tratando do secador roto-aerado, este é um resultado desejável. Os resultados de simetria, razão de aspecto e diâmetro de Sauter corroboraram com a forma semi-elipsoide do grão e estão de acordo com o esperado e dentro das limitações de aplicação do secador. O material não apresentou problemas de escoamento dentro do secador nem aglomerações indesejáveis.

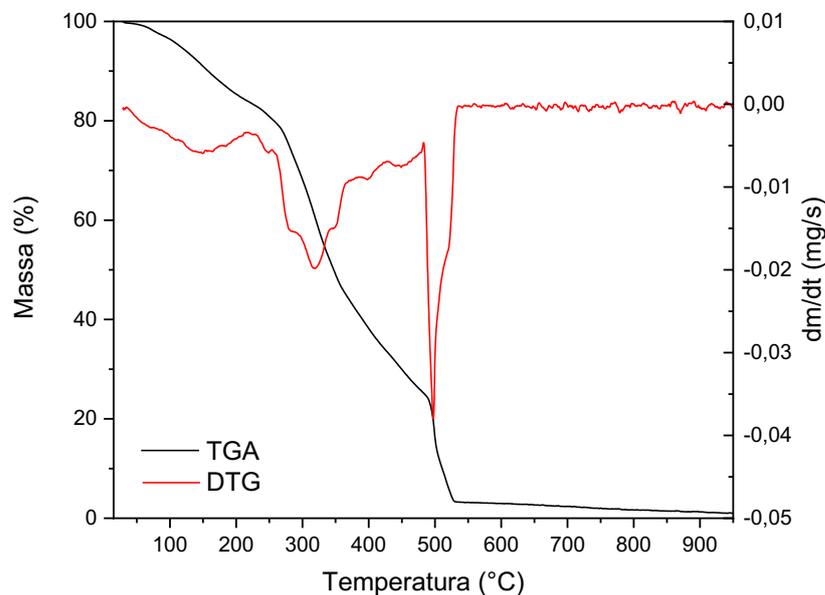
O café também foi caracterizado pela análise termogravimétrica. Os resultados das curvas de termogravimetria (TGA) e de sua primeira derivada em relação ao tempo (DTG) são apresentadas na Figura 4.1. No gráfico é possível identificar três regiões nas quais se encontram perdas de massa acentuadas e degradações.

A primeira região possui um pico por volta de 150 °C (secagem). No seu primeiro estágio (20–130 °C), ocorre uma evaporação significativa da água. Quando a temperatura é elevada por volta de 130-140 °C, os grãos começam a mudar sua estrutura e cor, pois há início do processo de escurecimento não enzimático (GRZELCZYK et al., 2022). Compostos voláteis

(como furanos, pirazinas, piridinas) e não voláteis são criados nestas reações de Maillard, as quais incluem a degradação de Strecker, que cria cetonas, muitas vezes com sabores amanteigados e caramelizados (HII; BORÉM, 2019).

Na etapa seguinte (140–160 °C), ocorre perda de massa com expansão simultânea do volume do grão, o que resulta no aparecimento de rachaduras e, conseqüentemente, quebra do grão (BRZEZIŃSKA et al., 2021; GRZELCZYK et al., 2022). Isso é devido à formação de vapor e gás, que causam uma alta pressão dentro das células do grão de café e induz o inchaço, já que a porosidade não é suficiente para permitir que o vapor e o gás escapem sem que haja um acúmulo de pressão. De acordo com o tipo de café, tempo e grau de torra, o aumento do volume pode mais que dobrar (HII; BORÉM, 2019). Nesta fase, inicia-se a formação de compostos aromáticos e a degradação parcial de ácidos clorogênicos (BRZEZIŃSKA et al., 2021; GRZELCZYK et al., 2022).

Figura 4.1 - Curva termogravimétrica (TGA) e termogravimétrica derivada (DTG) do café arábica despulpado



Fonte: De autoria própria (2022).

O segundo estágio tem seu maior ponto de degradação próximo de 320 °C (torrefação), no qual há continuidade das reações de Maillard, além de hidrólise, caramelização e formação de mais voláteis (BRZEZIŃSKA et al., 2021; GRZELCZYK et al., 2022; HII; BORÉM, 2019). A caramelização também é um conjunto complexo de reações de escurecimento não enzimático

que ocorrem exclusivamente com açúcares, mas estas reações são mais lentas que as reações de Maillard e requerem temperaturas mais altas, cerca de 160 a 200 °C (HII; BORÉM, 2019). Esta região também está relacionada à degradação de lipídeos, aminoácidos, açúcares e polissacarídeos. Isto se deve à despolimerização da hemicelulose e à decomposição do óleo e dos polissacarídeos do café (GRZELCZYK et al., 2022).

Por fim, no último estágio, com perda mássica em 500 °C, ocorre a degradação da celulose (GRZELCZYK et al., 2022). Grzelczyk et al. (2022) e Brzezińska et al. (2021) investigaram as propriedades termogravimétricas do café e identificaram esses três estágios em faixas de temperatura próximas às deste trabalho. As curvas de TGA e DTG foram de extrema importância e trouxeram informações sobre transformações termoquímicas do material, estabelecendo condições de secagem e torrefação e elucidando possíveis efeitos destes processos nos componentes de qualidade do grão.

4.2 Desempenho da secagem de café no roto-aerado

A Tabela 4.2 mostra o tempo de residência (τ , min), a redução de umidade ($-AM$; p.p. b.s.), a taxa de secagem (R_w , g água/(100 g café.min)) e a variação de temperatura (ΔT_s , °C) do café arábica despulpado no roto-aerado, obtidos em cada condição de operação de secagem.

Tabela 4.2 - Resultados da secagem de café arábica despulpado no secador roto-aerado

Experimento	v_f [m/s]	T_f [°C]	W_s [g/min]	τ [min]	$-AM$ [p.p. b.s.]	R_w [g/(100 g.min)]	ΔT_s [°C]
1	3,0	55,0	40	24,36	2,43	0,10	8,5
2	3,0	55,0	60	22,43	2,69	0,12	7,3
3	3,0	75,0	40	25,92	4,57	0,18	14,7
4	3,0	75,0	60	24,00	3,53	0,15	16,7
5	5,0	55,0	40	24,96	2,52	0,10	8,3
6	5,0	55,0	60	21,21	2,71	0,13	8,4
7	5,0	75,0	40	20,66	4,33	0,21	13,9
8	5,0	75,0	60	17,06	4,11	0,24	15,4
9	2,3	65,0	50	21,60	2,87	0,13	12,0
10	5,7	65,0	50	14,60	3,36	0,23	13,3
11	4,0	48,2	50	25,03	2,17	0,09	7,6
12	4,0	81,8	50	26,88	4,46	0,17	17,7
13	4,0	65,0	33	27,47	3,62	0,13	12,2
14	4,0	65,0	67	23,23	3,25	0,14	11,6
15	4,0	65,0	50	24,02	3,44	0,14	11,2
16	4,0	65,0	50	23,67	3,48	0,15	12,4

O tempo médio de residência do material dentro do secador variou de 14,60 a 27,47 min. Este tempo de residência é pequeno quando comparado com outros tipos de secadores utilizados para café, como bomba de calor, secador solar, de bandeja, estufa e liofilizador (COSTA et al., 2021; DONG et al., 2017; KULAPICHITR et al., 2019), que podem requerer tempos de secagem acima de 2 horas, para reduzir a mesma quantidade de pontos percentuais de umidade, para mesma quantidade de massa de sólidos. Isso representa uma redução de até aproximadamente 88 % no tempo de secagem.

O tempo reduzido para a secagem no roto-aerado se deve ao bom contato fluido-partícula (ARRUDA et al., 2009) e isso pode levar a condições adequadas para a manutenção da qualidade do café. É importante frisar também que tempos de secagem prolongados podem resultar na degradação da qualidade do café. Portanto, esta é uma grande vantagem deste secador não convencional e, em se tratando de café especial, esta vantagem pode ser decisiva.

Foi avaliada a influência das variáveis independentes no tempo de residência do material no secador roto-aerado e o resultado é apresentado na Figura 4.2 e na Equação (4.1).

Como pode ser observado, tanto a velocidade do ar quanto a vazão de alimentação de sólidos tiveram efeito linear negativo significativo sobre o tempo de secagem. Esse comportamento era esperado, pois, em velocidades maiores, o ar de secagem no roto-aerado aumenta a velocidade de escoamento dos grãos no secador. A vazão de sólidos tem esse mesmo efeito sobre a velocidade de escoamento, já que a carga de sólidos no secador (*holdup*) não acompanha de forma proporcional a vazão de alimentação, variando muito pouco. Isso faz com que maiores vazões de alimentação promovam uma expulsão mais rápida dos grãos do secador.

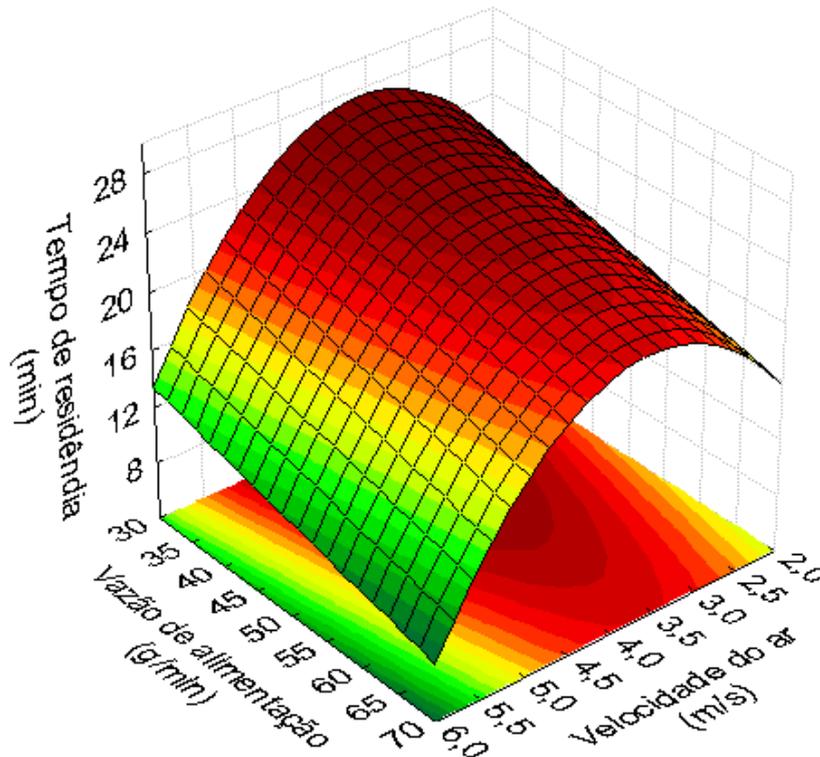
A velocidade do ar também apresenta efeito quadrático significativo, maior que seu efeito linear, pois, em velocidades menores, a ação da rotação e inclinação do tambor é predominante e pode haver um retardo do escoamento do material com aumento da velocidade do ar, atingindo um limite em velocidades intermediárias. Para velocidades mais altas, a velocidade do ar promove um maior arraste do material, diminuindo o seu tempo de residência.

A interação entre a velocidade e a temperatura: do ar também teve um efeito negativo significativo. Para níveis mais altos destas duas variáveis, como o desempenho de secagem foi maior, o grão se encontrava mais leve e foi arrastado de forma mais rápida pelo ar.

A Figura 4.3 mostra as superfícies da redução de umidade, as quais foram geradas pelo modelo reduzido, Equação (4.2). O efeito linear positivo da temperatura do ar foi o mais significativo, o que está de acordo com o esperado, pois aumenta a taxa de secagem. O mesmo acontece em relação à velocidade do ar, mas de forma mais branda, uma vez que são os mecanismos difusivos que controlam a retirada de umidade. A vazão de alimentação também

promoveu um efeito negativo esperado, já que quanto mais material, menor o tempo de residência, menor o contato fluido-partícula e, conseqüentemente, menor o desempenho da secagem.

Figura 4.2 - Superfície de resposta para o tempo de secagem em relação à velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3)



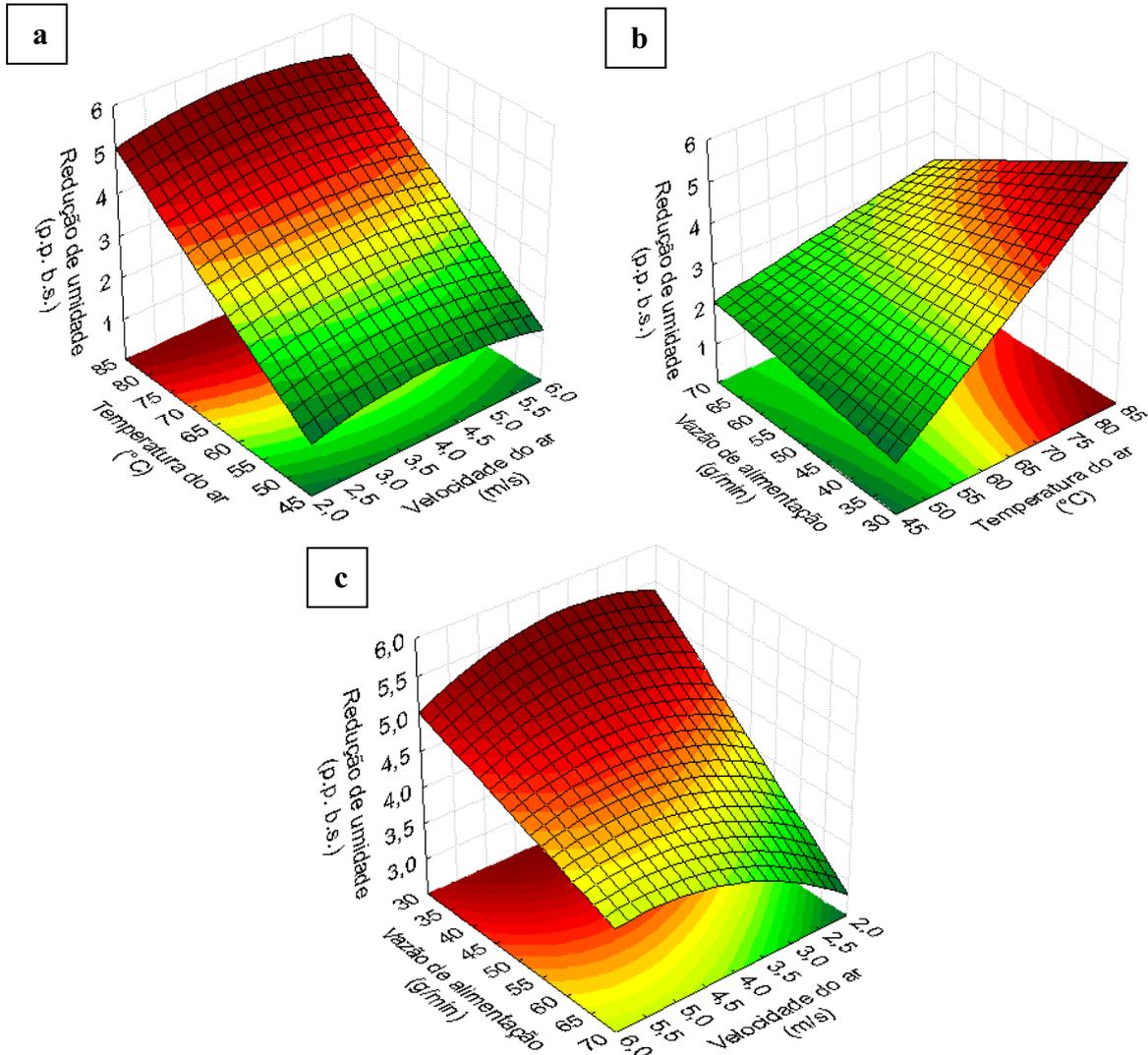
Temperatura do ar (X_2) fixada em 81,8 °C. Fonte: De autoria própria (2022).

$$\tau = 25,04 - 1,80X_1 - 1,34X_3 - 2,46X_1^2 - 1,45X_1X_2; \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0,928; \alpha = 0,1$$

A velocidade do ar também apresentou um efeito quadrático, o que pode ser explicado pelo efeito desta variável no tempo de residência do material, em que, nos níveis mais extremos de velocidade, o tempo de residência foi menor e, portanto, menor foi o desempenho de secagem. A interação entre a temperatura do ar e a vazão de sólidos resultou em um efeito negativo na redução de umidade. Quanto maior a temperatura de secagem e menor a vazão de alimentação, mais efetiva é a secagem. Por fim, a interação da velocidade do ar com a alimentação do café proporcionou um efeito positivo na redução do teor de umidade. Isso foi devido ao fato de que nas menores velocidades e maiores vazões o desempenho da secagem era reduzido.

