



CAMILA DE ALMEIDA DIAS

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À
DESIDRATAÇÃO DOS TECIDOS DO
PERICARPO E DO ENDOSPERMA DO FRUTO
DE CAFÉ ARÁBICA**

LAVRAS – MG

2017

CAMILA DE ALMEIDA DIAS

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À DESIDRATAÇÃO DOS TECIDOS DO
PERICARPO E DO ENDOSPERMA DO FRUTO DE CAFÉ ARÁBICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade

Orientador

Prof. Dr. Flávio Meira Borém

Coorientador

LAVRAS – MG

2017

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Dias, Camila de Almeida.

Análise da resistência à desidratação dos tecidos do pericarpo e do endosperma do fruto de café arábica / Camila de Almeida Dias. - 2017.

118 p. : il.

Orientador: Ednilton Tavares de Andrade.

Coorientador: Flávio Meira Borém

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Secagem. 2. Modelagem matemática. 3. *Coffea arábica* L.. I. Andrade, Ednilton Tavares de. II. Borém, Flávio Meira. III. Título.

CAMILA DE ALMEIDA DIAS

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À DESIDRATAÇÃO DOS TECIDOS DO
PERICARPO E DO ENDOSPERMA DO FRUTO DE CAFÉ ARÁBICA**

***ANALYSIS OF DEHYDRATION RESISTANCE OF PERICARP AND
ENDOSPERM TISSUES IN FRUITS OF ARABICA COFFEE***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 25 de Agosto de 2017.

Prof. Dr. Flávio Meira Borém

UFLA

Prof. Dr. Éder Pedroza Isquierdo

UNEMAT

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade
Orientador

LAVRAS – MG

2017

Aos meus pais,
Daniel Dias e Maria Solange de Almeida Dias.

À minha irmã,
Carolina de Almeida Dias.

MEU NOVO MELHOR TRABALHO, ATÉ AQUI, DEDICO A VOCÊS.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre acalmar meu coração nos momentos em que tudo parecia não dar certo. Por me ajudar a alcançar grandes desejos, superar desafios e iluminar meu caminho.

Aos meus pais, Solange e Daniel, por estarem sempre me apoiando e me fazendo acreditar que é possível realizar meus sonhos, pelo amor e carinho de todos os dias. À minha mãe, agradeço estar comigo todos os dias, acalmando-me, mostrando-me a melhor forma de enxergar tudo que acontece. Ao meu pai, onde estiver, agradeço pelo companheirismo, pelos sorrisos e abraços quando chegava em casa, por sempre acreditar que eu chegaria longe.

À minha irmã, Carolina, por sempre estar ao meu lado, pelas conversas, amizade, força. Por todas as risadas, que sempre foram as melhores, mais divertidas e por ser a melhor irmã que Deus poderia me dar.

Aos meus avós, por todas as orações, carinho e incentivo a sempre continuar e conseguir superar as dificuldades encontradas com honestidade e sinceridade. A toda a minha família que sempre torce por mim e que sempre está do meu lado para me dar o suporte que preciso.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Engenharia pela oportunidade e condições oferecidas durante a pós-graduação. Ao Capes, pela concessão de bolsa.

Ao meu orientador, Professor Dr. Ednilton Tavares de Andrade, pela orientação, oportunidade, incentivo e ensinamento, por toda paciência em ensinar o que parecia impossível.

Ao meu coorientador, Dr. Flávio Meira Borém, pela ajuda, por todo o conhecimento passado e por me ensinar que, por trás de tudo, sempre tem algo maior nos esperando.

Aos demais membros da banca, Dr. Éder e Dr. Jéfferson, pelo conhecimento, experiência e colaboração.

Aos amigos do LPPA, pela amizade, pela valiosa ajuda e cooperação nas atividades. Por todos os momentos de diversão, mesmo em ambiente de trabalho, que só vocês são capazes de proporcionar. À Isabella, em especial, que dividiu comigo este projeto e ajudou a fazer dar certo e concluir algo tão novo! Obrigada, migs!

Aos colegas do Núcleo de Estudos em Pós-Colheita do Café – Pós-Café, por todo conhecimento transmitido, pela ajuda em aprender a lidar com diversas situações, por me ensinar a ter espírito de liderança e comprometimento na realização de atividades.

Aos amigos de Lavras e São José, em especial, Afonso, Dennis, Giane, Lucas, Maria Alice, Mayume, Segundinha e Thalitinha por serem a família que escolhi, por todo companheirismo, toda amizade, carinho e incentivo. Ao *Psidium*, agradeço por cada nova notificação que deixa meu dia mais feliz e que me ajuda a relaxar, nos momentos mais tensos e que me trazem a certeza de saber para onde correr quando preciso.

À Dra Maria Helena, por ter cedido o café, sem o qual este trabalho não teria sido realizado.

RESUMO

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. Os frutos de café foram colhidos, em propriedade comercial, localizada no município de Ingai – MG, Brasil. Foram colhidos frutos de café (*Coffea arabica* L.) da cultivar Catuaí vermelho, selecionando apenas frutos maduros. Objetivou-se neste trabalho avaliar a cinética de secagem dos frutos do café, bem como de suas partes separadamente (exocarpo + parte do mesocarpo; mesocarpo; endocarpo e endosperma), determinar as isotermas de sorção e elaborar um modelo de secagem para as partes constituintes dos frutos de café. Os frutos de café colhidos e selecionados possuíam um teor de água inicial médio de 68%. As partes dos frutos do café (exocarpo + parte do mesocarpo; endocarpo e endosperma) foram separadas manualmente e, para extração do mesocarpo, foi utilizada uma máquina centrífuga; já para a obtenção da porção de café descascado, foi utilizado um conjunto de equipamentos que realiza o trabalho de descascar, separar a polpa e os frutos verdes. O café foi submetido à secagem, em um sistema composto de condicionamento de ar acoplado a um secador de camada fixa (SCAL), com fluxo de ar de $20\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$, temperatura do ar de 40°C e umidades relativas de 10%; 17,5%; 25% e 32,5%. Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* STATISTICA 7.0® (Statsoft, Tulsa, USA). A escolha do melhor modelo foi uma função dos parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2). Para o teor de água de equilíbrio, os melhores ajustes aos dados experimentais foram obtidos pelos modelos de Sigma Copace, Sabbab, Gab modificado e Henderson modificado para o café natural; para cereja descascado e endosperma; para exocarpo + parte do mesocarpo, mesocarpo e endosperma; e endocarpo, respectivamente. O modelo de Midilli foi o que teve melhor ajuste para o café natural; descascado; exocarpo + parte do mesocarpo; mesocarpo; endocarpo, nas UR de 17,5; 25; 32,5%; e endosperma nas UR de 10; 17,5 e 32,5%. Para o endocarpo na UR de 10%, o melhor modelo foi o da Aproximação da difusão e, para o endosperma na UR de 25%, o melhor ajuste foi apresentado pelo modelo de Page. A resistência quanto à saída de água, independente do processamento ou da parte do fruto do café, é maior quando o café é secado com a menor umidade relativa. O café natural foi o tratamento que apresentou maior resistência, enquanto a menor resistência foi apresentada pelo exocarpo + parte do mesocarpo.

Palavras-chave: Secagem. Modelagem matemática. *Coffea arabica* L..

ABSTRACT

This work was carried out in the Laboratory of Agricultural Products of the Department of Engineering from the Federal University of Lavras. Coffee (*Coffea arabica* L.) fruits of cultivar Catuaí vermelho were harvested at a commercial property located in the city of Ingaí – MG, Brazil. Only the ripest fruits were chosen for analysis. This work aimed at analyzing the coffee fruit drying kinetics, as well as their parts separately (exocarp + a portion of mesocarp; mesocarp; endocarp and endosperm). We also aimed at determining the sorption isotherms and elaborating a drying model for the coffee fruit parts. The harvested and selected coffee fruits had an average initial water content of 68%. The other fruit parts (exocarp + a portion of mesocarp; endocarp and endosperm) were manually separated and the mesocarp was extracted by a centrifuge machine. To obtain the portion of peeled coffee fruits, we used a set of devices that peel the grains, separate their pulp and the green fruit. The coffee fruits were submitted to drying in a system composed of air conditioning coupled to a fixed layer drier (SCAL) with air flow of $20\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$, air temperature of 40°C and relative humidity values of 10%, 17.5%; 25% and 32.5%. For the adjustment of mathematical models, non-linear regression analyses, by Gauss-Newton methodology, were carried out using software STATISTICA 7.0® (Statsoft, Tulsa, USA). The best model was chosen as a function of the statistic parameters: estimation standard deviation (SE), relative average error (P) and determination coefficient (R^2). For content of balance water, the best adjustments to the experimental data were obtained by models Sigma, Copace, Sabbab, modified Gab and modified Henderson for natural coffee; endosperm and peeled fruit; exocarp + part of mesocarp, mesocarp and endosperm; and endocarp, respectively. Midilli's model was the best one for natural coffee; peeled; exocarp + part of mesocarp; mesocarp; endocarp at RH of 17.5%; 25%; 32.5%; and endosperm at RH of 10; 17.5 and 32.5%. For endocarp at RH of 10%, the best model was the diffusion approximation, and for endosperm at RH of 25%, the best adjustment was presented by Page's model. Resistance as to water outflow, regardless of the process or the coffee fruit part, is greater when the coffee fruits are dried at the lowest relative humidity; being that the natural coffee was the most resistant treatment, whereas the exocarp + a portion of mesocarp was the least resistant one.

Keywords: Drying. Mathematical model. *Coffea arabica* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Curvas típicas de secagem.....	30
Figura 2 -	Sistema de secagem que foi utilizado para a secagem mecânica do café.....	41
Figura 3 -	Esquema de distribuição de resistências à saída de água das diversas partes intrínsecas do café cereja.....	49
Figura 4 -	Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do café natural, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.....	61
Figura 5 -	Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do café descascado, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.....	64
Figura 6 -	Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do exocarpo + parte do mesocarpo, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.....	71
Figura 7 -	Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do mesocarpo, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.....	71
Figura 8 -	Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do endocarpo, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.....	72
Figura 9 -	Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do endocarpo, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.....	72
Figura 10 -	Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do café natural nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, em função do tempo.....	79
Figura 11 -	Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do café descascado nas quatro umidades relativas estudadas, em função do tempo.....	83

Figura 12 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do exocarpo + parte do mesocarpo nas quatro umidades relativas estudadas, em função do tempo.....	92
Figura 13 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do mesocarpo nas quatro umidades relativas estudadas, em função do tempo.....	92
Figura 14 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Aproximação da difusão para a umidade relativa de 10% e pelo modelo de Midilli para as umidades relativas de 17,5; 25 e 32,5% para a secagem do endocarpo, em função do tempo.....	93
Figura 15 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para as umidades relativas de 10; 17,5 e 32,5% e pelo modelo de Page para a umidade relativa de 25% na a secagem do endosperma, em função do tempo.....	93
Figura 16 - Variação da resistência do café natural em relação a atividade de água.....	99
Figura 17 - Variação da resistência do café descascado em relação a atividade de água.....	100
Figura 18 - Variação da resistência exocarpo + parte do mesocarpo em relação a atividade de água.....	100
Figura 19 - Variação da resistência do mesocarpo em relação a atividade de água.....	101
Figura 20 - Variação da resistência do endocarpo em relação a atividade de água.....	101
Figura 21 - Variação da resistência endosperma em relação a atividade de água.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição de polpa de café arábica.	22
Tabela 2 - Composição química média do mesocarpo do fruto do café.....	23
Tabela 3 - Modelos matemáticos usados para prever a cinética de secagem.	45
Tabela 4 - Umidade relativa de equilíbrio (%) de soluções salinas saturadas.....	47
Tabela 5 - Modelos matemáticos usados para a representação do equilíbrio higroscópico.	48
Tabela 6 - Teor de água inicial (Ti) e teor de água final (Tf), base seca, do café natural, após atingirem equilíbrio higroscópico com o ambiente.	59
Tabela 7 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados na modelagem das isotermas de sorção do café natural.	60
Tabela 8 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados as isotermas de sorção do café natural.....	61
Tabela 9 - Teor de água inicial (Ti) e teor de água final (Tf), base seca, do café descascado, após atingirem equilíbrio higroscópico com o ambiente.	63
Tabela 10 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados na modelagem das isotermas de sorção do café descascado.	63

Tabela 11 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados as isotermas de sorção do café descascado.....	64
Tabela 12 - Teor de água inicial (Ti) e teor de água final (Tf), base seca, das partes do café, após atingirem equilíbrio higroscópico com o ambiente.	66
Tabela 13 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados na modelagem das isotermas de sorção das partes do fruto do café.....	67
Tabela 14 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados as isotermas de dessorção das partes do fruto do café.....	70
Tabela 15 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem do café natural, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.....	76
Tabela 16 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem do café natural, para as quatro umidades relativas estudadas.	78
Tabela 17 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem do café descascado, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.....	81
Tabela 18 - Coeficientes dos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem do café descascado, para as quatro umidades relativas estudadas.....	82