Figura 4.3 - Superfícies de resposta para a redução de umidade em relação à: (a) velocidade (X_1) e temperatura do ar (X_2); (b) temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3); e (c) velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3)



Vazão de alimentação de sólidos, velocidade e temperatura do ar fixadas em 40 g/min, 2,7 m/s e 81,8 °C nas figuras (a), (b) e (c), respectivamente. Fonte: De autoria própria (2022).

$$-\Delta M = 3,43 + 0,09X_1 + 0,73X_2 - 0,10X_3 - 0,10X_1^2 + 0,09X_1X_3 - 0,21X_2X_3; \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0,976; \alpha = 0,1$$

Avaliando a umidade de entrada do café despulpado no secador com a redução provocada em cada experimento, nota-se que nenhuma condição conseguiu produzir grãos de café com 10 a 12 % b.u. de umidade. Os testes 3 e 12, que obtiveram maior desempenho de secagem, foram os que mais reduziram a umidade do café, alcançando 14,77 e 14,87 % b.u., respectivamente.

Contudo, caso fosse aplicado mais um estágio de secagem nas mesmas condições estudadas, considerando um poder de redução de umidade equivalente para cada ensaio, os grãos de café dos experimentos 3, 7, 8 e 12 atingiriam o nível ideal de umidade para o seu armazenamento e comercialização. Este é um resultado extraordinário, pois com menos de uma hora de secagem, operando o roto-aerado nessas quatro condições, os grãos atingiriam a umidade desejada. Lembrando que este tempo de residência (de aproximadamente 1 h, considerando 2 estágios) ainda é pequeno quando comparado com outros tipos de secadores utilizados para café (COSTA et al., 2021; DONG et al., 2017; KULAPICHITR et al., 2019), os quais requerem tempos de secagem acima de quatro horas, para reduzir a mesma quantidade de pontos percentuais de umidade, para mesma quantidade de massa de sólidos.

Caso fosse aplicado um 3º estágio de secagem, quase todas as condições operacionais no roto-aerado proporcionariam grãos de café na faixa de umidade indicada, com exceção do experimento 11, de menor temperatura, que necessitaria de um 4º estágio. Mais estudos são necessários para confirmar esse comportamento com a aplicação de mais estágios e de como a qualidade do café seria afetada após a aplicação de cada um desses estágios adicionais. Uma alternativa, para proporcionar um produto dentro da umidade recomenda de armazenamento, seria utilizar uma matéria-prima (café despulpado) com menor umidade para a sua secagem no roto-aerado.

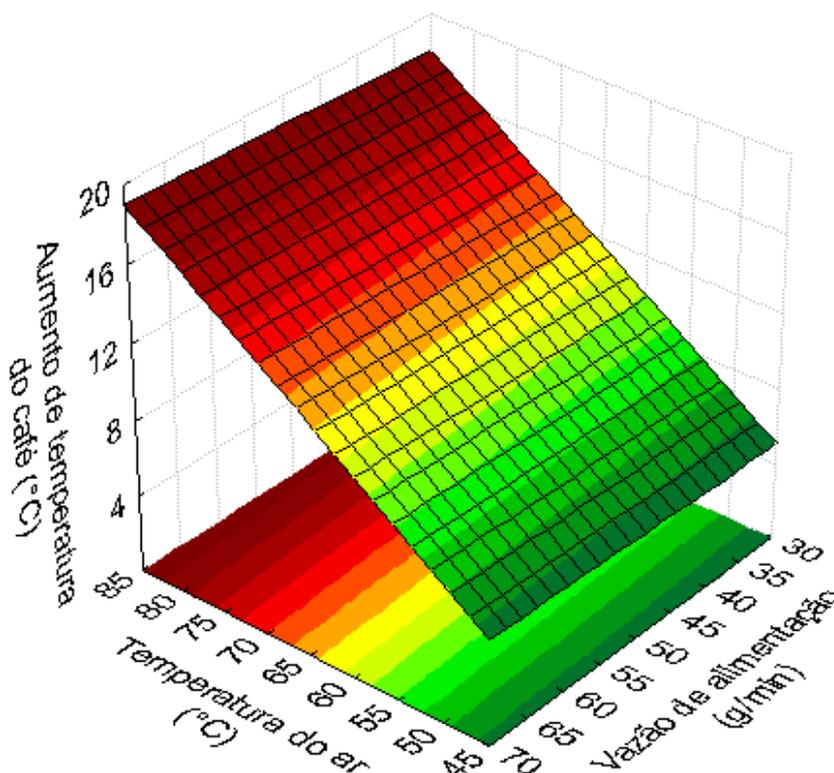
Relacionando o tempo de secagem com a redução de umidade, foi possível observar que a taxa de secagem (Tabela 4.2) foi aumentando de acordo com o aumento da velocidade e temperatura do ar de secagem. Já a alimentação de sólidos teve pouca influência na taxa. As taxas de secagem obtidas no secador roto-aerado variaram de 0,09 a 0,24 g água/100 g café seco/min e foram muito superiores às obtidas para o café em outras técnicas de secagem, que estão dentro de uma faixa entre 0,002 e 0,116 g água/(100 g café seco.min) (ou p.p./min) (ALVES et al., 2013, 2017; DONG et al., 2017; KULAPICHITR et al., 2019), evidenciando-se, assim, um grande potencial do secador desenvolvido para secagem de café arábica despulpado.

A temperatura média de entrada do café no secador foi de $32,4 \pm 2,0$ °C. Houve um aumento de 7,3 a 17,7 °C na temperatura do grão ao final da secagem no roto-aerado, dentro das condições experimentais estudadas. Os experimentos com maiores desempenho de secagem também representaram maior desvio da energia para o aquecimento do material.

A Figura 4.4 e a Equação (4.3) mostram como as condições de secagem influenciam na temperatura do sólido. A temperatura do ar de secagem apresentou um efeito positivo, o que está dentro das expectativas, e foi o único efeito linear significativo. Além do mais, foi o efeito

com maior influência na temperatura do café. Além deste, a interação da temperatura do ar com a vazão de café também resultou em um efeito positivo na variação de temperatura do grão. Isso se deve principalmente ao fato de que nas maiores vazões e menores temperaturas, a variação ou aumento de temperatura do material é menor.

Figura 4.4 - Superfície de resposta para a variação de temperatura em relação à temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3)



Velocidade do ar (X_1) fixada em 2,7 m/s. Fonte: De autoria própria (2022).

$$\Delta T_s = 11,9 + 3,3X_2 + 0,6X_2X_3; \quad (4.3)$$
$$R^2 = 0,950; \alpha = 0,1$$

Como a temperatura do café pode ser elevada até 45 °C para os cafés commodity e 40 °C para os cafés especiais durante a secagem (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014), após a avaliação dos resultados, poderia ser indicadas temperaturas do ar de secagem de até 55 °C para a produção de cafés especiais e temperaturas de até 65 °C para a produção de cafés tipo commodity, considerando uma temperatura inicial do café de 32 °C aproximadamente. Porém, esta avaliação é feita em relação apenas à temperatura do grão exposto a processos de secagem que exigem tempos muito prolongados e em que se tenha verificado que a qualidade do grão tenha sido afetada. Para se fazer essa correlação para o roto-aerado, algumas análises de

qualidade foram realizadas e discutidas no item 4.4. Em geral, a maior diminuição da umidade do café está associada a condições que levam a uma alta taxa de secagem e, conseqüentemente, maior aquecimento do café. Portanto, uma atenção especial a esta condição deve ser tomada caso haja interesse na produção de cafés especiais.

4.3 Modelagem matemática e simulação do processo de secagem

O modelo de Page, com inclusão da relação de Arrhenius para o efeito da temperatura, foi ajustado aos dados experimentais e estimou-se o valor de seus parâmetros, os quais são mostrados nas Equações (4.4) e (4.5). O modelo ajustado a seguir explica 90,9 % ($R^2=0,909$) da variação do fator dependente (MR).

$$MR = \exp(-kt^{0,659}) \quad (4.4)$$

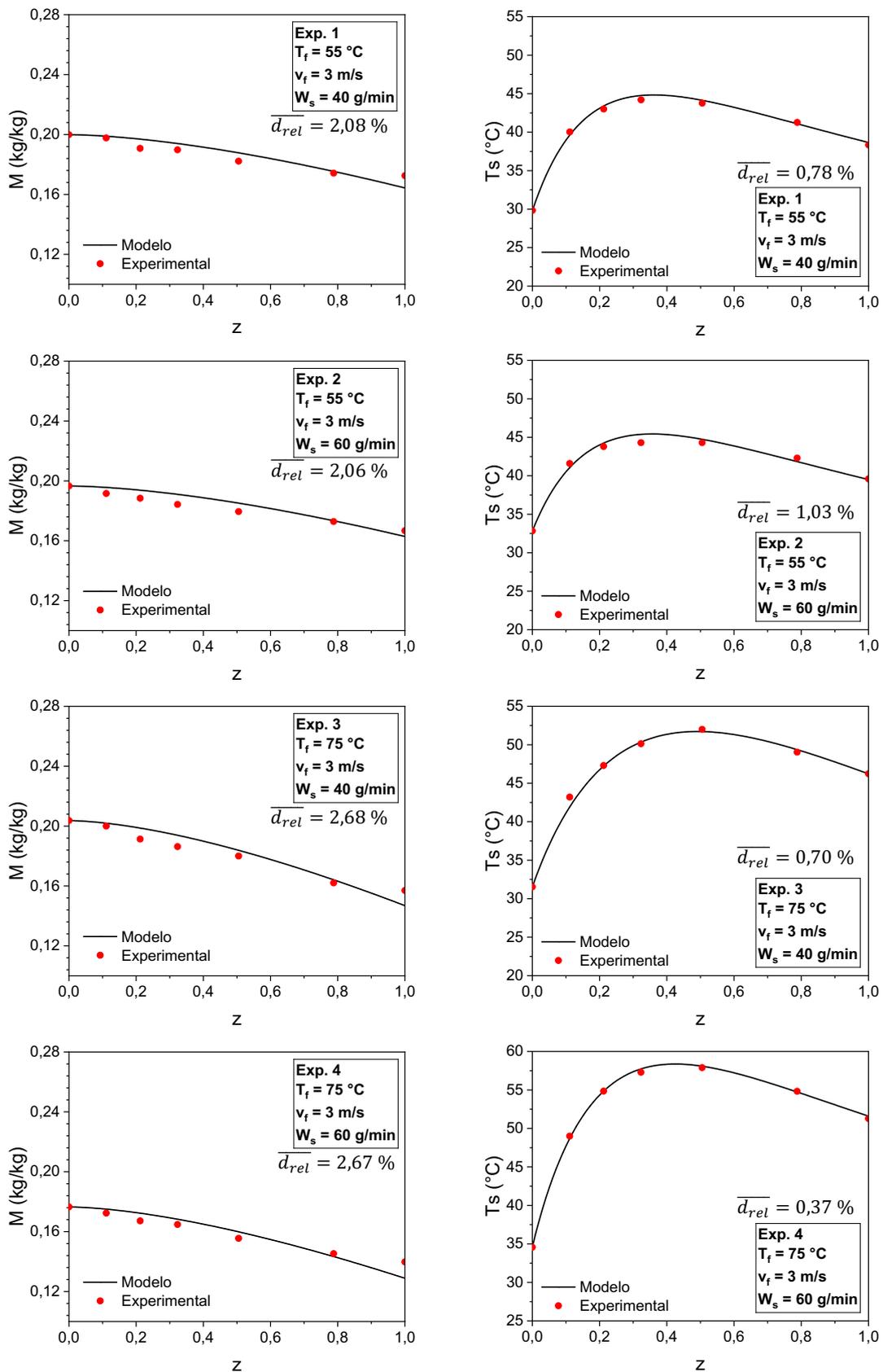
$$k = 7,70 \exp\left(-\frac{20958,91}{RT_f}\right) \quad (4.5)$$

O coeficiente global de transferência de calor também foi ajustado, Equação (4.6), para levar em consideração as propriedades intrínsecas ao material e as diferentes condições experimentais do que as utilizadas por Arruda (2008). O modelo ajustado a seguir explica 88,8 % ($R^2=0,888$) da variação do fator dependente (U_{va}).