Tabela 19 - Teores de água iniciais e finais (g/100g de água - b.s.) das partes do fruto do café, em cada umidade relativa estudada.	84
Tabela 20 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem das partes do fruto do café, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.....	86
Tabela 21 - Coeficientes dos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem das partes do café, para as quatro umidades relativas estudadas.	91
Tabela 22 - Valores do coeficiente de difusão (D (m)) para as quatro umidades relativas estudadas.....	95
Tabela 23 - Valores da área específica (γ) do café natural, descascado e das partes que compõe o fruto do café.	95
Tabela 24 - Valores das influências das espessuras de cada parte do fruto do café (decimal).....	96
Tabela 25 - Valores dos coeficientes de resistência ($m^2.s.kg^{-1}$) para o café natural, descascado e para cada parte do fruto, em função da atividade de água.....	97
Tabela 26 - Parâmetros do modelo proposto para analisar a resistência de cada parte do fruto do café, coeficiente de determinação (%), desvio padrão da estimativa (decimal) e erro relativo médio (%).	98
Tabela 27 - Somatório das resistências de cada parte do fruto do café considerando espessura média e o fator de correção em comparação com a resistência total (café natural).....	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	Importância do café para o Brasil.....	19
2.2	Anatomia e composição química dos frutos de café.....	19
2.2.1	Exocarpo.....	21
2.2.2	Mesocarpo.....	22
2.2.3	Endocarpo.....	23
2.2.4	Endosperma.....	24
2.3	Colheita e processamento do café.....	26
2.4	Teoria de Secagem.....	27
2.5	Taxa de Secagem.....	29
2.6	Teor de água de equilíbrio.....	33
2.7	Modelagem matemática e simulação da secagem do café.....	35
2.8	Resistência à desidratação.....	37
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.1	Caracterização do experimento.....	39
3.2	Sistema de secagem.....	40
3.3	Teor de água.....	42
3.4	Taxa de secagem.....	43
3.5	Razão de umidade.....	44
3.6	Teor de água de equilíbrio higroscópico.....	45
3.6.1	Análise da higroscopicidade.....	46
3.7	Sistema de resistência.....	49
3.8	Propriedades físicas.....	56
3.8.1	Contração volumétrica.....	56
3.9	Delineamento experimental e análises estatísticas.....	56
4	RESULTADO E DISCUSSÃO.....	59
4.1	Isotermas de sorção do café natural, descascado e partes do fruto.....	59
4.1.1	Isotermas de sorção do café natural.....	59
4.1.2	Isotermas de sorção do café descascado.....	62
4.1.3	Isotermas de sorção das partes do fruto do café.....	65
4.2	Cinética de secagem do café natural, descascado e das partes do fruto do café.....	74

4.2.1	Curvas de secagem do café natural	74
4.2.2	Curvas de secagem do café descascado	79
4.2.3	Curvas de secagem das partes anatômicas que compõe o fruto do café	84
4.3	Coeficiente de resistência.....	94
5	CONCLUSÕES.....	105
	REFERÊNCIAS.....	107

1 INTRODUÇÃO

O café representa importante fonte de renda para os produtores e para a economia brasileira, sendo o segundo produto na pauta das exportações agrícolas do país. O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, com estimativa de produção, para a safra 2017, entre 43 e 47 mil sacas de 60kg do produto beneficiado (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2016).

O Brasil é preparado tecnologicamente, para oferecer altas produtividades durante a colheita, no entanto, no que se refere à tecnologia ou metodologia de secagem, o país possui um déficit, o que tornou a etapa de secagem o grande gargalo da cafeicultura empresarial brasileira.

Diferentemente de outros produtos agrícolas que são cultivados em larga escala, o café recém-colhido apresenta algumas características que o diferenciam dos demais, como a desuniformidade com relação à maturação, o teor de água dos frutos, aproximadamente 60% (b.u.), no momento da colheita. Este fator torna a secagem uma etapa fundamental, evitando que ocorram possíveis ataques de microrganismos e de fermentações indesejáveis que podem comprometer a qualidade do café (BORÉM, 2008; RESENDE et al., 2009).

A realização de pesquisas, para o desenvolvimento de novos métodos ou tecnologias de secagem, torna-se necessária de forma que permita reduzir o tempo e os gastos decorrentes dessa etapa sem alterar a qualidade final da bebida.

No Brasil, a tecnologia disponível atualmente, para secagem do café, baseia-se no aumento da taxa de secagem, por meio da alteração de alguns fatores que influenciam na secagem, principalmente, no aumento da temperatura e do fluxo ou redução da umidade relativa do ar de secagem.

É fundamental a otimização do processo de secagem, pois os secadores desenvolvidos e utilizados, em sua maioria até hoje, não se adequam a uma

secagem com baixos gastos de energia. A redução significativa, no consumo de energia e no tempo gasto, para realização da secagem, refletiria em grandes benefícios para os produtores e, principalmente, para o país, que teria um produto com menor custo.

Apesar de o desenvolvimento tecnológico, na área de pós-colheita do café já ter avançado bastante, ainda não se tem conhecimento do comportamento de cada parte intrínseca do café durante a secagem e como ocorre esta interação e interdependência. A resistência imposta pelas partes que compõem o fruto do café aumenta o tempo de secagem e, conseqüentemente, os gastos energéticos.

O desenvolvimento de tecnologias ou metodologias de secagem que proporcionem rápida desidratação sem o uso de temperaturas elevadas de secagem é uma alternativa altamente promissora, principalmente, quanto à redução do tempo de secagem. O aumento da taxa de secagem, sem ultrapassar o limite máximo de temperatura tolerável pelo café, pode ser alcançado com a utilização de fluxos de ar de secagem maiores que os utilizados comercialmente e/ou baixas umidades relativas do ar de secagem.

O conhecimento das propriedades intrínsecas de cada parte do fruto do café, a relação de interdependência e interação entre elas pode propiciar conhecimento sobre novas alternativas para a secagem, bem como delinear novas estratégias de secagem visando à redução do tempo e do gasto energético.

Assim, objetivou-se neste trabalho analisar os efeitos da secagem compartimentada na cinética de secagem, avaliando a resistência imposta pelas partes que compõem o fruto do café, observando qual a influência de cada componente anatômico à desidratação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância do café para o Brasil

A cultura do café no Brasil sempre foi de grande importância para a economia do país. Desde que foi trazida ao país, a cultura do café adaptou-se bem às condições brasileiras, tornando-se uma das principais fontes de renda de produtores da região Sudeste do país, apresentando altas estimativas de produção para cada safra agrícola.

Apesar de a cafeicultura brasileira ser uma das líderes mundiais, as mudanças nos padrões de consumo demandam atenção do setor produtivo. No mercado internacional, os cafés brasileiros ainda são vistos como comuns, de qualidade inferior e com pouca diferenciação, recebendo um menor valor no mercado. A busca dos consumidores por cafés de qualidade superior faz com que o mercado de cafés especiais tenha um crescimento em maior proporção quando comparado aos cafés comuns (BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION - BSCA, 2017).

Diante do potencial da cafeicultura brasileira em produzir cafés de qualidade superior e que atendam a demanda crescente dos consumidores, é fundamental a busca por inovações que se adequem e sejam viáveis ao sistema de produção cafeeira no país, principalmente, no que se refere ao principal gargalo da cadeia produtiva, a secagem.

2.2 Anatomia e composição química dos frutos de café

Os produtos agrícolas, especificamente os grãos, apresentam entre eles características morfológicas diferentes. O tipo de morfologia que cada grão apresenta permite relacionar as diversas estruturas internas com suas funções e, assim, verificar possíveis tendências adaptativas aos diversos ambientes e entender a funcionalidade dos mecanismos fisiológicos.

O estudo da morfologia e anatomia do fruto do café, aliado ao dos componentes químicos que o fruto apresenta, é básico. O conhecimento desses fatores auxilia em tomadas de decisões, durante o processamento do produto, como a escolha do melhor método de secagem, tempo e ainda ajuda a definir o melhor método de armazenamento.

A determinação da composição química dos frutos do café, bem como dos seus componentes anatômicos, é de fundamental importância para o desenvolvimento de qualquer investigação científica, processo de conservação ou industrialização.

A definição da composição química dos grãos é pela genética, no entanto essa definição é limitada, já que existem os fatores edafoclimáticos exercendo influência no ambiente em que as plantas se desenvolveram (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000).

A composição química dos frutos de café altera-se, em função das condições edafoclimáticas, de cultivo, de pré-armazenamento, de armazenamento e do sistema de beneficiamento. Sua alteração, em consequência de inadequações nas operações de secagem, de armazenamento, pode significar importantes perdas na pós-colheita, assim, no processamento dos produtos agrícolas deve-se considerar a composição química e adequar todo o processamento de forma a minimizar deteriorações que podem ocorrer em decorrência da alteração dos compostos químicos (ADEOLA; ORBAN, 1995; BETCHEL, 1989).

O fruto do cafeeiro é uma drupa elipsoide contendo dois lócus e duas sementes/grãos (endosperma), podendo, ocasionalmente, conter três ou mais; ainda, é composto pelo pedúnculo, coroa, exocarpo (casca), mesocarpo (mucilagem) e endocarpo (pergaminho) (BORÉM; GARCIA SALVA; SILVA, 2013). O estudo da anatomia dos frutos do café, bem como de cada componente anatômico do pericarpo e o endosperma separadamente, ajudará a delinear novas

estratégias de secagem, pois será melhor compreendida a relação de interdependência de cada uma destas partes.

2.2.1 Exocarpo

Também chamado de casca, é a camada externa do fruto. Pode ter coloração avermelhada ou amarelada, dependendo da cultivar ou progênie, por ocasião da maturação dos frutos (estádio de cereja).

Nas espécies *Coffea arabica* e *Coffea canephora*, o exocarpo consiste de uma camada de células compactas, poligonais e parenquimatosas, com um número variado de cloroplastos, apresentando estômatos regularmente distribuídos em sua superfície. Após o amadurecimento, o pigmento colorido predominante na casca é a antocianina, no caso dos frutos de coloração vermelha (SALAZAR et al., 1994; WILBAUX, 1963); já nos frutos de coloração amarela, o pigmento predominante é a leucoantocianina (LOPES; MUSCHE; HEC, 1984).

Tanto a estrutura celular como a composição química do exocarpo constituem uma importante barreira à saída de água, durante a secagem do café e, ainda, atuam como uma barreira à ação de microrganismos no mesocarpo (mucilagem).

Quando os frutos do café são descascados, o exocarpo é retirado juntamente com parte do mesocarpo e feixes vasculares, o que pode ser chamado de polpa. No caso do café arábica, a polpa contém entre 39 e 49% de mucilagem do peso fresco do fruto no estágio de maturação cereja (ZULUAGA, 1999).

Na tabela abaixo, é apresentada a composição química típica da polpa de café arábica (TABELA 1) (BORÉM, 2008).

Tabela 1 - Composição de polpa de café arábica.

COMPONENTE	TEOR (% b.s.)
Matéria seca	93,07
Carboidratos*	74,10
Extrato não nitrogenado	59,10
Fibra bruta	15,10
Proteína bruta	8,25
Cinzas	8,12
Teor de água	6,93
Taninos	3,70
Potássio	3,17
Extrato etéreo	2,50
Nitrogênio	1,32
Cafeína	0,75
Cálcio	0,32
Fosforo	0,05
Ferro	250g
Sódio	160g
Ácidos clorogênicos**	1,10

Fonte: Zuluaga (1999).

*Carboidratos = extrato etéreo + fibra bruta.

** Clifford e Ramirez-Martinez (1991).

2.2.2 Mesocarpo

O mesocarpo é também conhecido como mucilagem. Possui a característica de ser uma substância gelatinosa e adocicada. Na espécie *C. canephora*, o mesocarpo é pouco aquoso e menos doce que na espécie *C. arabica* L.

De acordo com Borém (2008), o mesocarpo consiste em um tecido formado por células parenquimatosas, contendo feixes vasculares formados por xilema no seu interior e floema em sua parte externa, distribuídos em todo o tecido. À medida que o café amadurece, as enzimas pectinolíticas quebram as cadeias de pectina, resultando em um hidrogel que é insolúvel, coloidal (contém pequenas partículas distribuídas uniformemente), hialinas (vítreas) e ricas em açúcares e pectinas (CARVALHO, 1997; WILBAUX, 1963).

Possui cerca de 20 camadas de células de tamanho variável, contendo maior quantidade de cloroplastos, quando comparado ao exocarpo. Podem ser encontrados alguns cristais de oxalato de cálcio e taninos. Como dado geral, o mesocarpo compreende entre 22 e 31% da massa do fruto seco (ROLZ et al., 1971; ZULUAGA, 1999).

Na Tabela 2, pode-se observar a composição média do mesocarpo (BORÉM, 2008).

Tabela 2 - Composição química média do mesocarpo do fruto do café.

COMPONENTE	TEOR (%)
Água	88,34 (b.u.)
Carboidratos totais	7,17 (b.u.)
Pectina	28,3 (b.s.)
Celulose	9,00 (b.s.)
Polissacáridos não celulósicos e neutros*	15,00 (b.s.)
Nitrogênio**	0,17 (b.u.)

Fonte: Avalone et al. (2001) e Rolz et al. (1971).

*com pequenas quantidades de arabinose, xilose, galactose e ramnose.

**inclui aminoácidos, cafeína e aminoácidos.

Sua elevada quantidade de açúcares aumenta os riscos de fermentações que poderão comprometer a qualidade do café. No entanto a retirada da mucilagem depende da infraestrutura de secagem disponível pelo produtor (BORÉM, 2013). A quantidade de açúcares presente na mucilagem, durante a secagem, pode dificultar a saída de água, aumentando o tempo de secagem e aumentando os riscos de fermentações indesejáveis.

2.2.3 Endocarpo

Pode ser chamado de “pergaminho” e é a estrutura mais interna do pericarpo e, apesar de ser uma parte do fruto, fica agregado à semente/grão. É

formado por três a sete camadas de células esclerenquimatosas, de forma irregular, envolvendo completamente o grão. Com o desenvolvimento do endosperma, as células do endocarpo transformam-se em escleródios, conferindo a textura lenhosa observada nos frutos maduros (SALAZAR et al., 1994).

É basicamente constituído por fibras e hemicelulose. O endurecimento do endosperma limita o crescimento dos grãos em tamanho, em virtude da constrição mecânica imposta pelo endocarpo maduro. Quando maduro, o endocarpo é coriáceo e envolve independentemente cada grão; na espécie *C. canephora*, é menos espesso que na *C. arabica* L. (BORÉM, 2008).

Pode-se afirmar que a composição média do endocarpo do café arábica corresponde ao material celulósico, sendo 50% de celulose, 20% de hemicelulose e 20% de lignina; contendo cerca de 1% de cinzas e 1,5% de proteína bruta. O pergaminho corresponde a cerca de 3,8% do peso do fruto fresco (café com teor de água de 11%) e 16 a 21% do peso do café em pergaminho (BORÉM, 2008; WILBAUX, 1963).

2.2.4 Endosperma

O endosperma é o tecido de maior volume na semente do café, de cor azul esverdeada na espécie *C. arabica* L. (à exceção da variedade cera que apresenta cor amarelada) e amarelo-pálido em *C. canephora*.

Este tecido é formado externamente por pequenas células ricas em óleos e mais internamente por células maiores com paredes um pouco mais delgadas, sendo um único tecido (WILBAUX, 1963). A parte externa do endosperma é composta de pequenas células em forma de polígono que são ricas em óleos, chamada de "endosperma rígido". A parte interna do endosperma, às vezes denominada "endosperma suave", é composta por maiores células retangulares com paredes celulares ligeiramente mais finas.

Segundo Rena e Maestri (1986), o endosperma é formado por células poliédricas de paredes muito espessas, que possuem plasmodesmas que estabelecem conexões entre as células e podem ter papel importante no transporte de água e outras substâncias.

As células do endosperma têm paredes celulares de formato retangular e poligonal. As células com formato retangular estão localizadas mais próximas ao embrião e estão mais internamente no endosperma, enquanto as células poligonais estão localizadas mais externamente (BORÉM, 2008).

A composição química do endosperma do café possui importância no processo de secagem, uma vez que as trocas de água entre o fruto e o ambiente dependem da predominância de um componente ou outro, dada a maior ou menor afinidade da água com cada um destes compostos (BORÉM, 2013).

De acordo com Feldman, Ryder e Kune (1969) e Sivetz (1963), os componentes químicos do endosperma do café podem ser divididos em solúveis e insolúveis em água. A porção hidrossolúvel contém: cafeína, trigonelina, ácido nicotínico, ácidos clorogênicos, mono-, di- e oligossacarídeos, algumas proteínas, minerais e ácidos carboxílicos. Na porção insolúvel em água, têm sido quantificados os polissacarídeos celulose, lignina e hemicelulose, além de proteínas, minerais e lipídeos, correspondendo entre 65 a 73% da composição da semente.

Os polissacarídeos na parede celular representam 50% do peso seco do café (15% de celulose, 25% a 30% de proteínas de arabinogalactano, 50% de manano e galactomanano e 5% de pectina. A sacarose é o mais abundante do baixo peso molecular açúcares (monossacarídeos e dissacáridos) e encontra-se em concentrações até 400 vezes as concentrações combinadas dos outros açúcares. Os lipídeos compõem entre 12% a 18% de grãos de café Arabica e 75,2% desses lipídios são triglicerídeos. As proteínas formam 9,2 % do peso seco de grãos de café Arábica (BORÉM; GARCIA SALVA; SILVA, 2013).

2.3 Colheita e processamento do café

A colheita do café pode ser mecanizada, semimecanizada ou manual, sendo, geralmente, realizada de duas formas: derriça completa ou colheita seletiva. Na derriça completa, método predominante no Brasil, os frutos são derriçados do cafeeiro sobre pano colocado no chão ou diretamente no chão, obtendo-se um produto bastante heterogêneo, constituído de frutos maduros (cereja), imaturos (verdes) e sobremaduros (passa e seco), além de outros materiais e impurezas, como folhas, ramos, paus, terra, pedras, etc. Já na colheita seletiva, são colhidos apenas os frutos maduros (BORÉM, 2013).

Após ser colhido, o café deve seguir imediatamente para o processamento, não podendo ser armazenado, ainda úmido, por períodos superiores a 8 horas, em razão de riscos de ocorrerem fermentações indesejáveis e a formação do defeito ardido (BRANDO, 2004).

Após a colheita, o café poderá passar pelo processo de abanação e peneiramento, manual ou mecânico, que tem a finalidade de retirar as impurezas menos densas (folhas, gravetos e outras impurezas), maiores e menores que os frutos. Em seguida, independentemente do método de processamento adotado, é recomendado que o café seja submetido à separação hidráulica em lavadores, na qual os frutos mais densos (maduros e verdes) são separados da porção menos densa (sobremaduros, brocados, chochos, etc) (BORÉM, 2008).

A etapa de processamento do café tem por finalidade promover a separação dos frutos em lotes mais homogêneos. Tal separação pode ser feita pelo estádio de maturação, teor de água, tamanho e densidade, dentre outros, o que facilita as operações posteriores, principalmente a secagem, evitando-se possíveis comprometimentos na qualidade da bebida.

No processamento do café, são utilizados, basicamente, dois métodos, a via seca e a via úmida. O processamento por via seca consiste em secar os frutos na sua forma integral, ou seja, com exocarpo (casca), mesocarpo (polpa e

mucilagem) e endocarpo (pergaminho), originando o que é conhecido como café em coco ou natural. O processamento por via úmida, que origina os cafés em pergaminho, pode ser realizado de diferentes formas: removendo-se a casca e parte da mucilagem mecanicamente, dando origem ao café descascado; removendo-se a casca mecanicamente e a mucilagem por fermentação biológica, originando o café despolpado ou removendo-se a casca e a mucilagem mecanicamente, dando origem ao café desmucilado (BORÉM, 2013).

A escolha do tipo de processamento do café é variável entre os produtores e dependerá de fatores como: aspectos climáticos, tecnológicos, econômicos e as exigências do mercado consumidor quanto às características do produto (BORÉM, 2013).

2.4 Teoria de Secagem

Para se fazer a preservação dos alimentos por maior tempo, a secagem tem sido considerada o processo mais importante na conservação de grãos e alimentos de todas as variedades (DOYMAZ, 2008; YALDIZ; ERTEKIN; UZUN, 2001).

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água, contida no grão por meio de evaporação, geralmente, causada por convecção forçada de ar aquecido (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

No caso dos frutos de café, que geralmente são colhidos com teores de água entre 30 e 65%, dependendo do estágio de maturação, a secagem é fundamental e mais utilizada para se fazer a conservação do produto, sendo esta a etapa de grande importância do ponto de vista econômico e da manutenção de qualidade do produto (BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008).

A remoção de água impede o crescimento e reprodução de microrganismos que causam deterioração e reduzem ao mínimo as reações que ocorrem pela presença de água; essa redução do teor de água dos produtos agrícolas ocasiona uma diminuição de peso e volume e, ainda, contribui para um armazenamento prolongado (DOYMAZ, 2008; CHRISTENSEN; KAUFMANN, 1974).

Durante a secagem, a redução do teor de água ocorre por uma diferença de pressão de vapor d'água entre a superfície do produto a ser seco e o ar que o envolve. Para que ocorra secagem, é necessário que a pressão parcial de vapor d'água em sua superfície seja maior do que no ar de secagem (PABIS; JAYAS; CENKOWSK, 1998).

De acordo com Brooker, Baker-Arkema e Hall (1992), o fenômeno de migração de água do interior de grãos ainda não é bem conhecido. Numerosos mecanismos térmicos e físicos têm sido propostos para descrever o transporte de água em produtos capilares porosos higroscópicos.

O estudo da cinética de secagem de produtos agrícolas é de grande importância, para selecionar a temperatura apropriada e tempo necessário, para o processo de secagem adequado, podendo obter no final um produto de melhor qualidade, pois é possível o melhor controle de fatores que podem prejudicar a qualidade (AVHAD; MARCHETTI, 2016).

Em determinados produtos, o processo de secagem, sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, pode ser dividido em um período de velocidade constante e outro de velocidade decrescente.

Os grãos de produtos agrícolas, em geral, apresentam o período de secagem com taxa constante muito curto, ou inexistente, porque, nas condições operacionais de secagem, as resistências às transferências de água encontram-se essencialmente no seu interior, tornando a taxa de evaporação superficial

acentuadamente superior à taxa de reposição de água do interior para a superfície, ou seja, isso se deve basicamente às diferentes velocidades da migração das moléculas de água do interior para a periferia do produto e a de evaporação das moléculas de água da superfície (CORRÊA et al., 2010a; LASSERAN, 1978).

O período de velocidade constante ocorre nas primeiras horas de secagem, quando o fruto de café se encontra com teor de água elevado. Nesse período, a temperatura do produto mantém igual à do ar de secagem saturado e as transferências de calor e massa se compensam, ou seja, a energia perdida na forma de calor sensível é recuperada na forma de calor latente de vaporização. O mecanismo interno de fluxo de água não afeta a velocidade de secagem, porque a taxa interna de deslocamento de água para a superfície do produto é igual ou maior do que a máxima taxa de remoção de vapor d'água pelo ar, sendo evaporada apenas a água retida por capilaridade (BORÉM, 2008).

No período de velocidade decrescente de secagem, a taxa interna de transporte de água é menor do que a evaporação superficial. Dessa forma, a transferência de calor do ar para o produto não é compensada e, conseqüentemente, a temperatura do grão aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem. Nesta fase ocorrem os maiores riscos de perda de qualidade por danos térmicos (BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

2.5 Taxa de Secagem

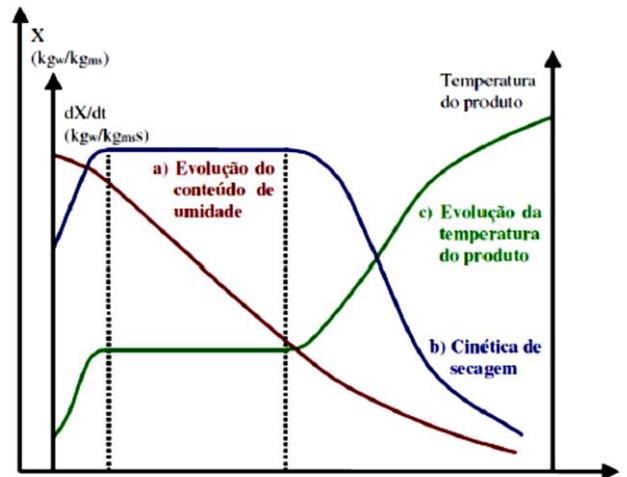
A taxa de secagem é a relação entre a quantidade de água que é perdida pelo produto em certo período de tempo. A taxa de secagem é influenciada por fatores como: método de secagem, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem e teor de água inicial do produto. A falta do controle desses fatores pode comprometer a qualidade do produto final (BORÉM, 2008).

Temperaturas mais altas tornam a secagem mais rápida e, portanto mais econômica (BURMESTER; EGGERS, 2010).

Na secagem contínua, os grãos ou frutos são expostos ao ar aquecido do início ao fim da operação. Nesse caso, conforme o teor de água dos grãos é reduzido, ocorre um aumento no gradiente de umidade entre o interior e a superfície dos grãos, como consequência, a taxa de redução de água diminui e a temperatura dos grãos tende a se igualar à temperatura do ar de secagem, nessa fase, cresce a possibilidade da ocorrência de danos térmicos (VILLELA; PESKE, 2003).

Na Figura 1, pode ser observada a curva típica de secagem, em que são representadas as curvas de evolução do teor de água do produto (X), da temperatura (T) e da velocidade de secagem ($dX.dt^{-1}$), também chamada de taxa de secagem, ao longo do tempo, para um experimento utilizando ar com propriedades constantes.

Figura 1 - Curvas típicas de secagem.



Fonte: Park et al. (2007).

A curva (a) representa a variação do teor de água do produto (X), no decorrer da secagem, em relação ao tempo de secagem (t). A curva (b) representa a taxa de secagem, variação do teor de água do produto em relação ao tempo, $dX.dt^{-1}$. A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante o tempo de secagem (MELO, 2016; MORAIS, 2010).

Avaliando o efeito de quatro níveis de temperatura (45, 55, 65 e 75°C) e três níveis de velocidade do ar (0,25; 0,75 e 1,25 $m.s^{-1}$), na secagem convectiva de fatias de alho em camadas, Abdelmotaleb (2009) encontrou aumento na taxa de secagem com a elevação da temperatura e da velocidade do ar de secagem. O consumo específico de energia reduziu com a elevação da temperatura e aumentou para maiores fluxos de ar. Alterando-se a temperatura de 45-75°C, para a velocidade de 0,25 $m.s^{-1}$ do ar, o tempo de secagem diminuiu de 840 para 300 min e o consumo específico de energia reduziu de 41,37 para 17,78 $MJ.kg^{-1}$ de água evaporada. Já na velocidade de 1,25 $m.s^{-1}$, o tempo de secagem diminuiu de 600 para 165 min e o consumo específico de energia caiu de 73,8 para 50,91 $MJ.kg^{-1}$ de água evaporada.

Santos et al. (2016), avaliando a influência da temperatura sobre o tempo de secagem em frutos da palma, observou que, para a variação de temperatura de 50°C para 70°C, o tempo de secagem foi reduzido de 720 minutos para 540 minutos. Camicia et al. (2015) observaram uma redução do tempo de secagem para o feijão-caupi 10,4 horas para 2,1 horas para as temperaturas de 30°C e 50°C, respectivamente.

Yemmireddy (2013), estudando o efeito de diferentes métodos de secagem (ar forçado com velocidade de 0,4 $m.s^{-1}$, leito fluidizado com velocidade do ar de $\approx 45m.s^{-1}$, secador de impacto de ar com fluxos reversíveis a uma velocidade de $\approx 1,4 m.s^{-1}$ e um secador convectivo com velocidade do ar de $\approx 1,6 m.s^{-1}$), no tempo de secagem de *blueberries rabbiteye*, encontraram o menor e o

maior tempo de secagem para o secador de leito fluidizado e para o secador com ar forçado com velocidade de $0,4 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente.