$$U_{va} = 42,509 G_f^{0,057} G_s^{0,916} \quad (4.6)$$

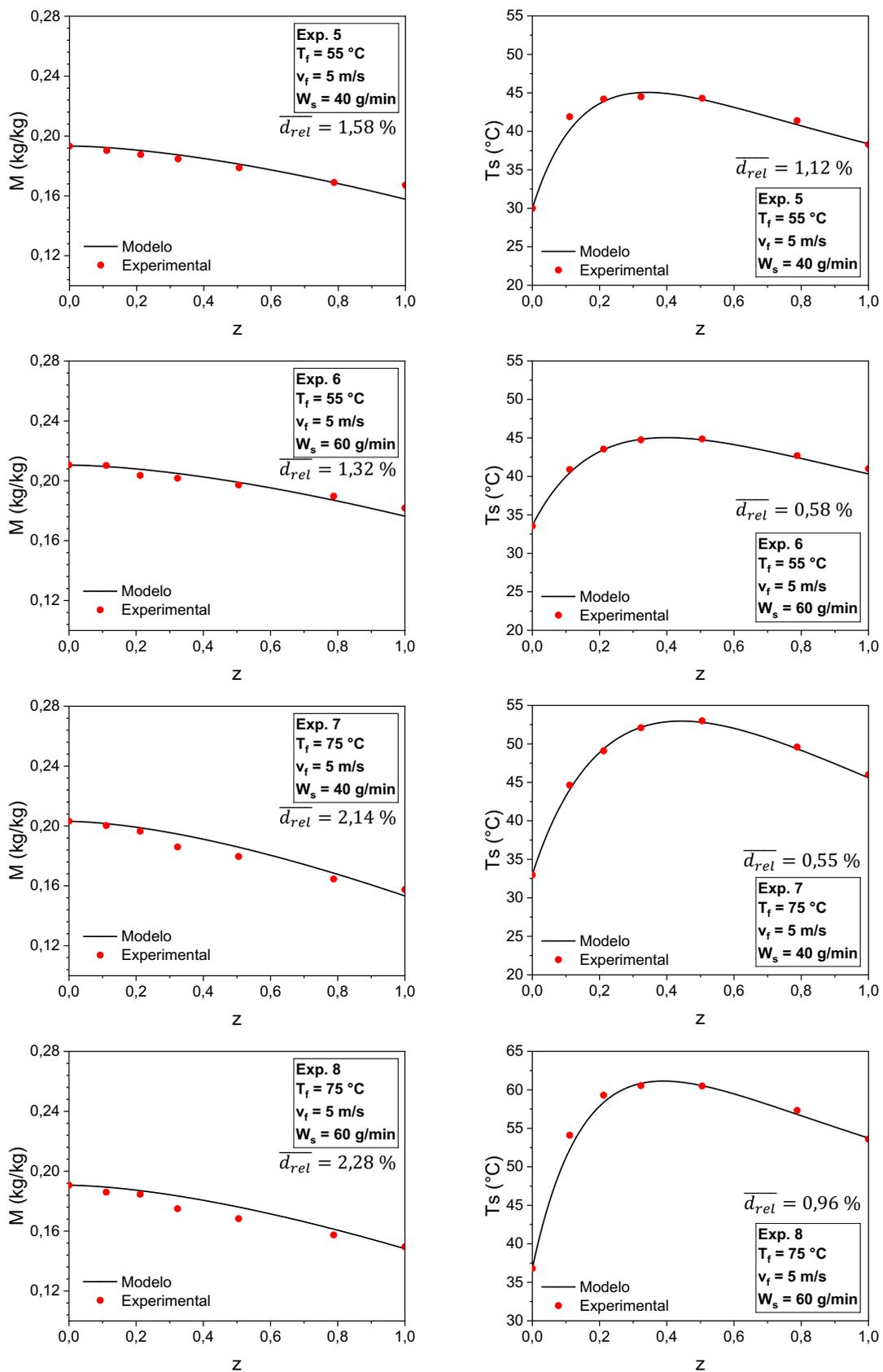
Assim, o comportamento cinético de secagem do café em diferentes temperaturas, como também a troca de calor, entre o café e o ar de secagem, podem ser descritos por estas equações, as quais foram introduzidas na modelagem do modelo a duas fases, conforme descrito na seção 3.3.3, como equações constitutivas para resolução do problema de valor de contorno e a conseqüente simulação do processo de secagem. As Figuras Figura 4.5 a Figura 4.8 mostram os dados experimentais e os resultados das soluções numéricas do modelo (em cada uma das condições de operação) para o teor de umidade e temperatura do café, em diferentes posições axiais do secador (adimensional de comprimento z).

Figura 4.5 - Perfis experimental e simulado para a umidade (M) e temperatura do café (T_s) submetido à secagem em roto-aerado nas condições experimentais de 1 a 4



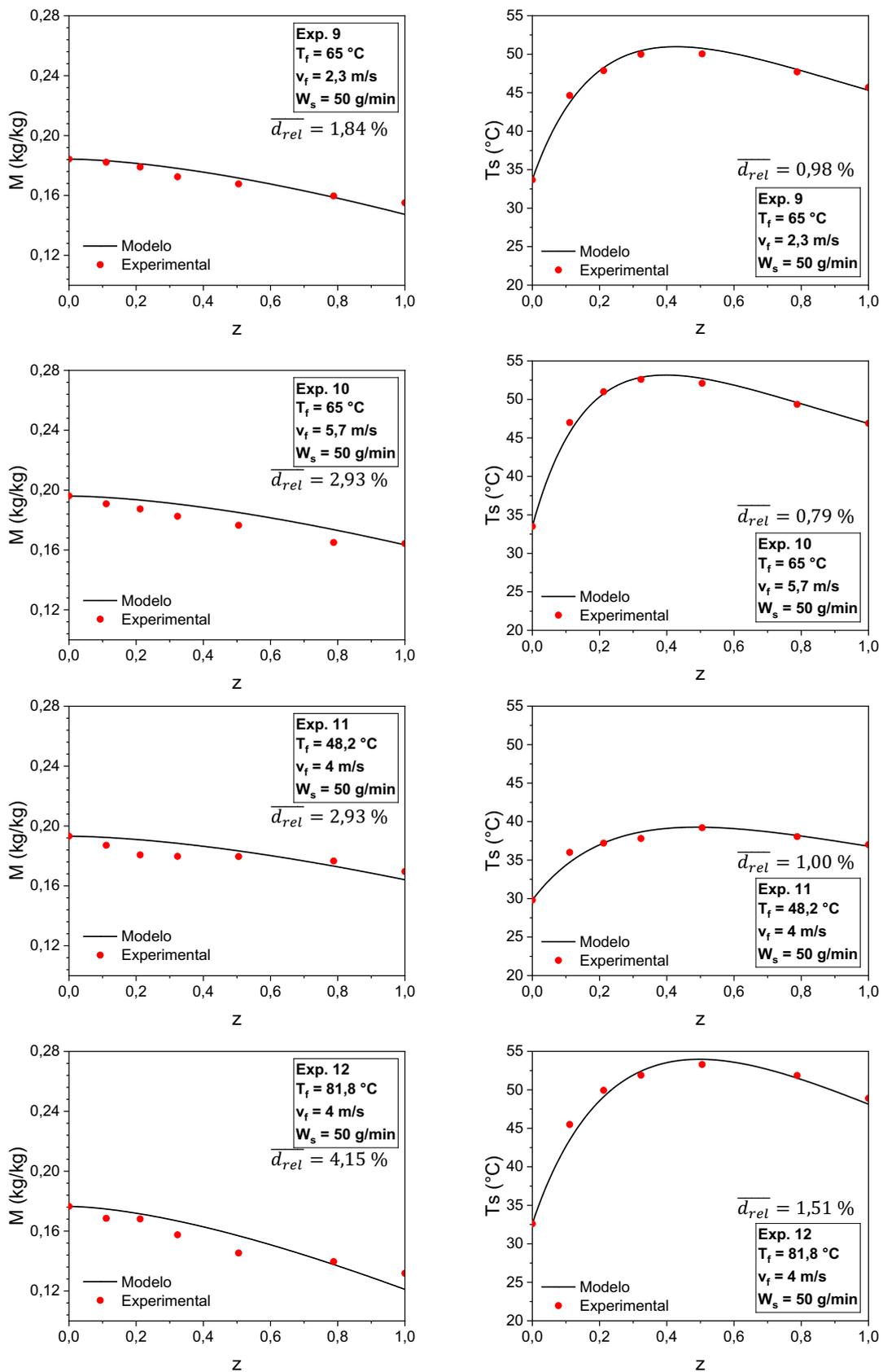
Fonte: De autoria própria (2022).

Figura 4.6 - Perfis experimental e simulado para a umidade (M) e temperatura do café (T_s) submetido à secagem em roto-aerado nas condições experimentais de 5 a 8



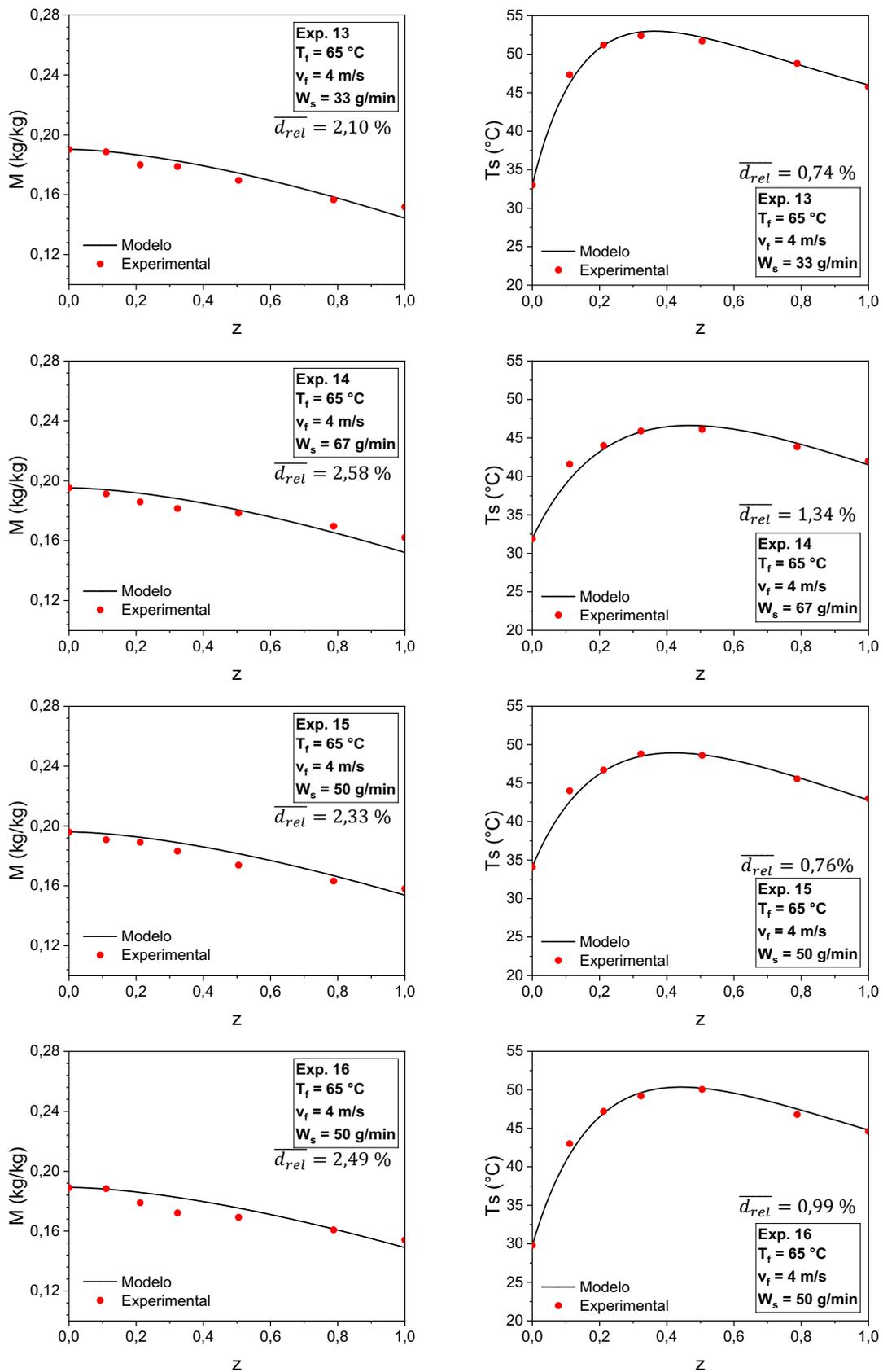
Fonte: De autoria própria (2022).

Figura 4.7 - Perfis experimental e simulado para a umidade (M) e temperatura do café (T_s) submetido à secagem em roto-aerado nas condições experimentais de 9 a 12



Fonte: De autoria própria (2022).

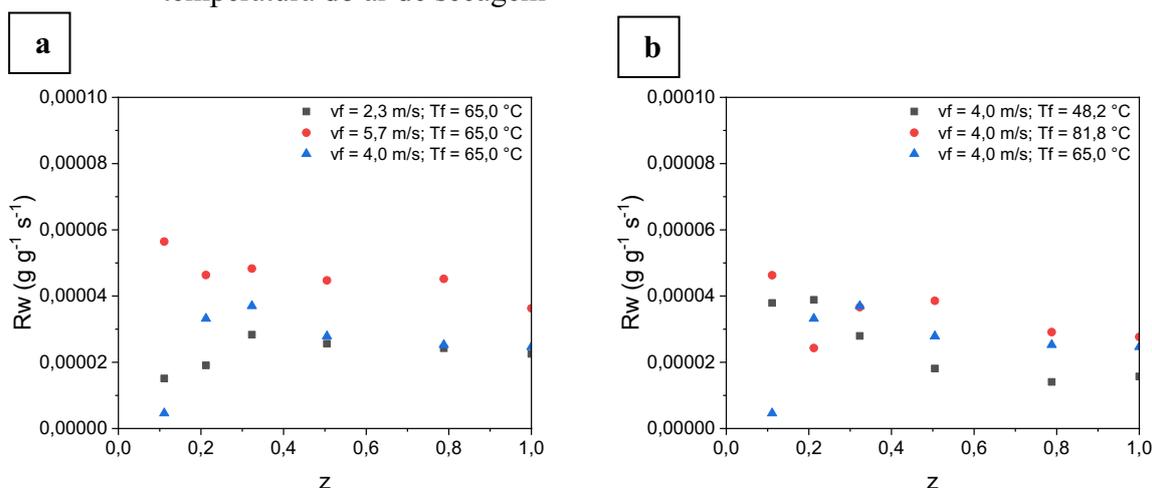
Figura 4.8 - Perfis experimental e simulado para a umidade (M) e temperatura do café (Ts) submetido à secagem em roto-aerado nas condições experimentais de 13 a 16



Fonte: De autoria própria (2022).

Com base nos perfis experimentais e simulados de temperatura e umidade dos grãos, juntamente com as informações da curva de secagem do material, é possível efetuar uma análise física do comportamento da secagem ao longo do equipamento, à luz dos fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa. A partir das informações de taxa de secagem ao longo do secador (curvas de secagem), mostradas na Figura 4.9 em condições operacionais selecionadas, foi possível identificar que a secagem se encontrava, primeiramente, na fase de adaptação ($z \leq 0,2$) e, posteriormente, na fase de taxa decrescente ($z > 0,2$). Esta última fase é caracterizada pela taxa de secagem que reduz acentuadamente à medida que a água é removida, pois o suprimento de água para a superfície está abaixo da taxa de evaporação. O transporte interno é o limitador da taxa de secagem e não a evaporação (BERK, 2018; FELLOWS, 2018; MUJUMDAR, 2006).

Figura 4.9 – Taxas de secagem (R_w) do café despulpado, ao longo do comprimento adimensional do roto-aerado (z), em diferentes condições de (a) velocidade e (b) temperatura do ar de secagem



Ensaio com vazão de alimentação de café de 50 g/min. Fonte: De autoria própria (2022).

Esta transição da fase de adaptação direta para a fase de taxa decrescente é corroborada pela baixa umidade do café arábica despulpado utilizado como matéria-prima. Lembrando que o café passou por uma etapa prévia de secagem em pátio, com remoção do pergaminho, tal que a umidade do material na entrada do secador roto-aerado ficou em torno de 20 % b.s. Este teor de água se encontrava majoritariamente dentro da matriz sólida e não na superfície do grão, de modo que a transferência de água para o ar fosse regida pelo mecanismo difusivo. Além disso, comparando o comportamento dos perfis de temperatura e umidade do café, é possível notar que, na seção inicial do secador ($z \leq 0,2$ aproximadamente), quem governou o processo de secagem foi a transferência de calor, tal que a energia foi transferida principalmente na forma

de calor sensível, não somente para o aquecimento superficial do material como também para o aquecimento da umidade contida nele, que aconteceu de forma bem acentuada, até chegar na temperatura de vaporização. Ao passo que, nesta mesma seção, a redução de umidade do café foi bem suave, pois o desempenho de secagem foi comprometido pelo desvio de energia para o aquecimento do material, até que este entrasse em uma condição de temperatura aproximadamente constante.