No estudo da cinética de secagem de café cereja descascado, Ribeiro et al. (2003) observaram que, independentemente da temperatura do ar de secagem (40, 45 e 50°C), o aumento do fluxo de ar de $20 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$ para $30 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$ tem efeito significativo na taxa de redução de água apenas na primeira hora de secagem e que o fluxo de ar não teve influência na qualidade sensorial da bebida.

Durante a secagem de frutos de café com a utilização de três diferentes condições de temperatura e umidade relativa (35°C e 32,1%; 45°C e 15,7%; e 55°C e 10,2%), os autores observaram que maiores temperaturas acarretaram em maior taxa de secagem, chegando ao teor de água de equilíbrio em menor tempo de submissão do produto ao ar de secagem (CORRÊA et al., 2010b).

Uma alternativa, para aumentar a taxa de secagem sem causar danos térmicos aos grãos, é a redução da umidade relativa do ar de secagem por outros meios, tais como a circulação do ar por um material dessecante, que adsorve e remove a umidade do ar de secagem ou pela redução da temperatura de ponto de orvalho do ar (FORTES et al., 2006; KRZYZANOWSKI; WEST; FRANÇA NETO, 2006; ONDIER; SIEBENMORGEN; MAUROMOUSTAKOS, 2010).

Ondier, Siebenmorgen e Mauromoustakos (2010) estudaram a taxa de redução de água de grãos de arroz com teor de água inicial entre 17,5 e 19,6% (bu) submetidos à secagem com baixas temperaturas (26°C , 30°C e 34°C) e umidade relativa do ar entre 19% e 47%. Os autores observaram que, para uma mesma temperatura, a redução da umidade relativa reduziu significativamente o tempo de secagem e que quanto menor a temperatura maior foi o efeito da umidade relativa no tempo de secagem. A qualidade do arroz, avaliada em função do rendimento de grãos inteiros e da coloração dos grãos, não foi afetada

negativamente pelo aumento da taxa de secagem, indicando o uso dessa técnica de desumidificação do ar para a secagem de arroz.

A tecnologia disponível, atualmente, para secagem de café só permite que a taxa de secagem seja aumentada com o aumento da temperatura e do fluxo de ar. Porém, em diversas pesquisas tem sido demonstrado que, quando se visa à produção de cafés de qualidade superior, a temperatura da massa de café não pode ultrapassar 40 °C (BORÉM et al., 2006; BORÉM; MARQUES; ALVES, 2008; ISQUIERDO et al., 2013; OLIVEIRA, 2010; SAATH et al., 2010).

O efeito da taxa de secagem, em virtude da utilização de ar de secagem com diferentes umidades relativas, na qualidade do café natural, mesmo para baixas temperaturas, 35 e 40 °C e com a elevação da taxa de secagem provocada pela redução da umidade relativa do ar de secagem, tem efeito negativo na qualidade sensorial do café natural (ISQUIERDO et al., 2013).

2.6 Teor de água de equilíbrio

A quantidade de água em produtos agrícolas pode ser denominada como teor de água e este parâmetro reflete a quantidade total de água presente. Outro parâmetro que caracteriza o comportamento da água no produto é a atividade de água, parâmetro termodinâmico definido como o “potencial químico” da água nos grãos, ou seja, expressa a forma como a água está disponível para participar de reações químicas, bioquímicas e no desenvolvimento de fungos; e reflete como a umidade relativa do ar em equilíbrio com o produto (BORÉM, 2008). Em baixas atividades de água, a reação bioquímica e o crescimento de microrganismos são lentos, permitindo a conservação dos produtos por um tempo mais prolongado, pois o teor de água e a atividade de água são ligados entre si por isotermas de sorção à temperatura constante (LAZOUK et al., 2015).

As isotermas de sorção descrevem a relação entre o teor de água de equilíbrio em um material específico e a umidade relativa do ar circundante a

uma temperatura constante definida (SIMÓN et al., 2016). As isotermas de sorção permitem a determinação de valores característicos como o teor de água de equilíbrio e permitem conclusões sobre a estrutura porosa dos produtos agrícolas (GARBALÍNSKA et al., 2017). É uma das mais úteis e eficazes entre as tecnologias de controle de produtos armazenados (RAHIM; GARBA, 2016).

As isotermas de sorção de água são uma ferramenta muito importante, pois podem ser usadas, para prever as possíveis mudanças que podem, ocorrer na estabilidade dos produtos agrícolas, para definir o método de armazenamento, seleção de material e de embalagens ideais (WANI; KUMAR, 2016) e são úteis também em estudos de cinética de secagem (POLACHINI et al., 2016). O fenômeno de sorção ocorre, principalmente, na superfície do produto (SUBBAIAH; KIM, 2016).

As isotermas de sorção podem ser determinadas de duas maneiras, medindo-se a variação do teor de água do material ou do meio em que este se encontra, por meio dos métodos gravimétrico (variação da massa do material) e higrométrico (variação da umidade relativa do ar circundante) (LEHN; PINTO, 2004).

Vários modelos têm sido utilizados, para representar as isotermas de sorção e, embora possam ser muito bem adaptados aos dados obtidos, eles tipicamente têm erros do ponto de vista termodinâmico. Contudo, quando o modelo é desenvolvido, envolve sempre alguma simplificação do processo de sorção (SIMÓN et al., 2016). A determinação e modelagem de isotermas de sorção, em diferentes temperaturas, fornece informações sobre as condições do produto, durante o armazenamento, uma vez que a estabilidade do material pode ser predita pela disponibilidade de moléculas de água quanto a variações de temperatura e umidade relativa. Além disso, o grau de interações entre as moléculas de água e o produto é tão importante quanto a quantidade de moléculas de água contidas no mesmo (POLACHINI et al., 2016).

Durante muitos anos, o método do sal saturado foi o mais comumente usado para obter o teor de água em vários materiais. Embora o uso do instrumento de sorção de vapor dinâmico esteja se tornando bem difundido, o método do sal saturado continua a ser utilizado (HIMMEL; MAI, 2015; SIMON et al., 2015).

Como a temperatura afeta a mobilidade das moléculas de água e, portanto, o equilíbrio dinâmico entre o vapor de água e as fases adsorvidas, a temperatura pode ter um impacto significativo sobre o produto (BURGH; FOSTER; VALIPOUR, 2016). Embora a sorção possa ser benéfica, às vezes, também, pode levar a mudanças físicas e químicas no material, bem como a impactos negativos no processamento. Cada material absorve a umidade a velocidades diferentes em diferentes condições de temperatura e umidade relativa (ROSENTRATER; VERBEEK, 2017).

De acordo com Spada et al. (2013), a indústria tem grande interesse na determinação de isotermas de sorção porque elas fornecem dados sobre a estabilidade de prateleira de um produto. Além disso, elas podem fornecer informações significativas sobre outras etapas do processo, incluindo embalagem, armazenamento, design e otimização de equipamentos de secagem.

2.7 Modelagem matemática e simulação da secagem do café

A simulação matemática do processo de secagem é fundamental para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos. O uso de modelos matemáticos, no decorrer da secagem, contribui para a execução dos projetos e dimensionamento dos equipamentos, bem como a compreensão dos processos relacionados (CORRÊA et al., 2011; RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010).

Em alguns estudos mostrou-se que o desenvolvimento de um modelo matemático que descreva a cinética do mecanismo de fluxo interno por difusão é

importante, pois determinações experimentais podem ser custosas e complexas. Entretanto somente a determinação do modelo, em muitos casos, não é o suficiente, quando ele não possui solução analítica. Portanto encontrar um método numérico adequado de solução se faz necessário (ZANARDI et al., 2016).

De acordo com Midilli, Kucuk e Yapar (2002), os modelos matemáticos são usados com o intuito de estimar o tempo de secagem dos produtos e, também, para obter as curvas de secagem que representam a operação.

Os estudos da cinética de secagem têm despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diferentes produtos. Na literatura, são descritos vários métodos (teóricos, semiempíricos e empíricos), para se analisar a secagem de produtos agrícolas: sementes de crambe (FARIA et al., 2012), sementes de abóbora (SACILIK, 2007), sementes de amaranto (ABALONE; GASTÓN; CASSINERA, 2006), grãos de trigo parboilizados (MOHAPATRA; RAO, 2005), dentre outros (BURMESTER; EGGERS, 2010; DI SCALA; CRAPISTE, 2008; HERNÁNDEZ-DÍAZ et al., 2008; ISQUIERDO et al., 2013; NILNONT et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2010; PUTRANTO et al., 2011).

Os métodos semiempíricos e empíricos de análise do processo de secagem, que geralmente baseiam-se nas condições externas ao produto, como temperatura e umidade relativa do ar de secagem, entretanto não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e massa no interior dos grãos e considera-se que todo o processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente (ANDRADE; BORÉM, 2008).

Esses métodos baseiam-se, geralmente, na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa, presumindo-se que, durante a secagem, as condições são isotérmicas e que a transferência de água se restringe à superfície do produto. Já nos métodos teóricos, normalmente, consideram-se

não somente as condições externas, mas também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos (ANDRADE; BORÉM, 2008).

Apesar de várias teorias terem sido propostas, para prever o comportamento da secagem de grãos e sementes, na maioria das vezes, as relações semiempíricas e empíricas têm se mostrado como melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as faixas de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar das quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Diversos modelos têm sido ajustados para descrever o processo de secagem de produtos capilares porosos higroscópicos. Dentre eles, estão os modelos de Midilli, de Page, de Thompson, de Verma, de Henderson e Pabis, de Henderson e Pabis modificado, de dois termos, de exponencial de dois termos, de Newton, de Wang e Sing e de Valcam (AKPINAR, 2006; ANDRADE et al., 2006; CORRÊA et al., 2010b; CORRÊA; RESENDE; RIBEIRO, 2006; GONELLI et al., 2009; ISQUIERDO et al., 2013; KASHANINEJAD et al., 2007; MOHAPATRA; RAO, 2005; RESENDE et al., 2009, 2011; RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010; SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2012, 2013).

2.8 Resistência à desidratação

Para o desenvolvimento de modelos que permitam avaliar a influência de cada componente anatômico do fruto do café à desidratação, é necessário que se verifique qual a resistência de cada uma dessas partes.

Geralmente aceita-se que, na secagem, a difusão da água e a lei de Fick controlam as mudanças do teor de água e descrevem com sucesso as curvas de secagem (RESIO; AGUERRE; SUAREZ, 2005).

Becker e Sallans (1957) postularam dois mecanismos de migração de água durante a desidratação de grãos de trigo. Para níveis de teor de água acima de 14% (b.s.), a água migra por estrutura porosa de grãos de trigo como um fluxo viscoso com o gradiente de pressão como força motriz para a difusão. À medida que o teor de água diminui, a água não preenche completamente os poros, mas forma um filme que cobre as superfícies internas.

Além do gradiente de concentração de água e gradiente de pressão de vapor, outros gradientes, tais como gradiente de pressão de espalhamento, foram supostos como sendo a força motriz do processo de secagem (BABBITT, 1950). A escolha da força motriz é importante desde o ponto de vista físico, porque a consideração cuidadosa dos aspectos físicos pode contribuir para o desenvolvimento de relações mais precisas entre o coeficiente de difusão e o teor de água.

O coeficiente de difusão (DEF) descreve a velocidade de saída de água do produto submetido ao processo de secagem e envolve os efeitos de todos os fenômenos que podem interferir sobre a migração da água, visto que seu valor é obtido por meio do ajuste de valores experimentais. Como a difusividade pode alterar, à medida que mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), ela não é intrínseca ao material. Sendo assim, convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva (OLIVEIRA; OLIVEIRA; PARK, 2006).

Dessa forma, como o coeficiente de difusão descreve a velocidade à saída de água do produto, pode ser então utilizado como parâmetro, para o desenvolvimento de modelos que descrevam a resistência imposta por cada componente anatômico à saída de água.

A resistência à desidratação dos tecidos do pericarpo e do endosperma dependerá de cada um desses fatores e da relação entre eles, aliados com as diferenças anatômicas e os componentes químicos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do experimento

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Para a condução do experimento, foram utilizados frutos cereja de café (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí Vermelho), colhidos manualmente em uma lavoura localizada no município de Ingaí - MG. Após a colheita, os frutos foram separados em água, por diferença de densidade, removendo-se os de menor massa específica (secos, chochos, brocados e mal granados).

Após a separação hidráulica, uma nova seleção manual foi realizada para garantir que as amostras fossem constituídas somente por frutos maduros. Os frutos maduros selecionados foram, então, divididos em duas partes: uma parte foi levada diretamente para o secador, constituindo, assim, a porção de café “natural” (processamento via seca) e a outra parte foi descascada, em descascador mecânico, da marca Penagos, do modelo despulpador classificador de verdes (DCV 183). O café em pergaminho foi, então, levado ao secador, constituindo, assim, a porção café descascado (processamento via úmida).

Os frutos colhidos foram, ainda, processados para a obtenção das partes do café: exocarpo (casca + parte do mesocarpo), mesocarpo (mucilagem), endocarpo (pergaminho) e endosperma (grãos), para que fosse realizada a secagem individualizada.

Os frutos de café foram descascados manualmente, a fim de evitar possíveis danos no exocarpo, dessa forma, foi obtida a porção exocarpo + parte do mesocarpo. Para a retirada da maior parte do mesocarpo (mucilagem), que fica aderida ao exocarpo, o exocarpo foi lavado em água corrente e depois

colocado em peneiras, para que a água superficial fosse escoada e, logo depois, foi determinado o teor de água inicial.

O mesocarpo foi obtido, a partir da passagem dos grãos que foram descascados por uma máquina centrífuga (Centriflux[®]). Nessa etapa, não foi utilizada água, a fim de evitar que haja interferência na quantidade de mesocarpo obtido. Logo após, foi realizada a passagem do mesocarpo por um filtro (peneira de plástico) retirando as impurezas sólidas que ficam ali retidas. O mesocarpo foi levado ao secador em placas de petri com dimensões para a realização da secagem.

O endocarpo foi obtido com o descascamento manual dos grãos com o auxílio de pinças. Estes grãos já haviam sido previamente descascados manualmente. No entanto, para a secagem, só foram utilizados os endocarpos que eram retirados e ficavam íntegros, sem ocorrência de danos em sua estrutura.

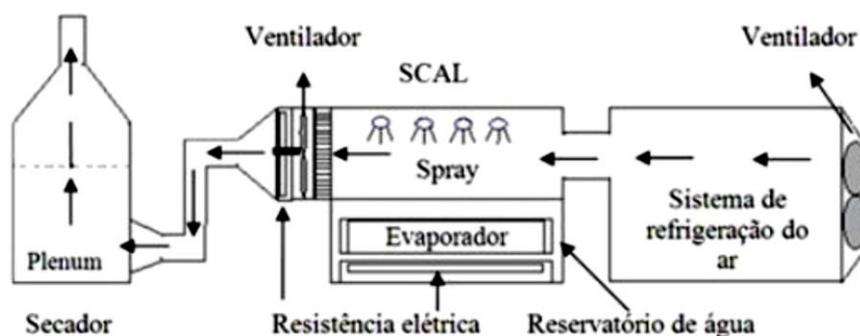
Após a retirada do endocarpo dos grãos, foi possível a obtenção do endosperma. Assim, endocarpo e endosperma foram levados ao secador em saquinhos de poliéster para realização da secagem e uma amostra de cada tecido do pericarpo e o endosperma foram levadas para a determinação do teor de água inicial.

3.2 Sistema de secagem

Para a condução da secagem, foi utilizado um sistema de condicionamento de ar acoplado a um secador de camada fixa (Figura 2A e 2B), adotando-se a temperatura do ar de secagem de 40°C (para não provocar danos térmicos ao produto), fluxo de ar de $20\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ e umidades relativas de 10%; 17,5%; 25% e 32,5%. As características do ar foram controladas por um sistema de condicionamento de ar de laboratório (SCAL), modelo proposto por Fortes et al. (2006). Esse equipamento permite o controle do fluxo, da temperatura (T) e

da umidade relativa (UR) do ar de secagem com precisão. Para se obter as menores temperaturas de ponto de orvalho e, conseqüentemente, a menor umidade relativa, antes do SCAL, o ar foi pré-condicionado por um sistema de refrigeração composto por três unidades de ar condicionado.

Figura 2 - Sistema de secagem que foi utilizado para a secagem mecânica do café.



Fonte: Fortes et al. (2006).

Este sistema fornece ar com temperatura de ponto de orvalho na faixa de 2°C a 30°C e temperatura de bulbo seco de 2°C a 50°C, com vazões de até 10 m³ min⁻¹. O secador é composto por quatro bandejas removíveis com fundo perfurado, de seção quadrada, com lados iguais a 0,3 m e profundidade de 0,1 m, localizadas sobre um plenum para uniformização do fluxo de ar.

O fluxo de ar foi regulado por um inversor de frequência, marca Weg, modelo CFW-10, que controla a rotação do ventilador centrífugo que insufla o ar aquecido no plenum do secador e a velocidade do ar foi monitorada com o uso de um anemômetro de pás.

A temperatura de ponto de orvalho foi medida no interior da câmara do SCAL e a temperatura do ar de secagem foi medida no plenum, sob as bandejas de fundo perfurado, por termopares conectados a controladores universais marca

Novus, modelo N1100. A umidade relativa do ar de secagem foi medida por termohigrômetro digital portátil, com sensor inserido no interior do plenum. A temperatura dos frutos de café foi medida com termômetros de mercúrio inseridos no centro da massa.

Durante toda a secagem, o café foi pesado para posterior confecção das curvas, tempos e taxas de secagem.

3.3 Teor de água

O teor de água dos frutos de café, do café em pergaminho e do endosperma, no início e no fim da secagem, foi determinado, utilizando-se o método padrão de estufa, $105\pm 3^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas, de acordo com Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Já o teor de água do café seco beneficiado e do endosperma foram determinados pelo método padrão ISO 6673 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 2003).

Para a determinação do teor de água inicial e final do exocarpo + parte do mesocarpo, mesocarpo e endocarpo, foi utilizado o método descrito pelo Instituto Adolfo Lutz, em que as amostras são levadas para a estufa $105\pm 3^{\circ}\text{C}$, pesando o produto com intervalo de 3 horas até peso constante, de acordo com o seguinte cálculo (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2005):

$$U = \frac{100 \times N}{P} \quad (1)$$

Em que:

N N° de gramas de umidade (perda de massa em g).

P N° de gramas da amostra.

Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial dos frutos do café em pergaminho e das partes separadas do café, o acompanhamento da secagem foi

realizado pelo método gravimétrico (perda de massa) até atingir o teor de água desejado, utilizando-se uma balança analítica com resolução de 0,01 g, de acordo com a equação abaixo.

$$U_t = \frac{M_{ai} - (M_{ti} - M_{tt})}{M_{ms}} \quad (2)$$

Em que:

- U_t : Teor de água no tempo t (kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs)).
- M_{ai} : Massa de água inicial (kg).
- M_{ti} : Massa total inicial (kg).
- M_{tt} : Massa total no tempo t (kg).
- M_{ms} : Massa de matéria seca (kg).

Durante a secagem, foram realizadas pesagens com intervalo de tempo de 10, 20, 30, 60 e 120 minutos. Os intervalos de tempo de 10 e 20 minutos foram utilizados para o exocarpo + parte do mesocarpo, mesocarpo e endocarpo, tendo em vista que esses tecidos atingiam peso constante rapidamente, assim, após três pesagens consecutivas apresentando o mesmo valor, com diferença de 0,01, a secagem era encerrada.

Para o endosperma, café natural e café descascado, os intervalos de tempo foram de 30, 60 e 120 minutos até que atingissem o teor de água ideal de armazenamento em torno de 11% (b.s.).

3.4 Taxa de secagem

A velocidade com que a água é evaporada foi determinada, a partir da taxa de secagem do produto, de acordo com a seguinte expressão:

$$Tx. Sec = \frac{U_{ant} - U_{at}}{\Delta t} \quad (3)$$

Em que:

Tx. Sec.: Taxa de secagem (g de água.kg de matéria seca⁻¹.h⁻¹).

U_{ant}: Teor de água no tempo anterior (g de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs)).

U_{at}: Teor de água atual (g de água.kg matéria seca⁻¹ (bs)).

Δt: Intervalo de tempo entre as pesagens (h).

3.5 Razão de umidade

Na análise de dados da secagem, a razão de umidade (RU) foi essencial para descrever diferentes modelos de secagem em camada fina. A razão de umidade, durante a secagem, em função das variáveis avaliadas, foi determinada pela equação abaixo. Para todas as condições testadas, os valores de razão de umidade, em função do tempo de secagem, foram ajustados aos modelos utilizados para descrever a cinética de secagem dos cafés e das partes separadas do café cereja (Tabela 3).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (4)$$

Em que:

RU: Razão de umidade (adimensional).

U: Teor de água do produto no tempo t (decimal, (bs)).

U_e: Teor de água de equilíbrio do produto (decimal, (bs)).

U_i: Teor de água inicial do produto (decimal, (bs)).

Tabela 3 - Modelos matemáticos usados para prever a cinética de secagem.

Designação do modelo	Modelo	Equação
Dois termos ¹	$RU = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(5)
Exponencial de dois termos ²	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \exp(-k \cdot t)$	(6)
Henderson & Pabis modificado ³	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t)$	(7)
Henderson & Pabis ⁴	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(8)
Midilli ⁵	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(9)
Newton ⁶	$RU = \exp(-k \cdot t)$	(10)
Page ⁷	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	(11)
Thompson ⁸	$RU = \exp\{-a - (-a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0,5}\} \cdot (2 \cdot t)$	(12)
Verma ⁹	$RU = -a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \exp(-k_1 \cdot t)$	(13)
Wang & Sing ¹⁰	$RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	(14)
Valcam ¹¹	$RU = a + b \cdot t + c \cdot t^{1,5} + d \cdot t^2$	(15)
Aproximação da difusão ¹²	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	(16)

¹Henderson (1974); ²Sharaf-Eldee, Blaisdell e Hamdy (1980); ³Karathanos (1999); ⁴Henderson e Pabis (1961); ⁵Midilli, Kucuk e Yapar (2002); ⁶Lewis (1921); ⁷Page (1949); ⁸Thompson, Peartt e Foster (1968); ⁹Verma et al. (1985); ¹⁰Wang e Sing (1978); ¹¹Siqueira, Resende e Chaves (2013).

Em que:

- RU: Razão de umidade.
t: Tempo de secagem (h).
k, k₀ e k₁: Constantes de secagem.
a, b, c, d, n: Coeficientes dos modelos.

3.6 Teor de água de equilíbrio higroscópico

Os teores de água de equilíbrio higroscópico foram determinados experimentalmente, de acordo com o tipo de processamento do café natural e descascado e de suas partes (exocarpo + parte do mesocarpo; mesocarpo; endocarpo e endosperma).

3.6.1 Análise da higroscopicidade

Os testes de higroscopicidade foram realizados em câmara incubadora BOD e estufa, sendo as amostras armazenadas de forma hermética em gerbox de, aproximadamente, 50ml com controle de temperatura e umidade relativa do ar. Para cada teste de equilíbrio higroscópico, foram utilizadas amostras significativas de produto e envolvidas por um tecido permeável (tipo voile), de forma a garantir maior superfície de contato do material com o ambiente. As temperaturas dos experimentos foram obtidas, a partir das regulagens das câmara e estufa, e a umidade relativa, a partir das soluções a serem utilizadas, sendo as temperaturas que foram experimentadas de 20°C, 30°C, 55°C e 70°C, por, aproximadamente, 168 horas, até que durante três pesagens consecutivas apresentarem o mesmo valor, com diferença de 0,01. As soluções utilizadas para o experimento e suas respectivas umidades relativas de equilíbrio, em função da temperatura do ar ambiente, estão dispostas na Tabela 4 (GREENSPAN, 1977).

Tabela 4 - Umidade relativa de equilíbrio (%) de soluções salinas saturadas.

Temperatura °C	Sais		Umidade Relativa
20	Cloreto de Lítio	LiCl	11,31± 0,31
	Acetato de Potássio	CH ₃ COOK	23,11± 0,25
	Cloreto de Magnésio	MgCl ₂	33,07± 0,18
	Nitrato de Magnésio	Mg(NO ₃)	54,38± 0,23
	Cloreto de Potássio	KCl	85,11± 0,29
30	Cloreto de Lítio	LiCl	11,31± 0,31
	Acetato de Potássio	CH ₃ COOK	23,11± 0,25
	Cloreto de Magnésio	MgCl ₂	33,07± 0,18
	Nitrato de Magnésio	Mg(NO ₃)	54,38± 0,23
	Cloreto de Potássio	KCl	85,11± 0,29
55	Cloreto de Lítio	LiCl	11,03 ± 0,23
	Cloreto de Magnésio	MgCl	29,93 ± 0,16
	Brometo de Sódio	NaBr	50,15 ± 0,65
	Cloreto de Potássio	KCl	80,70 ± 0,35
70	Cloreto de Lítio	LiCl	10,75 ± 0,33
	Cloreto de Potássio	KCl	79,49 ± 0,57

Fonte: Da autora (2017).

Para a verificação e quantificação do fenômeno de equilíbrio higroscópico, ainda em laboratório, as amostras foram pesadas antes e depois de serem, respectivamente, colocadas e retiradas da câmara BOD e estufa, após entrarem em equilíbrio térmico com o ambiente circundante em condições herméticas. As pesagens foram realizadas em balança analítica, SHIMADZU modelo AY220, com 4 casas decimais. Dessa maneira, foram verificados os diversos teores de água de equilíbrio, para as várias combinações de temperatura e umidade relativa do ar. Para um melhor tratamento dos dados, foram utilizadas, para cada combinação de umidade relativa do ar e temperatura, a média de 3 repetições para os tratamentos: natural, descascado, exocarpo + parte do mesocarpo e endocarpo; e média de 2 repetições, para os tratamentos endosperma e mesocarpo, foram utilizadas essas repetições pela quantidade de material disponível.

De acordo com Teixeira, Andrade e Silva (2012), os modelos matemáticos, obtidos na literatura e representativos da higroscopicidade de produtos agrícolas, utilizados para análise do produto, foram escolhidos, aleatoriamente, em função da avaliação da temperatura e umidade relativa do ar ambiente, para a verificação do que melhor se ajustasse à realidade empírica do produto, de maneira a melhor representar sua isoterma. Os modelos utilizados estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Modelos matemáticos usados para a representação do equilíbrio higroscópico.

Modelo	Equação	
Chung Pfof	$U_e = a - b \cdot \ln[-(T + c) \cdot \ln(UR)]$	(17)
Copace	$U_e = \exp[a - (b \cdot T) + (c \cdot UR)]$	(18)
GAB Modificado	$U_e = \frac{ab(c/T)UR}{\{[1 - b UR][1 - b UR + b(c/T)UR]\}}$	(19)
Halsey Modificado	$U_e = [\exp(a - bT) / - \ln(UR)]^{1/c}$	(20)
Henderson	$U_e = [\ln(1 - UR) / (-a \cdot T_{abs})]^{1/b}$	(21)
Henderson Modificado	$U_e = \{\ln(1 - UR) / [-a \cdot (T + b)]\}^{1/c}$	(22)
Oswin	$U_e = (a - b \cdot T) / [(1 - UR) / UR]^{1/c}$	(23)
Sabbab	$U_e = a (UR^b / T^c)$	(24)
Sigma Copace	$U_e = \exp\{a - (bT) + [c \exp(UR)]\}$	(25)

Fonte: Da autora (2017).