Esta condição ocorreu logo após a seção inicial do secador ($z > 0,2$), onde a transferência de massa passou a governar o processo e em que a curva de umidade do grão teve um decaimento mais destacado, pois grande parte da energia, neste momento, foi direcionada para a remoção de água e a temperatura superficial do café possuiu um comportamento de estabilidade, com um leve decaimento na seção final do secador ($z > 0,7$). Esta pequena oscilação/queda de temperatura na seção final do secador pode estar ligada à abertura da saída do secador, a qual permitiu que o ar ambiente resfriasse o grão. O experimento 11 (Figura 4.7), de menor temperatura do ar, reforça essa suposição, já que foi o ensaio em que houve menor decaimento de temperatura do grão, pois o gradiente de temperatura entre o ar de secagem e o ar ambiente foi menor.

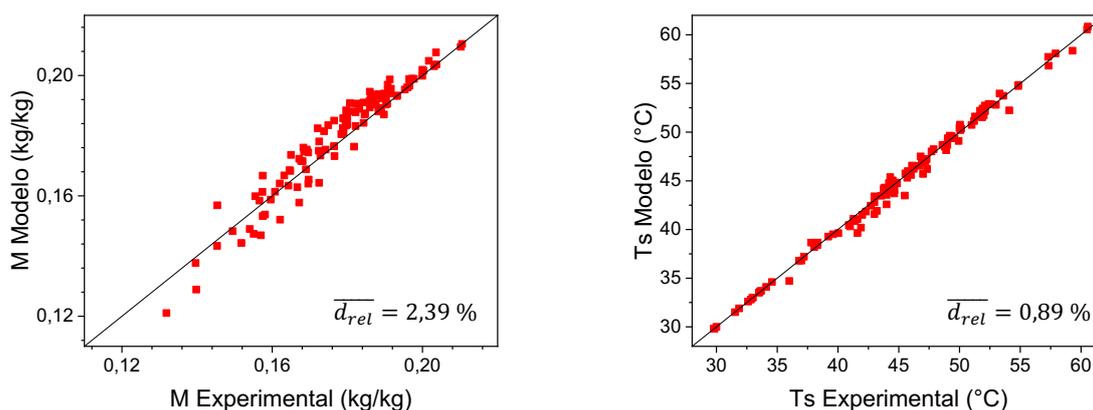
Analisando a adequação do modelo, verifica-se que as diferenças ou desvios entre os valores experimentais e simulados, para os dados de umidade e temperatura do café, mostraram uma boa capacidade do modelo em prever as condições de umidade e temperatura do grão ao longo do secador. O valor médio dos desvios relativos ($\overline{d_{rel}}$) da umidade do café variou de 1,32 a 4,15 %, sendo a condição experimental 6 (Figura 4.6) a que obteve o menor desvio e, a 12 (Figura 4.7), o maior. Nota-se uma tendência de aumento linear da diferença entre os valores experimentais e simulados pelo modelo com o aumento da temperatura de secagem. Esse comportamento pode estar associado à elevação da imprecisão da medida ou por conta da limitação das equações constitutivas em representar as condições reais de cinética e equilíbrio do grão nestas condições mais drásticas e, conseqüentemente, prever as propriedades do café. Entretanto, tendo em vista a preservação da qualidade do café, condições mais brandas devem ser usadas, principalmente quando se tem o objetivo de produção de cafés de qualidade superior, como os cafés especiais (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014).

As diferenças entre os valores experimentais e simulados, para a temperatura do café, foram inferiores àquelas para a umidade, indicando boa precisão da medida ou uma menor influência da limitação das equações constitutivas na previsão do perfil de temperatura do grão ao longo do secador. O valor médio dos desvios relativos para temperatura do café variou de 0,37 a 1,51 %. Nota-se que, neste caso, não houve uma tendência linear de aumento da diferença

entre os valores experimentais e simulados pelo modelo com o aumento da temperatura de secagem, como foi no caso da umidade do café. A previsão do perfil de temperatura do sólido apresentou uma maior aleatoriedade nos desvios, comparando as diferentes condições experimentais. Contudo, a condição de maior temperatura de secagem também foi a que resultou no maior resíduo, podendo esta previsão ter sido influenciada pela mesma limitação das equações constitutivas em descrever o comportamento do material em altas temperaturas, só que em um menor grau de interferência em comparação ao perfil de umidade.

As outras duas variáveis independentes, velocidade do ar de secagem e vazão de alimentação de sólidos no secador, não apresentaram qualquer influência nos resíduos entre os valores observados e os preditos pelo modelo, tanto para a umidade quanto para a temperatura do café arábica despulpado. A modelagem utilizada neste estudo foi capaz de prever bem o comportamento da secagem do café no secador roto-aerado. A Figura 4.10 mostra uma comparação entre os resultados simulados e os respectivos dados experimentais para o teor de umidade e temperatura do café, ao longo do secador, em todas as condições de operação utilizadas neste estudo. O desvio relativo médio dos dados experimentais foi de 2,39 %, para a umidade, e 0,89 % para a temperatura do grão.

Figura 4.10 - Resultados experimentais e simulados para o teor de umidade (M) e temperatura do café (T_s) no secador roto-aerado



Fonte: De autoria própria (2022).

Uma boa previsão da umidade e temperatura do café pode ajudar a encontrar as condições de operação que favorecem a secagem e a preservação de sua qualidade, concomitantemente. Diferenças na temperatura do café podem resultar em um produto com diferentes níveis de qualidade também. Ao secar café, é importante utilizar temperaturas nas quais a sua viabilidade não seja prejudicada (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014).

4.4 Qualidade físico-química do grão

Para avaliação da qualidade físico-química do grão de café foram utilizados alguns dos marcadores indicados na Tabela 2.5, baseados em trabalhos que correlacionaram a composição do café cru com a qualidade da xícara de café (BARBOSA et al., 2019; DE MELO PEREIRA et al., 2019; DONG et al., 2017, 2019; FARAH et al., 2006; FRANCA; MENDONÇA; OLIVEIRA, 2005; KULAPICHITR et al., 2019, 2022). Alguns resultados estão dispostos na Tabela 4.3. Ela compara as condições da matéria-prima (atividade de água, temperatura do café, acidez total titulável e razão de sacarose pela ATT) com os resultados do café após cada procedimento de secagem. A composição de açúcares e ácidos orgânicos estão apresentados nas subseções 4.4.1 e 4.4.2, respectivamente.

Tabela 4.3 - Resultados de análises físico-químicas de qualidade do café despulpado no secador roto-aerado, antes e após cada ensaio de secagem

Matéria-prima				A_w	T_s [°C]	ATT [mL/100 g]	S/ATT
Café despulpado úmido (CDU)				0,765 ± 0,018	32,4 ± 2,0	163,1 ± 10,9	10,87
Exp.	v_f [m/s]	T_f [°C]	W_s [g/min]	$A_w(1)$	$T_s(1)$ [°C]	ATT(1) [mL/100 g]	S/ATT(1)
1	3,0	55,0	40	0,727	40,9	166,3	6,01
2	3,0	55,0	60	0,720	39,7	146,3	12,51
3	3,0	75,0	40	0,687	47,1	173,2	9,47
4	3,0	75,0	60	0,678	49,2	161,2	9,36
5	5,0	55,0	40	0,716	40,7	175,2	7,47
6	5,0	55,0	60	0,735	40,9	157,6	11,92
7	5,0	75,0	40	0,684	46,3	164,1	7,69
8	5,0	75,0	60	0,700	47,8	143,3	7,66
9	2,3	65,0	50	0,710	44,5	144,7	10,12
10	5,7	65,0	50	0,713	45,7	145,1	8,87
11	4,0	48,2	50	0,723	40,0	146,0	9,77
12	4,0	81,8	50	0,677	50,1	141,7	8,47
13	4,0	65,0	33	0,673	44,6	187,8	6,71
14	4,0	65,0	67	0,716	44,1	159,4	10,65
15	4,0	65,0	50	0,706	43,6	145,2	9,10
16	4,0	65,0	50	0,704	44,9	144,3	9,22

$A_w(1)$ é a atividade de água do café secado em cada condição experimental; $T_s(1)$ é a temperatura de saída do café do secador; ATT(1) é a acidez total titulável após a secagem em base seca; e S/ATT(1) é a relação entre sacarose e ATT após a secagem em base seca

Primeiramente, o pH dos tratamentos variou de 5,69 a 5,77, que são valores dentro da faixa de pH da matéria-prima, que foi de $5,74 \pm 0,11$. Isto indica que o pH do café não sofreu nenhuma alteração durante qualquer um dos testes de secagem realizados, em comparação com

o café de entrada no secador. Estes valores estão dentro ou próximos dos valores de referência para uma boa qualidade da bebida de café, em que, para o pH, está entre 5,5 e 5,72 (Tabela 2.5).

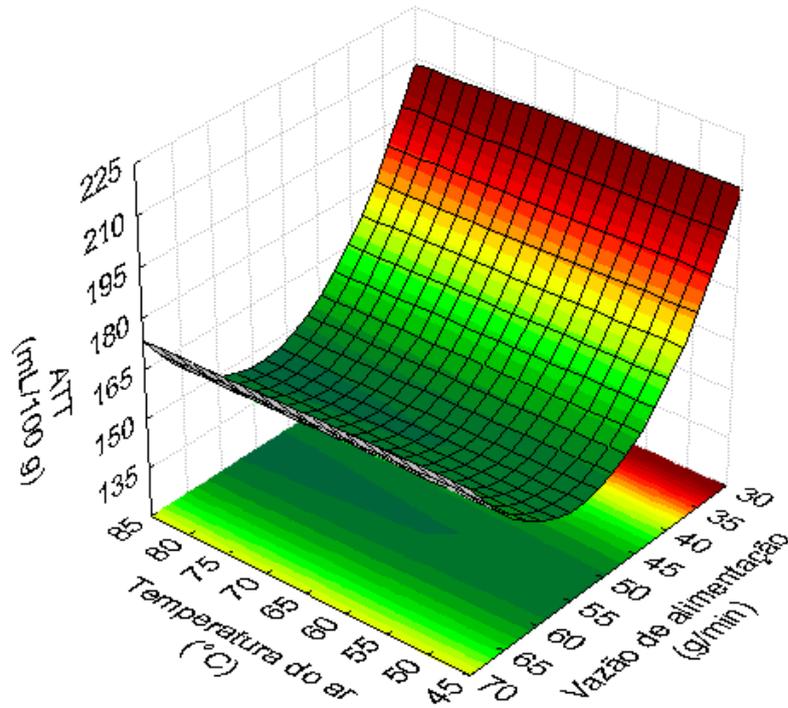
Os resultados para a atividade de água após a secagem apresentaram comportamento semelhante àqueles para a redução de umidade. O maior poder de redução foi nos experimentos em que a temperatura do ar de secagem estava em seus maiores níveis e a vazão de sólidos no seu menor patamar. A velocidade do ar não teve efeito sobre os resultados. A Specialty Coffee Association (SCA) especifica que a atividade de água do grão de café cru de grau especial deve estar abaixo de 0,7 (HII; BORÉM, 2019). Os experimentos 3, 4, 7, 8, 12 e 13 atingiram esse patamar.

A temperatura do grão após a secagem já foi discutida na seção 4.2, mas é trazida novamente aqui para que se possa fazer uma correlação mais direta entre a temperatura final do grão e sua qualidade, no caso da secagem em roto-aerado. Lembrando que, idealmente, a temperatura do café pode ser elevada até 45 °C para os cafés commodity e 40 °C para os cafés especiais durante a secagem, de modo a preservar sua qualidade (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014). Contudo, é possível verificar que tanto para a ATT quanto para S/ATT, os valores resultantes estão dentro da faixa de referência (Tabela 2.5) com relação positiva à qualidade da bebida (<287,33 mL/100 g e >5,93 para ATT e S/ATT, respectivamente). Isto independentemente da condição de temperatura do ar aplicada. Ou seja, mesmo o café ultrapassando 40 ou 45 °C durante alguns experimentos de secagem, o tempo de exposição foi tão baixo que não foi capaz de diminuir a qualidade do grão, no tocante a acidez e no seu equilíbrio com a doçura.

Por conta disso, é mais interessante utilizar os componentes do café como marcadores de sua qualidade e correlacioná-los com as condições de operação do secador roto-aerado, do que utilizar apenas o valor de temperatura do café como referência de qualidade, pois cada técnica de secagem influencia a qualidade do grão de forma diferente.

A Figura 4.11 e a Equação (4.7) revelam que a acidez total titulável é fortemente influenciada pela vazão de alimentação de café no secador. Os níveis mais baixos dessa variável independente fazem com que a acidez aumente. Isso pode estar relacionado ao fato de que nestas condições o tempo de residência é maior e, portanto, a probabilidade de formação de compostos indesejáveis, como a concentração de ácidos, também aumenta. Para confirmar essa suposição, os resultados de acidez e do tempo de residência foram plotados em um mesmo gráfico (Figura 4.12). Como pode-se perceber, a ATT foi maior nos experimentos em que a vazão de alimentação foi menor (experimentos 1, 3, 5, 7 e 13), os quais obtiveram um dos maiores tempos de secagem.

Figura 4.11 - Superfície de resposta para a acidez total titulável (ATT) em relação à temperatura do ar (X₂) e vazão de alimentação de sólidos (X₃)

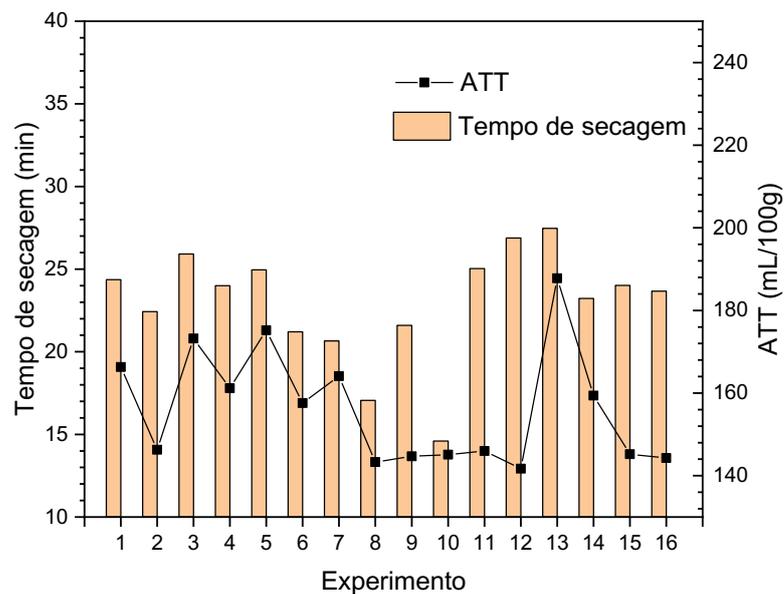


Velocidade do ar (X₁) fixada em 2,7 m/s. Fonte: De autoria própria (2022).

$$ATT = 147,1 - 8,7X_3 + 10,9X_3^2 - 5,9X_1X_2; \quad (4.7)$$

$$R^2 = 0,937; \alpha = 0,1$$

Figura 4.12 - Relação entre tempo de secagem e ATT (base seca)

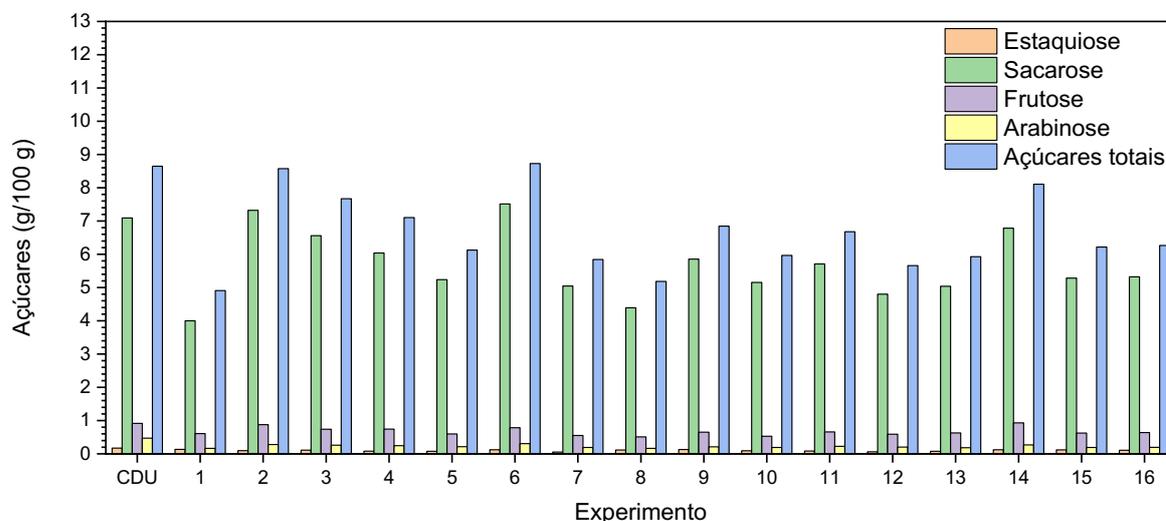


Fonte: De autoria própria (2022).