Em que U_e : Teor de água do produto, b.s.; UR: Umidade relativa do ar, decimal; T: Temperatura do ar ambiente, °C; T_{abs} : Temperatura absoluta do ar ambiente, K; a, b, c: Parâmetros que dependem da natureza do produto.

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* STATISTICA 5.0® (STATSOFT, 1995). A escolha do melhor modelo foi em função dos parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2). O desvio padrão da estimativa e o erro médio relativo foram calculados, respectivamente, pelas equações:

$$SE = \sqrt{\sum (Y - \hat{Y})^2 / GLR} \quad (26)$$

$$P = [(100/n) \sum |(Y - \hat{Y})| / Y] \quad (27)$$

Em que:

SE: Desvio padrão da estimativa (decimal).

Y: Valor observado experimentalmente.

\hat{Y} : Valor calculado pelo modelo.

GLR: Graus de liberdade do modelo (nº de parâmetros do modelo – 1).

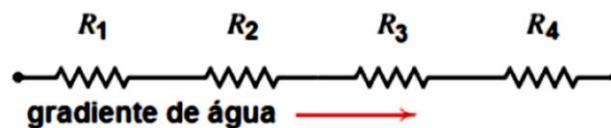
P: Erro médio relativo (%).

n: Número de dados observados.

3.7 Sistema de resistência

O sistema de resistência das partes intrínsecas do café cereja à saída de água foi considerado como resistência em série da seguinte forma (FIGURA 2):

Figura 3 - Esquema de distribuição de resistências à saída de água das diversas partes intrínsecas do café cereja.



Fonte: Da autora (2017).

$$R_s = R1 + R2 + R3 + R4 \quad (28)$$

Em que:

R_s : Resistência total.

R1: Exocarpo + parte do mesocarpo.

R2: Mesocarpo.

R3: Endocarpo.

R4: Endosperma.

Para a modelagem da secagem de cada parte do fruto do café, considerou-se um coeficiente de correção determinado, experimentalmente, para cada uma das partes de forma a corrigir o erro do fato de as partes já estarem separadas. Pode-se afirmar que a resistência total foi estabelecida, seguindo a expressão abaixo:

$$R_s = \left(\frac{1}{R_1} * D1\right) + \left(\frac{1}{R_2} * D2\right) + \left(\frac{1}{R_3} * D3\right) + \left(\frac{1}{R_4} * D4\right) \quad (28)$$

Em que:

R_s : Resistência total.

R1: Exocarpo + parte do mesocarpo.

R2: Mesocarpo.

R3: Endocarpo.

R4: Endosperma.

D1: Coeficiente de correção da resistência imposta à remoção de água pela Exocarpo + parte do mesocarpo.

D2: Coeficiente de correção da resistência imposta à remoção de água pela Mesocarpo.

D3: Coeficiente de correção da resistência imposta à remoção de água pelo Endocarpo.

D4: Coeficiente de correção da resistência imposta à remoção de água pelo Endosperma.

Para o desenvolvimento do modelo de resistência utilizado, levou-se em consideração que a resistência de cada componente anatômico depende do valor do coeficiente de difusão efetivo.

De acordo com Resio, Aguerre e Suarez (2005), a equação se desenvolve, ao supor que a força motriz, para a difusão da água ligada, é a pressão de espalhamento, π ; para condições isotérmicas, ela pode estar relacionada à energia livre da superfície pela seguinte expressão (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 1997):

$$d\pi = \sigma RT d(\ln a_w) \quad (29)$$

Em que σ é a concentração superficial de água, R a constante de gás, T a temperatura absoluta e a_w atividade da água. A concentração da superfície da água e o teor de água estão relacionados por meio da equação:

$$\sigma = \frac{m}{M\gamma} \quad (30)$$

Em que m é o teor de água, M o peso molecular da água e γ a área de superfície específica do sólido. Substituindo a equação (30) pela equação (29) e integrando resultados em:

$$\pi = \frac{RT}{M\gamma} \int_0^{a_w} m d(\ln a_w) \quad (31)$$

A taxa de fluxo de massa da água por pressão de espalhamento é definida como (BABBITT, 1950):

$$J = -\eta\rho m \frac{d\pi}{dr} \quad (32)$$

Em que η é um coeficiente de resistência, ρ a densidade sólida, m o teor de água e $d\pi/dr$ gradiente de pressão de espalhamento.

A equação de diferenciação (31) e a substituição do resultado na equação (32) resultam em:

$$J = -\eta\rho \frac{RT}{M\gamma} \frac{m^2}{a_w} \frac{da_w}{dm} \frac{dm}{dr} \quad (33)$$

A equação de continuidade diferencial para a migração de água em um sólido poroso de forma esférica é:

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial t} (r^2 J) = 0 \quad (34)$$

Em que ρ_A é a concentração de água por unidade de volume de sólido. Se a expressão de J dada pela equação (33) for substituída pela equação (37), levando em consideração que $\rho_A = m\rho$, temos como resultado a equação:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 D(m) \frac{\partial m}{\partial r} \right\} \quad (35)$$

Em que $D(m)$ representa a dependência do coeficiente de difusão sobre o teor de água, dada pela expressão:

$$D(m) = \frac{\eta RT}{M\gamma} \frac{m^2}{a_w} \frac{da_w}{dm} \quad (36)$$

A partir desta equação, o coeficiente de difusão pode ser obtido avaliando a_w e da_w/dm da equação isotérmica GAB. O modelo GAB de três parâmetros pode ser escrito como (SCHÄR; RUÈGG, 1985):

$$\frac{m}{m_m} = \frac{Cka_w}{(1 - ka_w)(1 - ka_w + Cka_w)} \quad (37)$$

Em que m_m é o teor de água em monocamada e C e k são os parâmetros da equação de GAB. Operando com a equação (37) e substituindo os resultados pela equação (36), temos a expressão:

$$D(m) = \frac{\eta \cdot R \cdot T}{M \cdot \gamma} \cdot \left(\frac{C \cdot m_m \cdot k \cdot a_w}{1 + (C - 1) \cdot k^2 \cdot a_w^2} \right) \quad (38)$$

Para o cálculo do coeficiente de difusão que foi utilizado como parâmetro, para determinação, foi utilizado o modelo (COSTA et al., 2011):

$$RU = \frac{X^* - X_e^*}{X_i^* - X_e^*} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t}{9} \left(\frac{3}{R}\right)^2\right) \quad (39)$$

Em que RU é a razão de umidade, D o coeficiente de difusão, n o número de termos, nesse caso, fez-se a aproximação de 8 termos, R o raio equivalente da esfera e t o tempo.

O fruto do café, considerado como esferoide, determina que a área da superfície específica do produto seja calculada como sendo:

$$\gamma = 4 \pi \cdot r^2 \quad (40)$$

Assim, a equação 40 foi utilizada, para determinar a área específica do café natural, descascado e do endosperma.

Para a determinação da área específica da porção exocarpo + parte do mesocarpo e endosperma, foi utilizada a equação 41 e, para o mesocarpo, foi utilizada a equação 42:

$$\gamma = \pi \cdot r^2 + \pi \cdot (r - x)^2 \quad (41)$$

$$\gamma = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (42)$$

Em que:

- D (m): Coeficiente de difusão ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).
- η : Coeficiente de resistência ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$)
- R: Constante universal dos gases ($8,3144621 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$).
- T: Temperatura absoluta (K).
- M: Peso molecular da água ($\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$).
- γ : Área específica do sólido (m^2).
- a_w : Atividade de água (adimensional).
- m_m : Teor de água inicial (b.s).
- C, k: Parâmetros da equação de GAB.
- R Raio da esfera (m^2).
- D: Diâmetro da placa de petri na secagem do mesocarpo (m^2).
- x: Espessura média (exocarpo ou endosperma) (m^2).

Para realizar a modelagem matemática dos dados, a fim de corrigir o fato das partes já estarem separadas, foi necessária a criação de coeficientes de correção para cada parte do fruto do café. Levando em consideração que a

resistência total equivale à resistência do café natural, o modelo proposto para a resistência à saída de água foi descrito como:

$$\eta_t = A.X_{cp}.\eta_{cp} + B.X_m\eta_m + C.X_p.\eta_p + D.X_g n_g \quad (43)$$

Em que:

- η_t : Coeficiente de resistência total ($m^2.s.kg^{-1}$)
 η_{cp} : Coeficiente de resistência do exocarpo ($m^2.s.kg^{-1}$)
 η_m : Coeficiente de resistência do mesocarpo ($m^2.s.kg^{-1}$)
 η_p : Coeficiente de resistência do endocarpo ($m^2.s.kg^{-1}$)
 n_g : Coeficiente de resistência do endosperma ($m^2.s.kg^{-1}$)
 X_{cp} ; X_m ; X_p ; X_g : Influência da espessura média na saída de água (decimal – adimensional)
A, B, C, D: Coeficientes de correção

A influência da espessura média, na saída de água, foi calculada levando em consideração que a influência da espessura do café natural é a maior influência que se pode encontrar à saída de água. Assim, calculou-se:

$$X_{cp} = \frac{\textit{espessura média do exocarpo + mesocarpo}}{\textit{espessura média do café natural}} \quad (44)$$

$$X_m = \frac{\textit{espessura média do mesocarpo}}{\textit{espessura média do café natural}} \quad (45)$$

$$X_p = \frac{\textit{espessura média do endocarpo}}{\textit{espessura média do café natural}} \quad (46)$$

$$X_g = \frac{\textit{espessura média do endosperma}}{\textit{espessura média do café natural}} \quad (47)$$

Os coeficientes de correção (A, B, C e D) do modelo proposto foram obtidos pelo *software* STATISTICA 5.0[®] (STATSOFT, 1995), realizando análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton.

3.8 Propriedades físicas

As variações das propriedades físicas dos frutos de café durante a secagem são características relevantes na otimização dos processos industriais e no desenvolvimento de novos projetos e equipamentos utilizados nas operações pós-colheita.

3.8.1 Contração volumétrica

A contração volumétrica das amostras de cafés e das partes separadas dos cafés foi determinada, por meio de medidas com paquímetro digital, das dimensões no início, durante e ao final da secagem. Com estas medidas, foi possível estimar e equacionar a contração volumétrica, em função do teor de água e de diferentes condições do ar de secagem, para cálculo dos parâmetros do coeficiente de resistência.

3.9 Delineamento experimental e análises estatísticas

Em decorrência das combinações entre processamento e umidade relativa, foram obtidas as diferentes condições de secagem. Para cada tratamento, foram realizadas quatro repetições. O fluxo de ar adotado foi de $20\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$ com temperatura do ar de 40°C e umidades relativas de 10%; 17,5%; 25% e 32,5%.

O experimento foi montado num esquema fatorial 4×6 (4 umidades relativas do ar de secagem e 6 tipos de café e partes do café cereja [1 – café natural e 2 – café descascado, 3 – exocarpo + parte do mesocarpo, 4- mesocarpo, 5 – endocarpo, 6 – endosperma]) em um delineamento inteiramente casualizado

com quatro repetições. Os resultados foram analisados, por meio de análise de variância e regressão, utilizando-se o programa estatístico *software* STATISTICA 5.0[®].

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Isotermas de sorção do café natural, descascado e partes do fruto

De acordo com os teores de água de equilíbrio foram determinadas as isotermas de sorção do café natural, descascado, tecidos do pericarpo e do endosperma do café arábica, de acordo com as condições ambientais controladas.

4.1.1 Isotermas de sorção do café natural

Para fazer a modelagem das isotermas de dessorção do café natural, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C, foram utilizados os seguintes teores de água finais, após atingirem o equilíbrio higroscópico com o ambiente (Tabela 6):

Tabela 6 - Teor de água inicial (Ti) e teor de água final (Tf), base seca, do café natural, após atingirem equilíbrio higroscópico com o ambiente.

Teor de água (b.s.)	Temperatura (°C)							
	20	UR (%)	30	UR (%)	55	UR (%)	70	UR (%)
Ti	0,1084	85,11	0,1084	83,62	0,1084	80,70	0,1084	79,49
	0,1084	54,38	0,1084	51,40	0,1084	50,15	0,1084	10,75
	0,1084	33,07	0,1084	32,44	0,1084	29,93		
	0,1084	23,11	0,1084	21,61	0,1084	11,03		
	0,1084	11,31	0,1084	11,28				
Tf	0,3229	85,11	0,2518	83,62	0,2502	80,70	0,1747	79,49
	0,1843	54,38	0,1994	51,40	0,0996	50,15	0,0610	10,75
	0,1063	33,07	0,1326	32,44	0,0785	29,93		
	0,1053	23,11	0,0969	21,61	0,0571	11,03		
	0,1059	11,31	0,0952	11,28				

Fonte: Da autora (2017).

Na Tabela 7, estão representados os valores dos coeficientes de determinação (R^2), erro relativo médio (P) e desvio padrão da estimativa (SE) dos diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais das isotermas de dessorção do café natural, para as diferentes temperaturas.

Tabela 7 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados na modelagem das isotermas de sorção do café natural.