4.4.1 Composição de açúcares

A composição de açúcares é um dos aspectos mais importantes na questão da qualidade do café, pois esse grupo participa de reações primordiais durante a torrefação e criação dos principais aromas do café (BARBOSA et al., 2019; HII; BORÉM, 2019). Durante a análise de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), apenas quatro açúcares foram identificados e quantificados, sendo eles, na ordem da maior concentração para a menor, a sacarose, a frutose, a arabinose e a estaquiase. A quantidade de açúcares totais considerada foi a soma destes quatro componentes. O resultado da composição de açúcares em cada um dos experimentos está apresentado na Figura 4.13. Como marcadores de qualidade do grupo dos açúcares, baseado nos componentes da Tabela 2.5, estão a sacarose, o açúcar predominante no café e precursor importante nas reações de Maillard e caramelização, e a quantidade de açúcares totais.

Figura 4.13 - Teores de açúcares do café despulpado úmido (CDU) e após cada condição de secagem no roto-aerado (base seca)

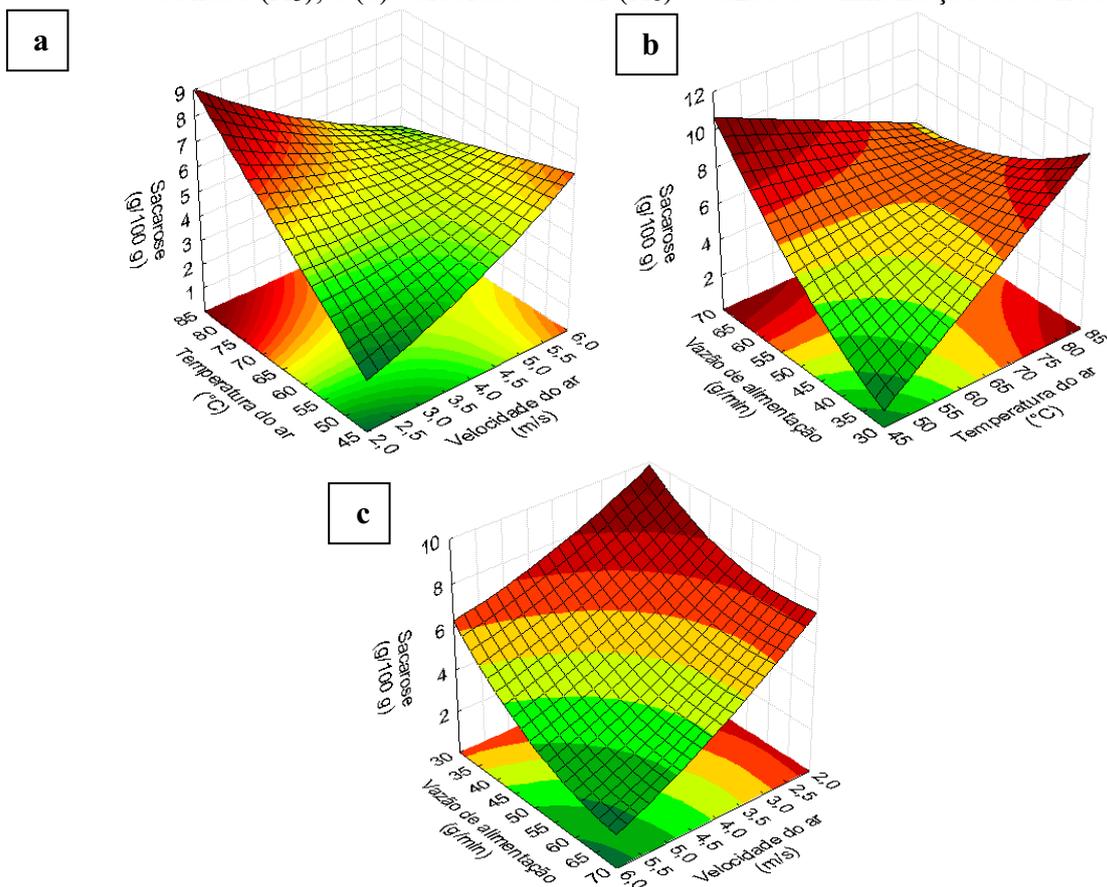


Fonte: De autoria própria (2022).

Comparados ao café despulpado úmido (CDU), os experimentos 2, 6 e 14 conseguiram preservar a composição de açúcares do café arábica. Este resultado está relacionado principalmente às condições de temperatura de secagem e vazão de alimentação de café, utilizadas nesses experimentos, e sua interação no secador. Comparando com os valores de referência de qualidade (Tabela 2.5), apenas os experimentos 2, 6 e 14 conseguiram atingir a concentração mínima de sacarose ($> 6,76$ g/100 g) para que se tenha uma boa qualidade da bebida. Com relação aos açúcares totais, o experimento 3 também atingiu o teor mínimo ($>$

7,40 g/100 g) e se junta aos três experimentos citados anteriormente. Essas quatro condições experimentais resultaram em teores de sacarose muito superiores aos apresentados por outras técnicas de secagem, os quais ficaram em uma faixa de 3,71-5,28 g/100 g no trabalho de Kulapichitr et al. (2019). Isso mostra que além de ter um desempenho de secagem superior a outros secadores, o roto-aerado também consegue preservar componentes importantes de qualidade do café, como o teor de açúcar. Para produção de cafés especiais, esse é um aspecto muito importante. Para entender melhor a influência das variáveis independentes na concentração de sacarose do café, as superfícies de resposta e o modelo de regressão são apresentados na Figura 4.14 e Equação (4.8), respectivamente.

Figura 4.14 - Superfícies de resposta para o teor de sacarose em relação à: (a) velocidade (X_1) e temperatura do ar (X_2); (b) temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3); e (c) velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3)



Vazão de alimentação de sólidos, velocidade e temperatura do ar fixadas em 40 g/min, 2,7 m/s e 81,8 °C nas figuras (a), (b) e (c), respectivamente. Fonte: De autoria própria (2022).

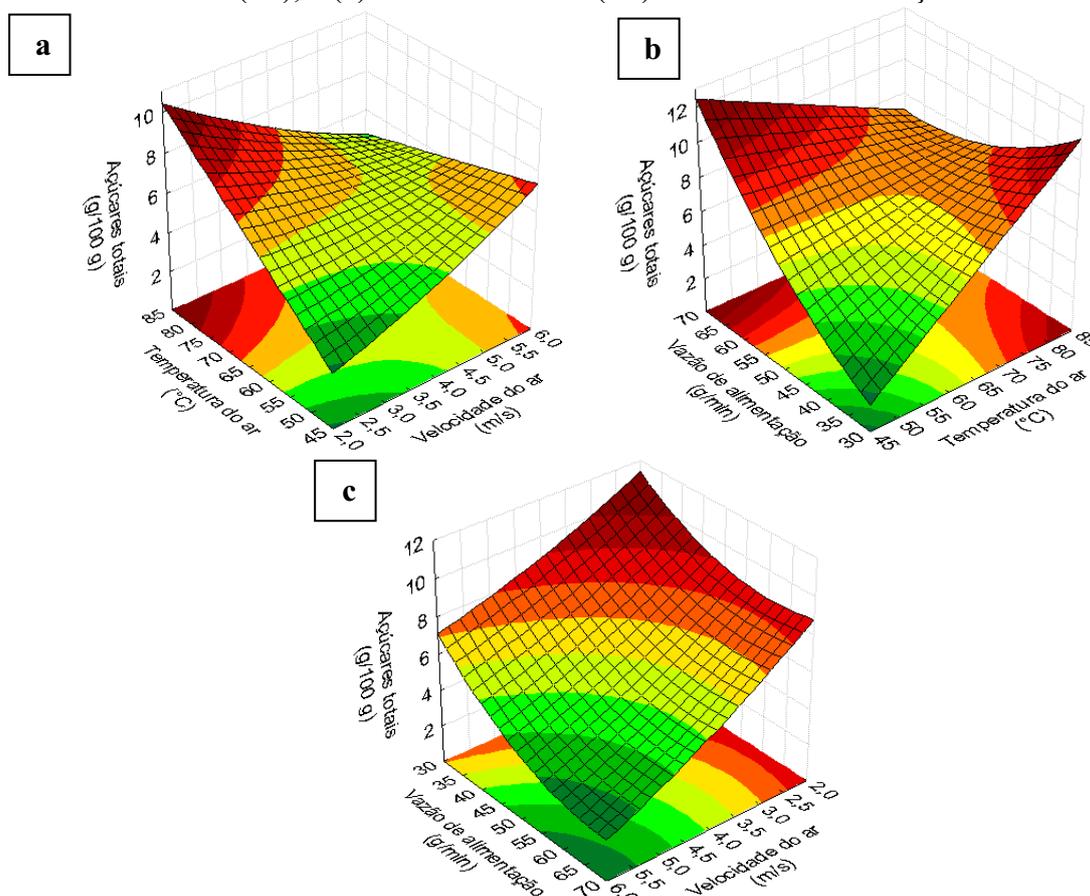
$$\begin{aligned} \text{Sacarose} = & 5,33 - 0,21X_1 - 0,26X_2 + 0,54X_3 + 0,10X_1^2 + 0,25X_3^2 - \\ & 0,57X_1X_2 - 0,15X_1X_3 - 0,85X_2X_3; \end{aligned} \quad (4.8)$$

$R^2 = 0,984$; $\alpha = 0,1$

Tanto as velocidade e temperatura do ar de secagem assim como a vazão de alimentação de sólidos resultaram em efeitos lineares significativos na resposta de concentração de sacarose. A velocidade e a temperatura do ar provocaram um efeito negativo, ou seja, quanto maiores seus níveis, menor o teor de sacarose. Já a vazão de sólido provocou um efeito positivo, proporcionando maiores teores de sacarose nos seus maiores níveis. Estes efeitos são opostos aos desejáveis para um melhor desempenho de secagem do café, como explicado no item 4.2.

É possível que estas condições de operação de melhor desempenho de secagem também tenham favorecido melhores condições para que ocorresse intensa atividade metabólica dos grãos. Estas atividades incluem reações de interconversão de açúcares de baixo peso molecular e podem diminuir a presença dos açúcares quantificados em HPLC (BYTOF et al., 2005; KNOPP; BYTOF; SELMAR, 2006; SELMAR et al., 2006). O mesmo comportamento da sacarose se repete para o teor de açúcares totais, Figura 4.15 e Equação (4.9), já que é profundamente influenciado pela quantidade de sacarose, que é o principal açúcar.

Figura 4.15 - Superfícies de resposta para o teor de açúcares totais em relação à: (a) velocidade (X_1) e temperatura do ar (X_2); (b) temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3); e (c) velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3)



Vazão de alimentação de sólidos, velocidade e temperatura do ar fixadas em 40 g/min, 2,7 m/s e 81,8 °C nas figuras (a), (b) e (c), respectivamente. Fonte: De autoria própria (2022).

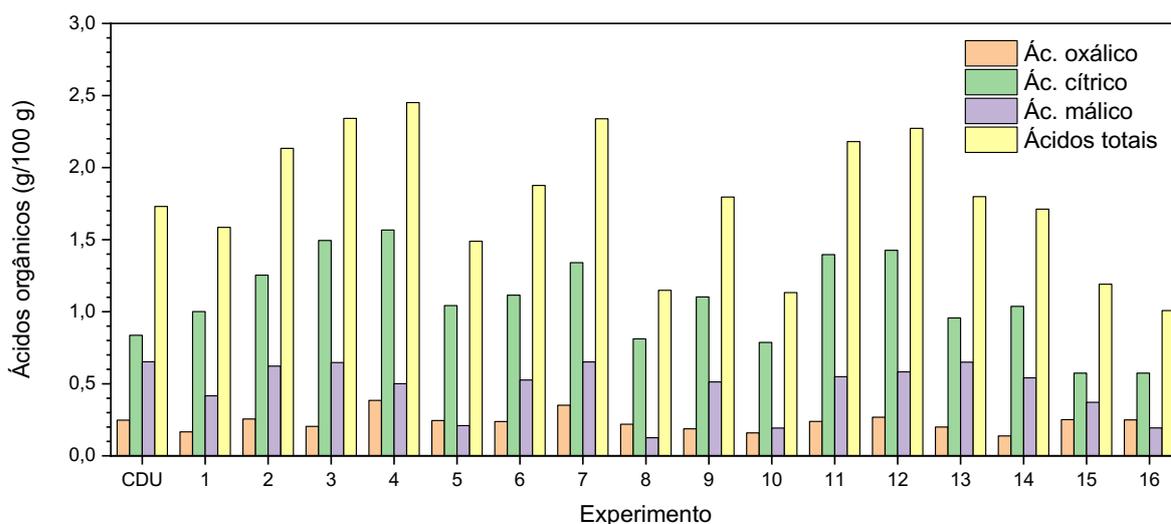
$$\begin{aligned} \text{Açúcares totais} &= 6,26 - 0,28X_1 - 0,31X_2 + 0,64X_3 + 0,10X_1^2 + 0,32X_3^2 - \\ &0,64X_1X_2 - 0,15X_1X_3 - 0,94X_2X_3; \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$R^2 = 0,986; \alpha = 0,1$$

4.4.2 Composição de ácidos

Os ácidos orgânicos foram analisados pela técnica de HPLC, que é a mais indicada para estes compostos (JHAM et al., 2002). Apenas três ácidos foram identificados e quantificados no material: ácidos cítrico, málico e oxálico (Figura 4.16). A soma dos três representaram a quantidade de ácidos orgânicos totais. Estes ácidos esperados na composição do café, sendo o cítrico e o málico os mais predominantes.

Figura 4.16 - Teores de ácidos orgânicos do café despulpado antes e após cada condição de secagem no roto-aerado (base seca)



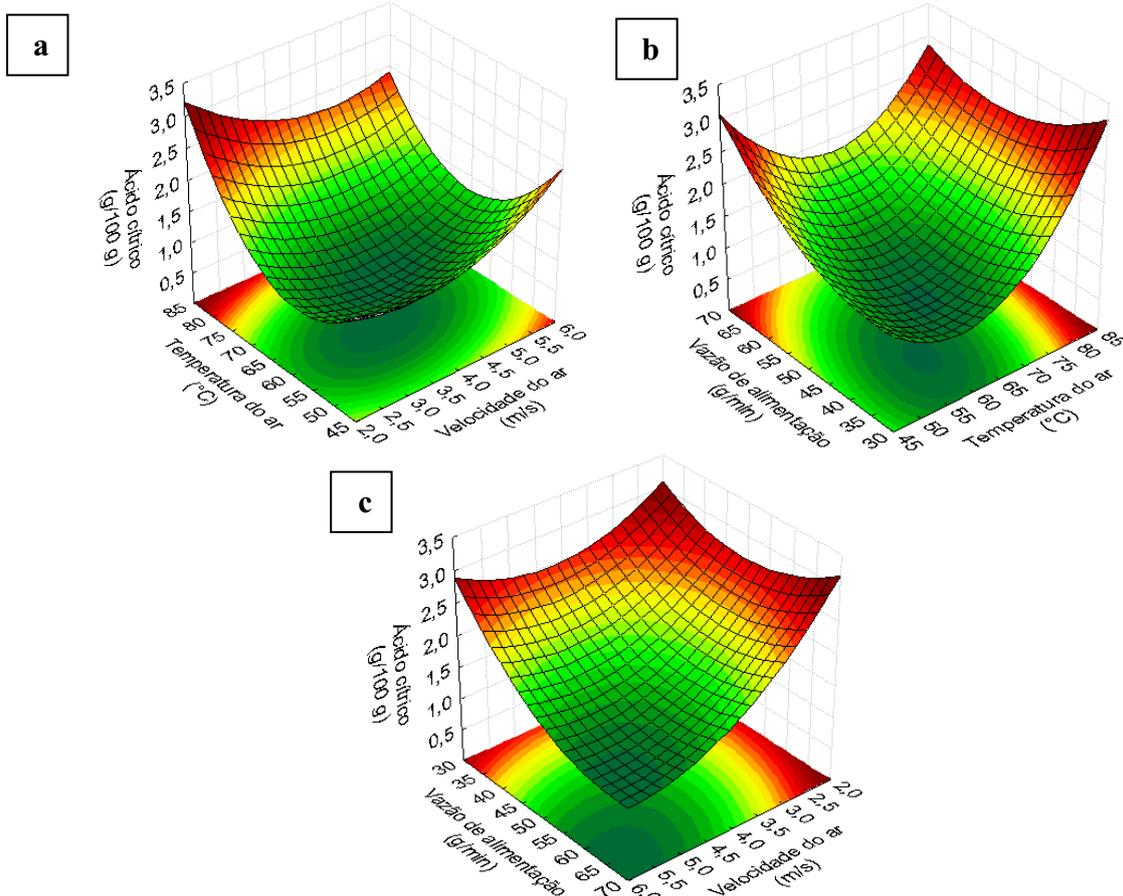
Fonte: De autoria própria (2022).

Para o ácido cítrico, é desejável que seu teor seja superior a 1,25 g/100 g para que se tenha associação a uma boa qualidade da bebida, como disposto na Tabela 2.5. Os experimentos 2, 3, 4, 7, 11 e 12 apresentaram valores superiores ao exigido. Já, para o ácido málico, o limite é de até 0,36 g/100 g para que o café cru possa ser associado a uma bebida de boa qualidade. Das condições estudadas, os ensaios 5, 8, 10, 15 e 16 foram os que tiveram uma concentração de ácido málico inferior a essa.

Comparando com os resultados revelados por outros procedimentos de secagem, o ácido cítrico teve um teor abaixo no roto-aerado do que em terreiro, secador solar, bomba de calor e

estufa (que compõem um intervalo de 1,580 a 1,905 g/100 g). Contudo, para o ácido málico, todas essas técnicas (com teor de 4,165 a 5,480 g/100 g) extrapolaram o limite máximo e qualquer resultado apresentado pelo roto-aerado nas condições estudadas. Logo, o roto-aerado consegue trazer um equilíbrio, em algumas condições experimentais, quanto à composição de ácidos orgânicos no café, estando dentro dos limites de ácidos cítrico e málico correlacionados à boa qualidade da bebida. Na Figura 4.17 e Equação (4.10) mostra que a concentração de ácido cítrico no roto-aerado tem suas respostas mais altas nas condições em que se tem os contrastes dos níveis mais baixos e mais altos entre as três variáveis: temperatura e velocidade do ar e vazão de alimentação dos sólidos.

Figura 4.17 - Superfícies de resposta para o teor de ácido cítrico em relação à: (a) velocidade (X_1) e temperatura do ar (X_2); (b) temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3); e (c) velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3)



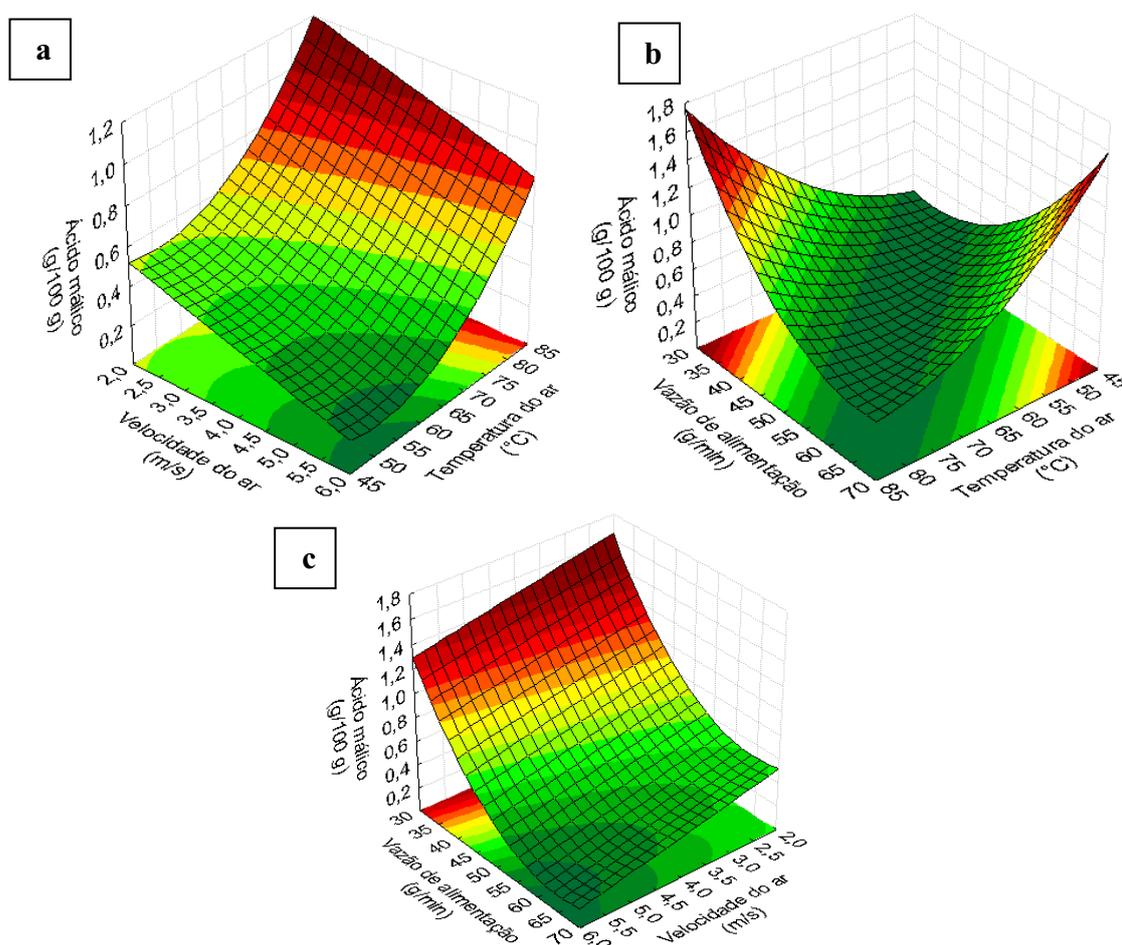
Vazão de alimentação de sólidos, velocidade e temperatura do ar fixadas em 40 g/min, 2,7 m/s e 81,8 °C nas figuras (a), (b) e (c), respectivamente. Fonte: De autoria própria (2022).

$$\begin{aligned} \text{Ácido cítrico} = & 0,57 - 0,11X_1 + 0,06X_2 + 0,14X_1^2 + 0,31X_2^2 + 0,16X_3^2 - \\ & 0,10X_1X_2 - 0,10X_1X_3 - 0,10X_2X_3; \end{aligned} \quad (4.10)$$

$R^2 = 0,953$; $\alpha = 0,1$

Por fim, são mostrados na Figura 4.18 e Equação (4.11) os resultados da superfície e modelo reduzido, respectivamente, para o teor de ácido málico. Como pode-se notar, a velocidade do ar atua como um efeito linear negativo na concentração de ácido málico. Já tanto a temperatura do ar quanto a vazão de alimentação promovem maiores teores de ácido málico quando avaliados juntamente com a velocidade do ar. Na interação entre a temperatura e a vazão de alimentação, é percebido que maiores níveis de temperatura e menores níveis de alimentação, ou vice-versa, resultam também em uma maior concentração de ácido málico.

Figura 4.18 - Superfícies de resposta para o teor de ácido málico em relação à: (a) velocidade (X_1) e temperatura do ar (X_2); (b) temperatura do ar (X_2) e vazão de alimentação de sólidos (X_3); e (c) velocidade do ar (X_1) e vazão de alimentação de sólidos (X_3)



Vazão de alimentação de sólidos, velocidade e temperatura do ar fixadas em 40 g/min, 2,7 m/s e 81,8 °C nas figuras (a), (b) e (c), respectivamente. Fonte: De autoria própria (2022).

$$\begin{aligned} \text{Ácido málico} &= 0,31 - 0,09X_1 + 0,08X_2^2 + 0,09X_3^2 - 0,15X_2X_3; \\ R^2 &= 0,841; \alpha = 0,1 \end{aligned} \quad (4.11)$$

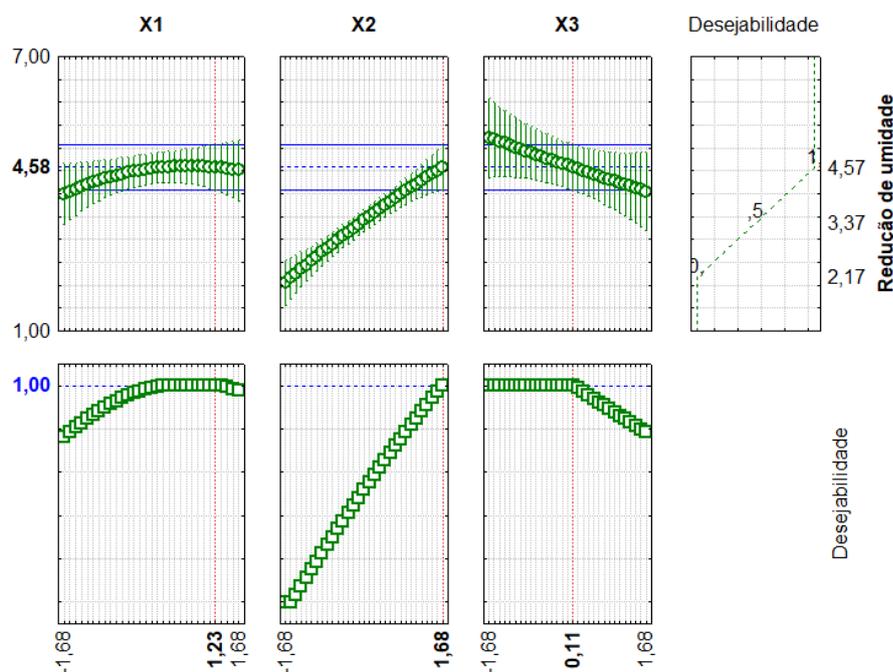
4.5 Otimização da operação de secagem

De acordo com os resultados apresentados nas seções 4.2 e 4.4, a redução de umidade foi escolhida para representar o desempenho de secagem e, como marcadores da qualidade do café, foram selecionados a atividade de água e os teores de sacarose e açúcares totais. As demais respostas foram descartadas na otimização ou por estarem em níveis ótimos, ou por serem proporcionais a outras que estão sendo consideradas ou por não serem as predominantes de seus grupos.

Inicialmente, foi verificado como cada grupo de respostas (desempenho de secagem e qualidade do café) era otimizado pelas condições operacionais do secador roto-aerado. Para tal, realizou-se a otimização por meio da análise com a função de Desejabilidade (DERRINGER; SUICH, 1980) dos grupos separadamente.

A Figura 4.19 mostra os resultados de desejabilidade para a redução de umidade, que representa o desempenho de secagem, e a Figura 4.20 traz os resultados para a otimização multiresposta para os componentes de qualidade do café.

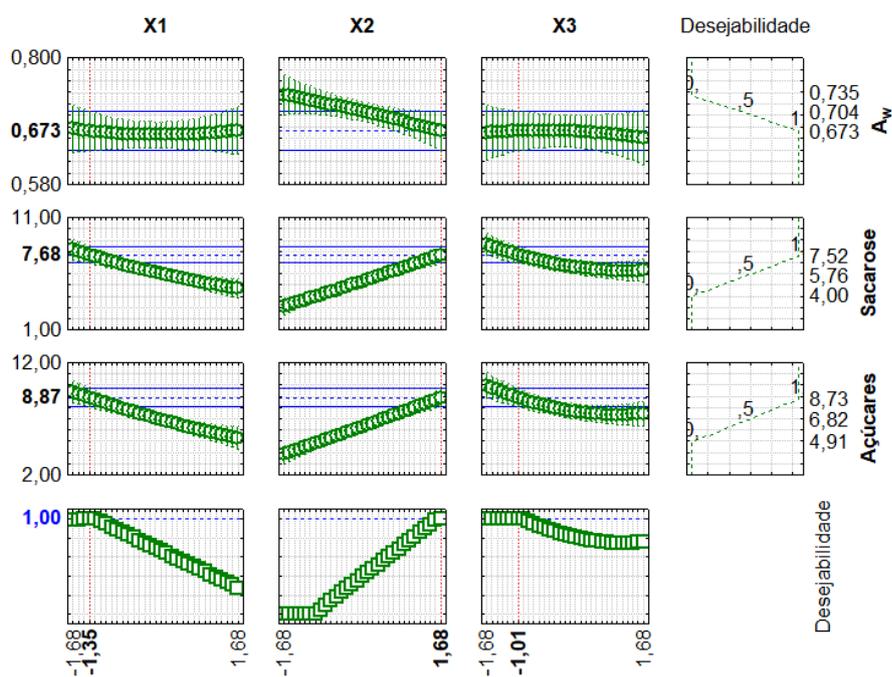
Figura 4.19 - Análise de desejabilidade para redução de umidade na secagem de café no roto-aerado



Para o desempenho de secagem, foi averiguado que a redução de umidade é maximizada quando os níveis das variáveis independentes codificadas são: $X_1 = 1,23$; $X_2 = 1,68$ e $X_3 = 0,11$,

os quais representam, respectivamente, os valores reais de $v_f = 5,2$ m/s, $T_f = 81,8$ °C e $W_s = 51$ g/min. Ou seja, o desempenho de secagem é otimizado para a condição de maior temperatura, velocidade do ar elevada e com vazão de alimentação intermediária. Nesta circunstância, a redução de umidade possui um valor ótimo de 4,58 g água/100 g café seco (ou p.p. b.s.), com desejabilidade $D = 1,00$.