MODELOS	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS		
	R^2	P	SE
Chung Pfost	95,08	0,643	0,023
Copace	96,68	0,673	0,001
GAB modificado	93,48	1,404	0,036
Halsey modificado	96,16	0,650	0,006
Henderson	91,94	5,533	0,021
Henderson modificado	95,42	0,390	0,010
Oswin	95,50	0,317	0,004
Sabbab	93,33	0,907	0,024
Sigma Copace	96,78	0,612	0,006
GAB	90,46	4,377	0,016

Fonte: Da autora (2017).

Nota-se que todos os modelos ajustados apresentam valores de coeficiente de determinação satisfatórios ($R^2 > 90\%$). Todos os modelos apresentam erro relativo médio abaixo de 10%, indicando que esses modelos são adequados para representação do fenômeno estudado. O valor do desvio padrão apresentou valores satisfatórios, para todos os modelos, considerando que SE próximos a 0 (zero) são ideais (MOHAPATRA; RAO, 2005). Esses critérios de seleção foram utilizados, para todos os tratamentos realizados (todos os tecidos do pericarpo, endosperma e café descascado), dessa forma, estabelecendo o modelo que melhor descreve o processo estudado.

O melhor ajuste foi obtido, para o modelo de Sigma Copace, o qual foi escolhido, para representar as isotermas de sorção do café natural, apresentando os valores dos parâmetros estatísticos $R^2=96,78\%$; $P=0,612\%$ e $SE=0,006$.

Alguns estudos, analisando as isotermas de sorção em frutos de café *Coffea canephora*, apresentam o modelo de Sigma Copace como o que teve os melhores ajustes dos parâmetros estatísticos (CORRÊA et al., 2014). O modelo Sigma Copace, também, representou, de forma satisfatória, a higroscopicidade do milho pipoca (CORRÊA et al., 1998), café solúvel (CORRÊA; AFONSO

JÚNIOR; STRINGHETA, 2000) e sementes de jacarandá-da-bahia e angico-vermelho (MESQUITA; ANDRADE; CORRÊA, 2001).

Na Tabela 8, são mostrados os coeficientes do modelo matemático escolhido, com base nos critérios de seleção estatísticos, para modelar as isotermas de sorção do café natural.

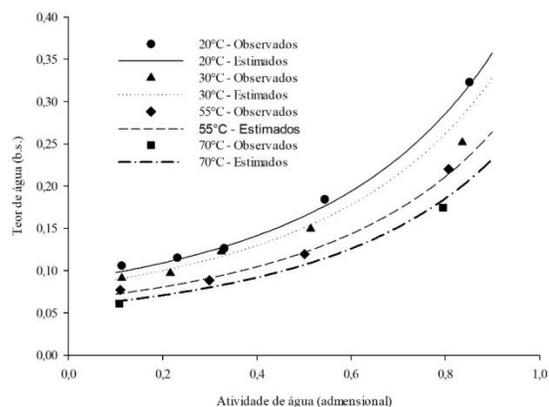
Tabela 8 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados as isotermas de sorção do café natural.

MODELO	COEFICIENTES		
	a	b	c
Sigma Copace	-3,21422	0,008628	0,958868

Fonte: Da autora (2017).

Na Figura 4, é mostrada a isoterma de sorção do café natural, com os dados experimentais e estimados pelo modelo matemático de Sigma Copace, em função do teor de água (base seca) e atividade de água (decimal).

Figura 4 - Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do café natural, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.



Fonte: Da autora (2017).

O modelo de Sigma Copace se adequou bem aos dados experimentais, para toda a faixa de atividade de água e teor de água de equilíbrio, nas quatro temperaturas estudadas para o café natural, conforme se pode observar na Figura 4.

Além disso, o teor de água de equilíbrio do café natural diminui com o aumento da temperatura para uma mesma atividade de água. Costa et al. (2015), ao estudar as isotermas de frutos de crambe e Rosa, Villa-Vélez e Telis-Romero (2013), em sementes de laranja, verificaram esse decréscimo com o aumento da temperatura, para uma mesma atividade de água, seguindo a tendência da maioria dos produtos vegetais já estudados.

A diminuição do teor de água de equilíbrio, à medida em que se aumenta a temperatura, pode ser explicada com base no aumento da pressão de vapor da água no ar e na superfície do produto (CAMPOS et al., 2009). A utilização desses dados experimentais das isotermas de dessecção, de um modo geral, auxilia a tomada de decisão sobre medidas preventivas para a manutenção da qualidade do produto armazenado (COSTA et al., 2015).

4.1.2 Isotermas de sorção do café descascado

Na modelagem das isotermas de sorção do café descascado, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C, utilizaram-se os teores de água finais, após atingirem o equilíbrio higroscópico com o ambiente (Tabela 9):

Tabela 9 - Teor de água inicial (Ti) e teor de água final (Tf), base seca, do café descascado, após atingirem equilíbrio higroscópico com o ambiente.

Teor de água (b.s.)	Temperatura (°C)							
	20	UR (%)	30	UR (%)	55	UR (%)	70	UR (%)
T _i	0,0915	85,11	0,0915	83,62	0,0915	80,70	0,0915	79,49
	0,0915	54,38	0,0915	51,40	0,0915	50,15	0,0915	10,75
	0,0915	33,07	0,0915	32,44	0,0915	29,93		
	0,0915	23,11	0,0915	21,61	0,0915	11,03		
	0,0915	11,31	0,0915	11,28				
T _f	0,1253	85,11	0,1893	83,62	0,1709	80,70	0,1317	79,49
	0,1504	54,38	0,1688	51,40	0,1111	50,15	0,0291	10,75
	0,0757	33,07	0,0908	32,44	0,0556	29,93		
	0,0778	23,11	0,0671	21,61	0,0238	11,03		
	0,0688	11,31	0,0554	11,28				

Fonte: Da autora (2017).

Na Tabela 10, estão os valores dos coeficientes de determinação (R^2), erro relativo médio (P) e desvio padrão da estimativa (SE) dos diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais das isotermas de sorção do café descascado, para as diferentes temperaturas.

Tabela 10 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados na modelagem das isotermas de sorção do café descascado.

MODELOS	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS		
	R^2	P	SE
Chung Pfof	87,24	2,962	0,042
Copace	85,12	2,853	0,040
GAB modificado	95,00	2,506	0,035
Halsey modificado	81,58	2,889	0,041
Henderson	87,06	2,475	0,049
Henderson modificado	88,03	2,679	0,037
Oswin	83,97	2,386	0,033
Sabbab	97,11	2,427	0,034
Sigma Copace	83,93	2,876	0,040
GAB	86,69	2,056	0,041

Fonte: Da autora (2017).

O melhor ajuste foi obtido para o modelo de Sabbab. Esse modelo foi escolhido, para representar as isotermas de sorção do café descascado, apresentando os valores dos parâmetros estatísticos $R^2=97,11\%$; $P=2,427\%$ e $SE=0,034$.

Na Tabela 11, são mostrados os coeficientes do modelo matemático escolhido, com base nos critérios de seleção estatísticos, para modelar as isotermas de sorção do café descascado.

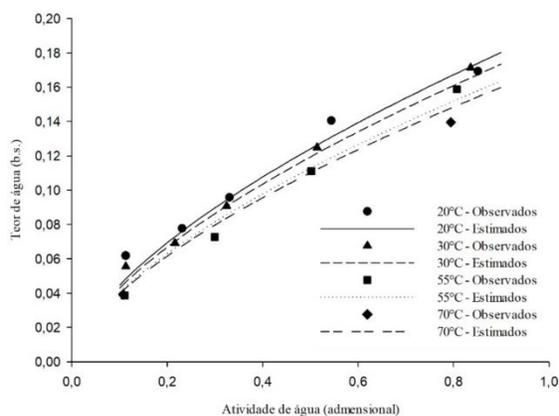
Tabela 11 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados as isotermas de sorção do café descascado.

MODELO	COEFICIENTES		
	a	b	c
Sabbab	0,2561	0,6350	0,0949

Fonte: Da autora (2017).

Na Figura 5, é mostrada a isoterma de sorção do café descascado, com os dados experimentais e estimados pelo modelo matemático de Sabbab, em função do teor de água (base seca) e atividade de água (decimal).

Figura 5 - Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do café descascado, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.



Fonte: Da autora (2017).

Nota-se que o modelo de Sabbab, apesar de ter apresentado os melhores valores dos parâmetros estatísticos, não se adequou bem aos dados experimentais, para toda a faixa de atividade de água e teor de água de equilíbrio.

Para as isotermas de sorção, verifica-se também que, em temperaturas constantes, o teor de água aumenta com o aumento dos valores de atividade de água.

Observa-se, ainda, que, para uma mesma atividade de água, o teor de água de equilíbrio diminui à medida que a temperatura aumenta. As isotermas de sorção obtidas neste trabalho apresentam efeito claro da temperatura, como é observado para a maioria dos produtos agrícolas (CORRÊA et al., 2010b; GARCIA-PEREZ et al., 2008).

Hassini et al. (2015) explicam esse comportamento pelo estado de excitação das moléculas pelo aumento da temperatura, que aumenta sua distância diminuindo as forças atrativas entre elas. Geralmente esse aumento da temperatura promove o desprendimento das moléculas de água de seus respectivos locais de ligação (KANE et al., 2008).

4.1.3 Isotermas de sorção das partes do fruto do café

Para a modelagem das isotermas de sorção das partes do café, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C, foram utilizados os teores de água finais, após atingirem o equilíbrio higroscópico com o ambiente (Tabela 12):

Tabela 12 - Teor de água inicial (Ti) e teor de água final (Tf), base seca, das partes do café, após atingirem equilíbrio higroscópico com o ambiente.

(Continua)

EXOCARPO + PARTE DO MESOCARPO								
Teor de água (b.s)	Temperatura (°C)							
	20	UR(%)	30	UR(%)	55	UR(%)	70	UR(%)
T _i	0,1246	85,11	0,1246	83,62	0,1246	80,70	0,1246	79,49
	0,1246	54,38	0,1246	51,40	0,1246	50,15	0,1246	10,75
	0,1246	33,07	0,1246	32,44	0,1246	29,93		
	0,1246	23,11	0,1246	21,61	0,1246	11,03		
	0,1246	11,31	0,1246	11,28				
T _f	0,3191	85,11	0,2995	83,62	0,2863	80,70	0,2509	79,49
	0,2295	54,38	0,2060	51,40	0,1734	50,15	0,0572	10,75
	0,1654	33,07	0,1415	32,44	0,1172	29,93		
	0,1391	23,11	0,1337	21,61	0,0488	11,03		
	0,1027	11,31	0,0950	11,28				
MESOCARPO								
T _i	0,1983	85,11	0,1983	83,62	0,1983	80,70	0,1983	79,49
	0,1983	54,38	0,1983	51,40	0,1983	50,15	0,1983	10,75
	0,1983	33,07	0,1983	32,44	0,1983	29,93		
	0,1983	23,11	0,1983	21,61	0,1983	11,03		
	0,1983	11,31	0,1983	11,28				
T _f	0,4597	85,11	0,4220	83,62	0,3898	80,70	0,3361	79,49
	0,3771	54,38	0,3470	51,40	0,2708	50,15	0,0637	10,75
	0,3303	33,07	0,2782	32,44	0,1998	29,93		
	0,2827	23,11	0,2354	21,61	0,0884	11,03		
	0,1917	11,31	0,1493	11,28				
ENDOCARPO								
T _i	0,0804	85,11	0,0804	83,62	0,0804	80,70	0,0804	79,49
	0,0804	54,38	0,0804	51,40	0,0804	50,15	0,0804	10,75
	0,0804	33,07	0,0804	32,44	0,0804	29,93		
	0,0804	23,11	0,0804	21,61	0,0804	11,03		
	0,0804	11,31	0,0804	11,28				
T _f	0,2290	85,11	0,1446	83,62	0,1271	80,70	0,1109	79,49
	0,2045	54,38	0,1357	51,40	0,1067	50,15	0,0782	10,75
	0,1798	33,07	0,1198	32,44	0,0896	29,93		
	0,1718	23,11	0,1104	21,61	0,0692	11,03		
	0,1543	11,31	0,0990	11,28				

Tabela 12 - Teor de água inicial (Ti) e teor de água final (Tf), base seca, das partes do café, após atingirem equilíbrio higroscópico com o ambiente.

(Conclusão)

		ENDOSPERMA							
T _i		0,1109	85,11	0,1109	83,62	0,1109	80,70	0,0915	79,49
		0,1109	54,38	0,1109	51,40	0,1109	50,15	0,0915	10,75
		0,1109	33,07	0,1109	32,44	0,1109	29,93		
		0,1109	23,11	0,1109	21,61	0,1109	11,03		
		0,1109	11,31	0,1109	11,28				
T _f		0,2387	85,11	0,2295	83,62	0,1906	80,70	0,1821	79,49
		0,1999	54,38	0,1844	51,40	0,1600	50,15	0,0966	10,75
		0,1707	33,07	0,1555	32,44	0,1390	29,93		
		0,1579	23,11	0,1283	21,61	0,0966	11,03		
		0,1350	11,31	0,1122	11,28				

Fonte: Da autora (2017).

Na Tabela 13, estão os valores dos coeficientes de determinação (R^2), erro relativo médio (P) e desvio padrão da estimativa (SE) dos diferentes modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais das isotermas de sorção das partes do fruto do café para as diferentes temperaturas.

Tabela 13 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados na modelagem das isotermas de sorção das partes do fruto do café.

(Continua)

EXOCARPO + PARTE DO MESOCARPO			
MODELOS	PARAMETROS ESTATÍSTICOS		
	R^2	P	SE
Chung Pfof	96,81	5,414	0,019
Copace	97,77	4,103	0,012
GAB modificado	99,55	1,598	0,006
Halsey modificado	98,43	1,760	0,007
Henderson	95,29	4,692	0,192
Henderson modificado	86,72	9,261	0,289
Oswin	79,62	17,775	0,518
Sabbab	98,61	1,005	0,314
Sigma Copace	97,75	4,114	0,013
GAB	92,09	1,054	0,023

Tabela 13 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados na modelagem das isotermas de sorção das partes do fruto do café.