Figura 4.20 - Análise de desejabilidade para componentes de qualidade de café na secagem em roto-aerado



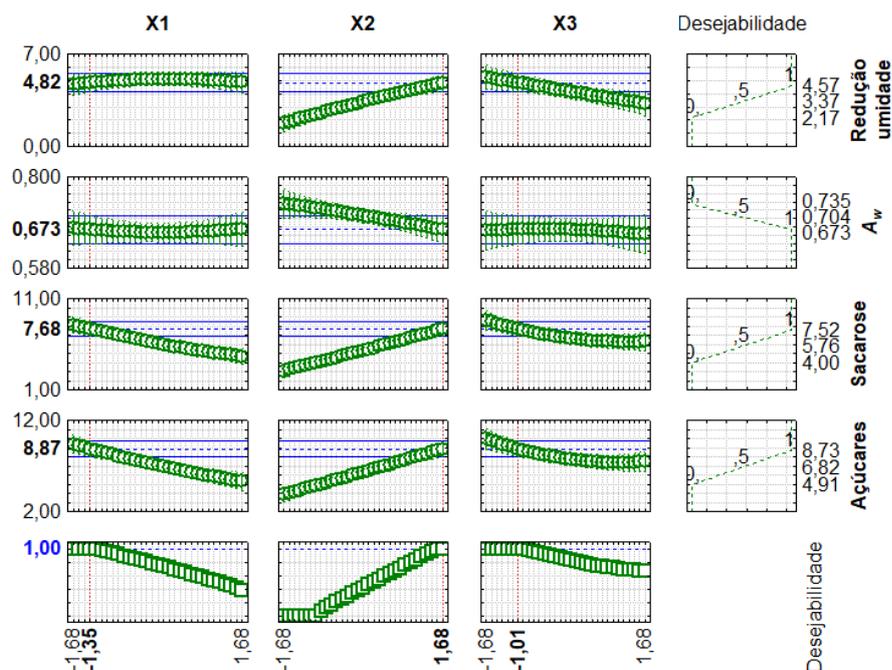
Com relação aos parâmetros de qualidade do café despolpado seco, foi constatado que a desejabilidade geral máxima ($D = 1,00$) é atingida quando os níveis das variáveis independentes codificadas são: $X_1 = -1,35$; $X_2 = 1,68$ e $X_3 = -1,01$, os quais representam, respectivamente, os valores reais de $v_f = 2,7$ m/s, $T_f = 81,8$ °C e $W_s = 40$ g/min.

Neste caso, a qualidade é otimizada também na maior temperatura do estudo, mas com a secagem conduzida no roto-aerado com menores velocidade do ar e vazão de alimentação. O valor ótimo da A_w é 0,673 e dos teores de sacarose e açúcares são, na ordem, 7,68 e 8,87 g/100 g de café.

Observa-se, portanto, que as condições operacionais para se obter o maior desempenho de secagem e melhor qualidade físico-química do café arábica despolpado são diferentes, com exceção da temperatura do ar de secagem.

Diante disso, realizou-se a otimização multirresposta, também por meio da análise com a função de Desejabilidade, para determinar uma condição de operação que equilibrasse ao máximo esses dois objetivos (Figura 4.21).

Figura 4.21 - Análise de desejabilidade para otimização da secagem de café no roto-aerado, levando em consideração o desempenho de secagem e atributos de qualidade



A função de desejabilidade, com $D = 1,00$, resultou nos níveis das variáveis codificadas $X_1 = -1,35$; $X_2 = 1,68$ e $X_3 = -1,01$, os quais representam, respectivamente, os valores reais de $v_f = 2,7$ m/s, $T_f = 81,8$ °C e $W_s = 40$ g/min. Nestas condições, obtém-se as respostas otimizadas de: redução de umidade, atividade de água, sacarose e açúcares totais.

Percebe-se que a otimização foi mais influenciada pelo grupo de respostas relacionadas à qualidade do que pelo desempenho de secagem, cuja otimização indicou a mesma condição operacional que otimiza as respostas de qualidade.

Para confirmar a previsão da condição otimizada, realizou-se um experimento, seguido de análise das respostas consideradas na otimização. As respostas previstas e experimentais são apresentadas na Tabela 4.4. Como se pode observar, a previsão fornecida pelo modelo na condição otimizada está condizente com os valores experimentais, apresentando um desvio relativo de até 7,0 % nas respostas de interesse.

Tabela 4.4 - Resultados experimentais e preditos na condição otimizada

Respostas selecionadas para a otimização	Valor predito	Valor experimental	Desvio relativo [%]
Redução de umidade [p.p. b.s.]	4,82	5,17	6,8
A_w	0,673	0,676	0,4
Sacarose [g/100 g]	7,68	7,18	7,0
Açúcares totais [g/100 g]	8,87	8,61	3,0
Outras respostas de interesse na condição otimizada	Resultados experimentais		
Tempo de residência [min]		23,28	
Aumento de temperatura [°C]		13,1	
Temperatura final [°C]		45,5	

5 CONCLUSÕES

Por meio desta pesquisa foi possível realizar a caracterização do café arábica despulpado, da região do Cerrado Mineiro, em termos de análise granulométrica e propriedades físicas do grão, assim como por termogravimetria. Juntas, essas características corroboraram para a aplicabilidade de um novo secador desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas Particulados da FEQ/UFU na secagem de café despulpado.

O secador roto-aerado aplicado pela primeira vez para secagem de café despulpado, como proposta de um novo processo de produção de cafés especiais, é uma boa alternativa para secagem deste produto. Os resultados da secagem foram promissores, uma vez que o tempo médio de residência do material no secador, de 14,60 a 27,47 min, se mostrou bastante reduzido (redução de até 88 %) e a taxa de secagem até 120 vezes superior (0,09 a 0,24 g água/(100 g café seco.min)) em relação a outros secadores. Nesse contexto, também foi possível avaliar como a temperatura e velocidade do ar de secagem, assim como a vazão de alimentação de café influenciam no processo de secagem.

A modelagem matemática proposta mostrou que o modelo a duas fases, com um conjunto adequado de equações constitutivas, previu com sucesso o processo de secagem de café despulpado no secador roto-aerado. Os resultados simulados tiveram uma boa concordância com os dados experimentais, tanto para a umidade quanto para a temperatura do café. A diferença média entre os dados experimentais e simulados foi de 2,39 % para a umidade do café e de 0,89 % para a temperatura do café. Com base nos perfis experimentais e simulados de temperatura e umidade dos grãos, juntamente com as informações da curva de secagem do material, foi possível efetuar uma análise física do comportamento de secagem ao longo do equipamento, à luz dos fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa.

A qualidade físico-química do café também pôde ser avaliada por meio de componentes que atuaram como marcadores de qualidade, baseados na literatura, que conseguiram correlacionar o teor ou nível de cada parâmetro com a qualidade de xícara da bebida de café. O secador roto-aerado, dentro das condições operacionais estudadas, conseguiu preservar a qualidade do material, no tocante à acidez total, atividade de água, açúcares e ácidos orgânicos.

Por fim, foi possível agrupar as respostas vinculadas ao desempenho de secagem com àquelas que descreveram a qualidade do grão, por meio de uma análise de desejabilidade, a qual indicou as condições de operação do secador em que a otimização das respostas fosse atingida, equilibrando aspectos de secagem com os de qualidade. A otimização multirresposta por meio

da análise com a função de desejabilidade resultou nos níveis das variáveis operacionais de $v_f = 2,7$ m/s, $T_f = 81,8$ °C e $W_s = 40$ g/min.

REFERÊNCIAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento.** [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- AFONSO JÚNIOR, P. C. et al. Aerodynamic properties of coffee cherries and beans. **Biosystems Engineering**, v. 98, n. 1, p. 39–46, set. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.010>
- ALVES, G. E. et al. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. 2013.
- ALVES, G. E. et al. Physiological and sensorial quality of Arabica coffee subjected to different temperatures and drying airflows. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 39, n. 2, p. 225, 11 abr. 2017. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i2.31065>
- ARRUDA, E. B. **Comparação do desempenho do secador roto-fluidizado com o secador rotatório convencional: secagem de fertilizantes.** Tese de Doutorado—[s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- ARRUDA, E. B. et al. Conventional and modified rotary dryer: Comparison of performance in fertilizer drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, n. 9, p. 1414–1418, set. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.07.007>
- BAGCHI, D.; MORIYAMA, H.; SWAROOP, A. **Green Coffee Bean Extract in Human Health.** [s.l.] CRC Press, 2016. <https://doi.org/10.1201/9781315371153>
- BARBOSA, M. DE S. G. et al. Correlation between the composition of green Arabica coffee beans and the sensory quality of coffee brews. **Food Chemistry**, v. 292, p. 275–280, set. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.072>
- BEE, S. et al. The raw bean. Em: **Espresso Coffee.** [s.l.] Elsevier Academic Press Italy, 2005. p. 87–178. <https://doi.org/10.1016/B978-012370371-2/50004-4>
- BERK, Z. **Food Process Engineering and Technology.** 3. ed. San Diego, CA: Elsevier, 2018.
- BORÉM, F. M.; ISQUIERDO, E. P.; TAVEIRA, J. H. DA S. Coffee processing. **Handbook of coffee post-harvest technology**, p. 51–67, 2014.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. H.; HUNTER, S. **Statistics for experimenters.** [s.l.] John Wiley and sons New York, 1978. v. 664
- BRESSANI, A. P. P. et al. Organic acids produced during fermentation and sensory perception in specialty coffee using yeast starter culture. **Food Research International**, v. 128, p. 108773, 1 fev. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108773>
- BRZEZIŃSKA, R. et al. Thermal and Kinetic Properties of Brazilian Coffea Arabica Beans. **Applied Sciences**, v. 11, n. 14, p. 6324, 8 jul. 2021. <https://doi.org/10.3390/app11146324>
- BUFFO, R. A.; CARDELLI-FREIRE, C. Coffee flavour: an overview. **Flavour and Fragrance Journal**, v. 19, n. 2, p. 99–104, mar. 2004. <https://doi.org/10.1002/ffj.1325>

- BYTOF, G. et al. Influence of processing on the generation of γ -aminobutyric acid in green coffee beans. **European Food Research and Technology**, v. 220, n. 3–4, p. 245–250, 9 mar. 2005. <https://doi.org/10.1007/s00217-004-1033-z>
- CAI, J. et al. Drying Kinetic Analysis of Municipal Solid Waste Using Modified Page Model and Pattern Search Method. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, n. 2, p. 301–312, 11 mar. 2017. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9570-9>
- CAPORASO, N. et al. Non-destructive analysis of sucrose, caffeine and trigonelline on single green coffee beans by hyperspectral imaging. **Food Research International**, v. 106, p. 193–203, abr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.031>
- CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and Thermal Properties of Coffee. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 73, n. 3, p. 227–234, jul. 1999. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0411>
- CLARKE, R.; VITZTHUM, O. G. **Coffee: recent developments**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2008.
- COSTA, F. O. et al. Hybrid drying of pulped arabica coffee cherry beans (*Coffea arabica* L. cv. Catuai) using a hexagonal microwave dryer designed by numerical simulations. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 5, p. e13666, 23 maio 2021. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13666>
- DE CARVALHO NETO, D. et al. Yeast Diversity and Physicochemical Characteristics Associated with Coffee Bean Fermentation from the Brazilian Cerrado Mineiro Region. **Fermentation**, v. 3, n. 1, p. 11, 16 mar. 2017. <https://doi.org/10.3390/fermentation3010011>
- DE MELO PEREIRA, G. V. et al. Microbial ecology and starter culture technology in coffee processing. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 13, p. 2775–2788, 2 set. 2017. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1067759>
- DE MELO PEREIRA, G. V et al. Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans – A review. **Food Chemistry**, v. 272, p. 441–452, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.061>
- DELELE, M. A.; WEIGLER, F.; MELLMANN, J. Advances in the Application of a Rotary Dryer for Drying of Agricultural Products: A Review. **Drying Technology**, v. 33, n. 5, p. 541–558, 4 abr. 2015. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.958498>
- DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of quality technology**, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
- DIAZ-DE-CERIO, E. et al. Analytical Approaches in Coffee Quality Control. Em: GRUMEZESCU, A. M.; HOLBAN, A. M. B. T.-C. AND C. B. B. (Eds.). **Caffeinated and Cocoa Based Beverages**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 285–336. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815864-7.00009-X>
- DONG, W. et al. Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. **Food Chemistry**, v. 234, p. 121–130, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.156>

- DONG, W. et al. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. **Food Chemistry**, v. 272, p. 723–731, jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.068>
- DRAPER, N. R.; YING, L. H. A note on slope rotatability over all directions. **Journal of Statistical Planning and Inference**, v. 41, n. 1, p. 113–119, 1 ago. 1994. [https://doi.org/10.1016/0378-3758\(94\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0378-3758(94)90157-0)
- DUARTE, G. S.; PEREIRA, A. A.; FARAH, A. Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods. **Food Chemistry**, v. 118, n. 3, p. 851–855, fev. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.042>
- DULSAT-SERRA, N.; QUINTANILLA-CASAS, B.; VICHI, S. Volatile thiols in coffee: A review on their formation, degradation, assessment and influence on coffee sensory quality. **Food Research International**, v. 89, p. 982–988, nov. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.02.008>
- ERÖZ POYRAZ, İ. et al. Volatile compounds of *Coffea arabica* L. green and roasted beans. **ANADOLU UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY –C Life Sciences and Biotechnology**, v. 5, n. 1, p. 31–35, 13 maio 2016. <https://doi.org/10.18036/btdc.13390>
- ESQUIVEL, P.; JIMÉNEZ, V. M. Functional properties of coffee and coffee by-products. **Food Research International**, v. 46, n. 2, p. 488–495, maio 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.028>
- FADAI, N. T. et al. A heat and mass transfer study of coffee bean roasting. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 104, p. 787–799, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.083>
- FARAH, A. et al. Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. **Food Chemistry**, v. 98, n. 2, p. 373–380, jan. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.032>
- FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática**. [s.l.] Artmed Editora, 2018.
- FRANCA, A. S.; MENDONÇA, J. C. F.; OLIVEIRA, S. D. Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. **LWT - Food Science and Technology**, v. 38, n. 7, p. 709–715, nov. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.08.014>
- FRIEDMAN, S. J.; MARSHALL, W. R. J. STUDIES IN ROTARY DRYING PART I. 1949.
- GONELI, A. L. D. et al. Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. **LWT - Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 386–391, mar. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.09.006>
- GONZALEZ-RIOS, O. et al. Impact of “ecological” post-harvest processing on the volatile fraction of coffee beans: I. Green coffee. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 20, n. 3–4, p. 289–296, maio 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.07.009>

- GRZELCZYK, J. et al. Evaluation of the thermal stability of bioactive compounds in coffee beans and their fractions modified in the roasting process. **Food Chemistry**, v. 387, p. 132888, 1 set. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132888>
- HII, C. L.; BORÉM, F. M. Drying and roasting of cocoa and coffee. 2019.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Tabela 1618**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>>. Acesso em: 26 nov. 2022a.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades: Produção Agrícola - Lavoura Permanente (município de Uberlândia)**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 26 nov. 2022b.
- ISLAM, S. F. et al. Evaluation of different particle size distribution and morphology characterization techniques. **Additive Manufacturing Letters**, v. 3, p. 100077, 1 dez. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100077>
- JHAM, G. N. et al. Comparison of GC and HPLC for the quantification of organic acids in coffee. **Phytochemical Analysis**, v. 13, n. 2, p. 99–104, mar. 2002. <https://doi.org/10.1002/pca.629>
- JOËT, T. et al. Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. **Food Chemistry**, v. 118, n. 3, p. 693–701, fev. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.048>
- KNOPP, S.; BYTOF, G.; SELMAR, D. Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans. **European Food Research and Technology**, v. 223, n. 2, p. 195–201, 29 jun. 2006. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0172-1>
- KULAPICHITR, F. et al. Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee. **Food Chemistry**, v. 291, p. 49–58, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.152>
- KULAPICHITR, F. et al. Effect of post-harvest drying process on chlorogenic acids, antioxidant activities and CIE-Lab color of Thai Arabica green coffee beans. **Food Chemistry**, v. 366, p. 130504, jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130504>
- LEE, K.-G.; SHIBAMOTO, T. Analysis of volatile components isolated from Hawaiian green coffee beans (*Coffea arabica* L.). **Flavour and Fragrance Journal**, v. 17, n. 5, p. 349–351, set. 2002. <https://doi.org/10.1002/ffj.1067>
- LEE, L. W. et al. Coffee fermentation and flavor – An intricate and delicate relationship. **Food Chemistry**, v. 185, p. 182–191, out. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.124>
- LISBOA, M. H. **Estudo de secadores rotatórios na secagem de fertilizantes**. Dissertação de Mestrado—[s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2005.
- LIVRAMENTO, K. G. DO et al. Proteomic analysis of coffee grains exposed to different drying process. **Food Chemistry**, v. 221, p. 1874–1882, abr. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.069>

- MARTÍN, M. J.; PABLOS, F.; GONZÁLEZ, A. G. Discrimination between arabica and robusta green coffee varieties according to their chemical composition. **Talanta**, v. 46, n. 6, p. 1259–1264, ago. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(97\)00409-8](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(97)00409-8)
- MAZZAFERA, P.; PURCINO, R. P. **Post Harvest Processing Methods and Physiological Alterations in the Coffee Fruit**. Science. **Anais...Association Scientifique Internationale du Café (ASIC)**, 2004.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. [s.l.] CRC Press, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420017618>
- NASCIMENTO, S. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório com sensores: análise experimental e numérica utilizando abordagens euleriana e lagrangeana**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- NIU, Y. et al. Characterization of taste-active compounds of various cherry wines and their correlation with sensory attributes. **Journal of Chromatography B**, v. 902, p. 55–60, ago. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2012.06.015>
- OGAWA, M. Coffee and Hippuric Acid. Em: **Coffee in Health and Disease Prevention**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 209–215. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00023-1>
- OLIVEIRA, É. R. et al. Potential of alternative solvents to extract biologically active compounds from green coffee beans and its residue from the oil industry. **Food and Bioproducts Processing**, v. 115, p. 47–58, maio 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.02.005>
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Perry's chemical engineers' handbook**. New York: McGraw-Hill, 1997.
- POISSON, L. et al. New Insight into the Role of Sucrose in the Generation of α -Diketones upon Coffee Roasting. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 10, p. 2422–2431, 14 mar. 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04849>
- POLTRONIERI, P.; ROSSI, F. Challenges in Specialty Coffee Processing and Quality Assurance. **Challenges**, v. 7, n. 2, p. 19, 24 out. 2016. <https://doi.org/10.3390/challe7020019>
- REH, C. et al. Water content determination in green coffee – Method comparison to study specificity and accuracy. **Food Chemistry**, v. 96, n. 3, p. 423–430, 1 jun. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.055>
- SCHOLZ, M. B. S. et al. Validation of near-infrared spectroscopy for the quantification of cafestol and kahweol in green coffee. **Food Research International**, v. 61, p. 176–182, jul. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.12.008>
- SELMAR, D. et al. Germination of coffee seeds and its significance for coffee quality. **Plant Biology**, v. 8, n. 2, p. 260–264, 2006. <https://doi.org/10.1055/s-2006-923845>
- SILVA, P. B. **Secagem de resíduos de frutas em secador roto-aerado**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

- SILVA, P. B. **Secagem híbrida do resíduo de acerola em secador roto-aerado com infravermelho e extração de compostos bioativos**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- SILVA, P. B. et al. A New Rotary Dryer Assisted by Infrared Radiation for Drying of Acerola Residues. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 6, p. 3395–3406, 12 jun. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01222-y>
- SILVA, P. B.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Dehydration of acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) residue in a new designed rotary dryer: Effect of process variables on main bioactive compounds. **Food and Bioproducts Processing**, v. 98, p. 62–70, abr. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.12.008>
- SILVÉRIO, B. C. et al. A novel rotary dryer for drying fertilizer: Comparison of performance with conventional configurations. **Powder Technology**, v. 270, p. 135–140, jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.10.030>
- SIQUEIRA, V. C. et al. Drying kinetics of processed natural coffee with high moisture content. 2017. <https://doi.org/10.25186/cs.v12i3.1320>
- SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; CROUCH, S. **Fundamentos de química analítica**. [s.l.] Thomson, 2005.
- SMRKE, S. et al. Differentiation of degrees of ripeness of Catuai and Tipica green coffee by chromatographical and statistical techniques. **Food Chemistry**, v. 174, p. 637–642, maio 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.060>
- SOMPORN, C. et al. Effect of shading on yield, sugar content, phenolic acids and antioxidant property of coffee beans (*Coffea Arabica* L. cv. Catimor) harvested from north-eastern Thailand. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 92, n. 9, p. 1956–1963, 1 jul. 2012. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5568>
- SOUZA, G. F. M. V. et al. Modeling of heat and mass transfer in a non-conventional rotary dryer. **Applied Thermal Engineering**, v. 182, p. 116118, jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116118>
- SPEER, K.; KÖLLING-SPEER, I. The lipid fraction of the coffee bean. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, n. 1, p. 201–216, mar. 2006. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100014>
- SUALEH, A.; TOLESSA, K.; MOHAMMED, A. Biochemical composition of green and roasted coffee beans and their association with coffee quality from different districts of southwest Ethiopia. **Heliyon**, v. 6, n. 12, p. e05812, dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05812>
- SUNARHARUM, W. B.; WILLIAMS, D. J.; SMYTH, H. E. Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. **Food Research International**, v. 62, p. 315–325, ago. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.030>
- TORRES, L. M. **Compostos bioativos, ácidos orgânicos, atividade antioxidante e suas correlações com a qualidade da bebida de café arábica**. Dissertação de Mestrado—[s.l.] Universidade Federal de Lavras, 2014.

TSUKUI, A. et al. Microwave-assisted extraction of green coffee oil and quantification of diterpenes by HPLC. **Food Chemistry**, v. 164, p. 266–271, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.039>

VALDINEY, C. S. et al. Drying of hulled naturally processed coffee with high moisture content and its impacts on quality. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 31, p. 2903–2911, 4 ago. 2016. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.10837>

WINTGENS, J. N. Factors influencing the quality of green coffee. Em: **Coffee: growing, processing, sustainable production. A guidebook for growers, processors, traders and researchers**. [s.l.] Wiley-VCH, 2009. p. 797–817.

APÊNDICE A – Algoritmo da resolução numérica do modelo em MATLAB®

Abaixo segue o algoritmo, em linguagem MATLAB®, da resolução numérica da modelagem (seção 3.3.3), desenvolvido para esta dissertação. O algoritmo foi adaptado para se adequar a cada experimento.

```
function modelo

clc
close all
clear
format long

%=====
% Condições de Entrada
%=====

MMar=28.96;    % massa molar do ar [g/mol]
R=8.21e-5;    % constante dos gases ideais [atm.m3/mol.K]
P=0.91;       % Pressão atmosférica Uberlândia INMET [atm]

% Características de Projeto do Secador

ri=0.14;      % Raio interno do tambor [m]
L=1.4;        % Comprimento efetivo do tambor [m]
A=pi*ri^2;    % Área da seção transversal do secador [m2]
V=L*A;        % Volume do secador [m3]
De=0.30;     % Diâmetro externo do tambor [m]
Tamb=29;     % Temperatura ambiente no dia do teste [°C]

% Características Operacionais:

n=1;
TR=25.03*60; % Tempo de residência [s]
tr=TR/n;    % tempo de residência em cada volume de controle [s]
NR=1.5;     % Rotação do tambor [rpm]

% Condições de Entrada do Ar:

Tfo=48.2;           % Temperatura de entrada do ar [°C]
Wo=0.0138;         % Umidade absoluta de entrada do ar [kgvp/kgarseco]
URo=0.175;         % Umidade relativa do ar de entrada [-]
var=4;             % Velocidade do ar [m/s]
Gf=(var*A*P*MMar/1000)/(R*(Tfo+273.15)*(1+Wo)); % Vazão mássica do ar
seco [kg/s]

% Condições de Entrada do Sólido:

UBU=0.1619;        % Umidade do material base úmida [kg água/(kg
água + kg sól. seco)]
Mo=UBU/(1-UBU);    % Umidade do material base seca na entrada
[kg água/kg de sól. seco]
Gs=50*(1-UBU)/(1000*60); % Vazão mássica de sólido seco [kg sól. seco/s]
Tso=29.8;          % Temperatura de entrada do produto [°C]
```

```

% Equação para o adimensional de umidade (MR) ajustada pela equação de PAGE
AA=7.7;
Ea=20958.91;
N=0.659;

% Goneli et al.(2013)- Equação para a umidade de equilíbrio (Meq) ajustada
pela equação de GAB:
aa=0.0254;
bb=930.263;
cc=1.414;
dd=-186.321;
ee=4.543;
ff=167.215;

%Parâmetros para o cálculo do coeficiente de transferência de calor

% entrada para Uva que será usada pelo programa: x=[kf mf nf]
xuva=[42.509 0.057 0.916];

% Uva=x(1)*(Gs)^x(2)*(Gf)^x(3);
Uva=xuva(1)*((Gf)^xuva(2))*((Gs)^xuva(3));           % [kW/m3°C]

%=====
% Correlações Termodinâmicas
%=====

Cpf=1.01;           % Cp do ar seco [kJ/kg°C]
Cps=(8.1387*UBU+0.2482); % Cp do sólido [kJ/kg°C] - Chandrasekar e
Viswanathan (1999)
Cpl=4.187;         % Cp da água líquida [kJ/kg°C]
Cpv=2.05;         % Cp do vapor [kJ/kg°C]

%=====

% pontos de colocação %chute inicial (M Ts)
solinit = bvpinit(linspace(1e-10,1,10),[0.18 32]); % chute inicial
solution = bvp4c(@sys_edo,@boundary_conditions,solinit,[],...
    MMar,R,P,ri,L,A,V,TR,tr,NR,Tfo,Wo,Uro,var,Gf,Gs,Tso,Mo,aa,bb,...
    cc,dd,ee,ff,Uva,Cps,Cpf,Cpl,Cpv,De,Tamb,AA,Ea,N);

zint = linspace(1e-10,1,100);           % interpolação de pontos com 100 pontos
em z
Solution = deval(solution,zint); % avalia os pontos de zint na edo
naux=length(zint); % ver a quantidade de elementos que tem o
vetor zint

for i=1:naux
    KK(i)=AA*exp(-(Ea/(8.314*(Tfo+273.15)))));
    MRR(i)=exp(-KK(i)*(TR*zint(i))^N);
    Meqq(i)=(aa*exp(bb/(Solution(2,i)+273.15))*Uro)/((1-
cc*exp(dd/(Solution(2,i)+273.15))*Uro)*(1-
cc*exp(dd/(Solution(2,i)+273.15))*Uro+ee*exp(ff/(Solution(2,i)+273.15))*Uro
));
    taxa(i)=-1*(MRR(i)-1)*(Mo-Meqq(i))/(TR*zint(i));
end

```

```

saida=[zint' Solution(1,:) ' Solution(2,:) ' TR*zint'];
save ('resultados_Exp_11.txt', 'saida', '-ASCII')

function dYdZ =
sys_edo(z,Y,MMar,R,P,ri,L,A,V,TR,tr,NR,Tfo,Wo,Uro,var,Gf,...
Gs,Tso,Mo,aa,bb,cc,dd,ee,ff,Uva,Cps,Cpf,Cpl,Cpv,De,Tamb,AA,Ea,N)

M=Y(1); % solido
Ts=Y(2); % temperatura do solido

H=(Gs)*TR*z; % Holdup de sólido seco no secador [kg]
K=AA*exp(-Ea/(8.314*(Tfo+273.15)));
MR=exp(-K*((TR*z)^(N)));
Meq=(aa*exp(bb/(Ts+273.15))*Uro)/((1-cc*exp(dd/(Ts+273.15))*Uro)*(1-
cc*exp(dd/(Ts+273.15))*Uro+ee*exp(ff/(Ts+273.15))*Uro));
qlat=2492.71-2.144*Ts-0.001577*Ts^2-7.3353e-6*Ts^3;% Calor Lat. de
vaporização da água pura [kJ/kg]
Rw=-1*(MR-1)*(Mo-Meq)/(TR*z); % [1/s]

dYdZ = [ -Rw*H/(Gs) % solido
(1/(Gs*(Cps+M*Cpl)))*(Uva*V*(Tfo-Ts)+Rw*Cpl*Ts*H-
Rw*H*(qlat+Cpv*(Tfo-Ts))) % temperatura do solido
];

function conditions = boundary_conditions(Ya,Yb,MMar,R,P,ri,L,A,V,TR,tr,...
NR,Tfo,Wo,UR,var,Gf,Gs,Tso,Mo,aa,bb,cc,dd,ee,ff,Uva,Cps,Cpf,Cpl,Cpv,De,Tamb
,AA,Ea,N)

conditions = [ Ya(1)-Mo % cond. inicial para o solido em z=0
Ya(2)-Tso % cond. inicial para a temp em z=0
];

```

APÊNDICE B – Propriedades físicas do café despulpado e do ar de secagem

A seguir estão apresentados os valores ou expressões para as principais propriedades físicas do café despulpado e do ar de secagem. Estes dados são usados na solução numérica do modelo desenvolvido para esta dissertação.

- $C_{p_s} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] = 8,1387U \text{ (b. u.)} + 0,2482;$
- $C_{p_f} = 1,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}};$
- $C_{p_l} = 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}};$
- $C_{p_v} = 2,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}};$
- $MM_{ar} = 28,96 \frac{\text{g}}{\text{mol}};$
- $R = 8,21 \times 10^{-5} \frac{\text{atm m}^3}{\text{mol K}};$
- $P = 0,91 \text{ atm};$
- $\lambda \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = 2492,71 - 2,144T_s - 0,001577T_s^2 - 7,3353 \times 10^{-6}T_s^3.$