(Conclusão)

MESOCARPO			
Chung Pfof	99,40	1,870	0,009
Copace	93,63	5,380	0,265
GAB modificado	99,72	1,576	0,007
Halsey modificado	96,74	5,136	0,025
Henderson	88,62	6,521	0,523
Henderson modificado	92,33	2,129	0,106
Oswin	95,87	4,877	0,439
Sabbab	97,49	3,773	0,188
Sigma Copace	93,34	5,531	0,265
GAB	92,65	1,877	0,081
ENDOCARPO			
Chung Pfof	90,25	6,321	0,241
Copace	91,33	3,346	0,324
GAB modificado	77,82	9,649	0,249
Halsey modificado	91,43	3,104	0,142
Henderson	52,43	17,071	0,625
Henderson modificado	99,40	0,839	0,002
Oswin	86,08	5,199	0,295
Sabbab	95,91	1,434	0,345
Sigma Copace	91,33	3,229	0,324
GAB	78,30	2,743	0,005
ENDOSPERMA			
Chung Pfof	97,93	3,251	0,870
Copace	97,89	2,527	0,682
GAB modificado	96,68	4,334	0,395
Halsey modificado	93,59	2,921	0,257
Henderson	94,07	1,624	0,181
Henderson modificado	90,84	6,998	0,913
Oswin	78,73	7,778	0,977
Sabbab	99,04	0,217	0,006
Sigma Copace	97,88	2,535	0,185
GAB	93,89	1,146	0,002

Fonte: Da autora (2017).

*modelos não ajustado no software *Statistic 5.0*

Para exocarpo + parte do mesocarpo, o melhor ajuste foi obtido para o modelo de GAB modificado. Esse modelo foi escolhido, para representar as

isotermas de sorção da porção exocarpo + parte do mesocarpo, apresentando os valores dos parâmetros estatísticos $R^2=99,55\%$; $P=1,596\%$ e $SE=0,006$.

Para o mesocarpo, verifica-se que apenas o modelo de GAB modificado e GAB apresentaram ajustes satisfatórios para o coeficiente de determinação ($R^2 < 90\%$). Com exceção do modelo de Henderson, os demais modelos apresentaram erros médios relativos abaixo de 10% e SE próximos a zero (0), ajustes considerados como aceitáveis. O modelo que melhor descreve as isotermas de sorção para o mesocarpo foi o de GAB modificado, apresentando $R^2=99,72\%$; $P=1,576\%$ e $SE=0,007$.

O modelo que melhor ajustou os dados experimentais, para o endocarpo, foi o modelo de Henderson modificado. Os parâmetros estatísticos utilizados como critérios de seleção apresentaram valores satisfatórios, para descrição do fenômeno, com $R^2=99,72\%$; $P=1,576\%$ e $SE=0,007$.

Quando observamos os modelos utilizados para descrever o fenômeno para o endosperma, com exceção do modelo de Oswin, os demais modelos apresentaram ajustes satisfatórios, para o coeficiente de determinação e, independente do modelo, todos apresentaram erros relativos médios abaixo de 10% e desvio padrão médio da estimativa próximos a zero (0). Diante disso, o modelo que melhor descreveu as isotermas de sorção para o endosperma foi o modelo de Sabbab, com $R^2=99,04\%$; $P=0,207\%$ e $SE=0,006$.

Ainda são poucos os estudos que avaliam o equilíbrio higroscópico de cada parte do fruto separadamente. Pelo fato de cada parte do fruto do café possuir diferente composição química e anatomia, quando é submetida a análises separadamente, o comportamento tende a ser diferente, necessitando estudos mais aprofundados em cada parte e a elaboração de um modelo para melhor ajuste e que represente o fenômeno estudado.

Na Tabela 14, são mostrados os coeficientes do modelo matemático escolhido, com base nos critérios de seleção estatísticos, para modelar as isotermas de sorção para as partes do fruto do café.

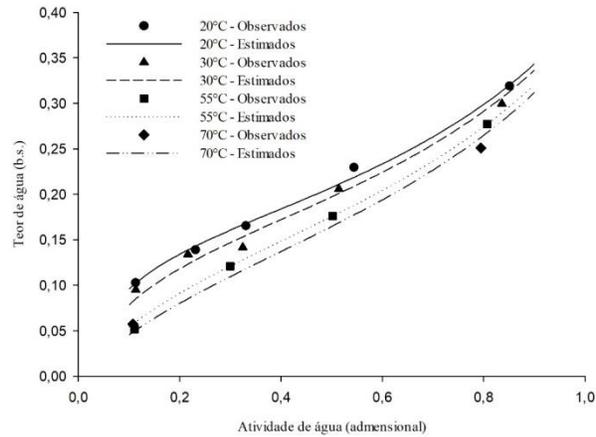
Tabela 14 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados as isotermas de dessorção das partes do fruto do café.

COEFICIENTES			
MODELO	EXOCARPO + PARTE DO MESOCARPO		
	a	b	c
GAB modificado	0,165942	59,24550	380,7321
MESOCARPO			
GAB modificado	0,412622	24,32445	580,3091
ENDOCARPO			
Henderson modificado	6,919672	-18,3972	4,818797
ENDOSPERMA			
Sabbab	2,136378	0,332360	0,202718

Fonte: Da autora (2017).

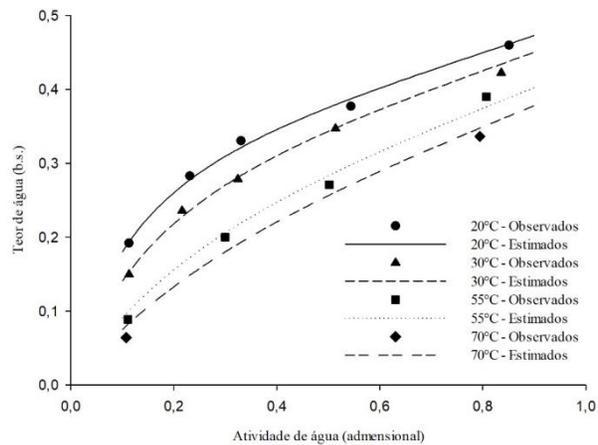
Nas Figuras 6,7,8 e 9 são mostradas as isotermas de sorção das partes do fruto do café, com os dados experimentais e estimados pelos modelos matemáticos que apresentaram os melhores parâmetros, em função do teor de água (base seca) e atividade de água (decimal).

Figura 6 - Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do exocarpo + parte do mesocarpo, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.



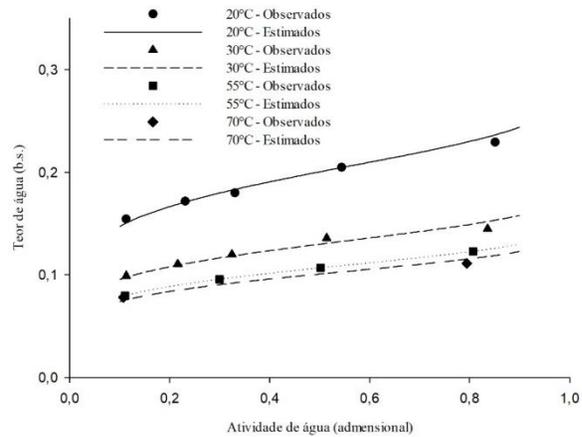
Fonte: Da autora (2017).

Figura 7 - Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do mesocarpo, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.



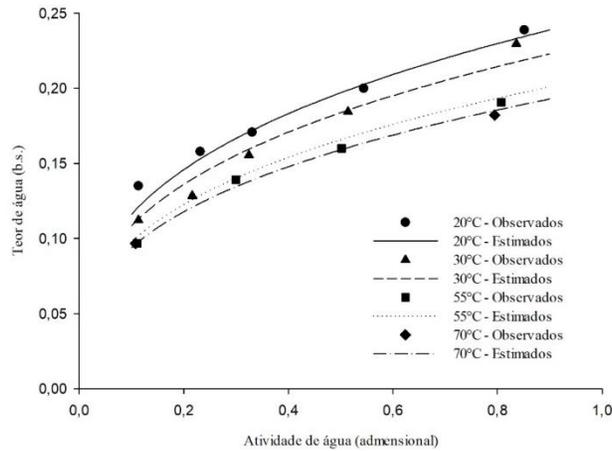
Fonte: Da autora (2017).

Figura 8 - Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do endocarpo, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.



Fonte: Da autora (2017).

Figura 9 - Isotermas de sorção estimadas e experimentais (observados) do endocarpo, nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70°C.



Fonte: Da autora (2017).

Nota-se pelas figuras que os modelos se adequaram aos dados experimentais, na faixa de atividade de água e teor de água de equilíbrio

analisada, nas quatro temperaturas estudadas. É possível verificar que, independente da parte do café, com o incremento da temperatura, existe a redução do teor de água de equilíbrio.

Analisando as Figuras das curvas de sorção das partes do café, constata-se que, em atividades de água acima de 0,50, o valor do teor de água de equilíbrio eleva-se mais rapidamente, provocando uma curva de sorção mais acentuada. De acordo com Alves, Fóz e Nicoletti (2015), esse fato ocorre por fraca ligação da água aos constituintes do alimento em teores de água maiores, necessitando, dessa forma, de energia próxima à requerida para a vaporização da água pura. No entanto, à medida que a atividade de água é reduzida, a água presente no alimento torna-se cada vez mais ligada ao produto. Com isso, é necessário um incremento na temperatura para a remoção mais rápida da umidade em atividades de água inferior a 0,60.

Observa-se, também que, para uma mesma atividade de água, o teor de água de equilíbrio diminui à medida que a temperatura aumenta. De acordo com Costa et al. (2015) e Rizvi (2005), a temperaturas mais elevadas as moléculas de água atingem níveis de energia mais elevados e isto permite que elas rompam com os seus locais de sorção, diminuindo, assim, o teor de água de equilíbrio. À medida que a temperatura muda, a excitação das moléculas, bem como a distância e assim a atração entre as moléculas varia. Isto faz com que a quantidade de água sorvida varie com a temperatura numa determinada atividade de água, assim como em temperaturas constantes o teor de água aumenta com o aumento dos valores de atividade de água para as isothermas de dessorção das partes do fruto do café.

4.2 Cinética de secagem do café natural, descascado e das partes do fruto do café

Para que fosse observada a dinâmica do processo de secagem do café natural, descascado, dos tecidos do pericarpo e do endosperma do café, foram elaboradas as curvas de secagem de acordo com a variação da razão de umidade em relação ao tempo de secagem.

4.2.1 Curvas de secagem do café natural

Na determinação das curvas de secagem do café natural, os teores de água inicial foram de 0,6795; 0,7190; 0,6824; 0,6829 (b.s.), e os teores de água finais foram de 0,1098; 0,1090; 0,1126; 0,1060 (b.s.), para as umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5, respectivamente. A temperatura do ar secagem manteve-se em torno de 40°C durante todo processo de secagem.

O tempo necessário para a secagem do café natural foi, em média, de 105; 118,5; 120 e 123,5 horas, para as umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, respectivamente. Para as quatro umidades relativas estudadas, nota-se uma redução no teor de água acentuada no início do processo de secagem. Porém, na umidade relativa de 10%, a taxa de redução de água foi maior, quando comparada com as outras umidades relativas, observando-se um menor tempo de secagem. Esse resultado concorda com os valores encontrados por Isquierdo (2011), na secagem de café natural, em que, para uma mesma temperatura, a taxa de secagem aumenta com a redução da temperatura do ponto de orvalho e, conseqüentemente, da umidade relativa do ar.

Na maior umidade relativa estudada (32,5%), observa-se o maior tempo de secagem, pois a força motriz, para a evaporação da água de uma superfície molhada, depende do gradiente de pressão do vapor de água entre o ar circundante e a superfície (TOHIDI; SADEGHI; TORKI-HARCHEGANI, 2017).

Na Tabela 15, encontram-se os parâmetros estatísticos utilizados, para a comparação entre os doze modelos de secagem analisados, nas quatro condições de secagem utilizadas para o café natural.

Tabela 15 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem do café natural, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.

76

MODELOS	UMIDADE RELATIVA											
	10%			17,5%			25%			32,5%		
	R^2	P	SE	R^2	P	SE	R^2	P	SE	R^2	P	SE
Dois termos	99,72	1,720	0,028	98,56	0,958	0,028	98,08	2,236	0,041	97,85	1,688	0,049
Henderson & Pabis	99,72	1,785	0,022	98,56	0,958	0,024	98,08	2,207	0,031	97,85	1,715	0,038
modificado												
Henderson & Pabis	99,72	1,712	0,049	98,56	0,958	0,054	98,08	2,236	0,070	97,85	1,679	0,085
Midilli	99,97	0,003	0,001	99,92	0,002	0,003	99,94	0,025	0,019	99,95	0,003	0,001
Newton	99,48	0,318	0,378	97,93	0,569	0,437	97,31	0,216	0,143	96,82	0,332	0,111
Page	99,97	0,959	0,051	99,85	0,750	0,361	99,75	1,753	0,484	99,70	0,978	0,576
Thompson	97,12	9,761	4,268	99,46	2,292	1,511	95,52	11,221	5,484	97,48	7,358	4,033
Verma	99,68	1,719	0,058	98,52	0,958	0,033	97,94	2,236	0,082	97,68	1,494	0,100
Wang & Sing	99,94	0,422	0,160	99,88	0,149	0,046	99,84	0,187	0,141	99,85	0,574	0,344
Valcam	99,95	0,221	0,006	99,90	0,108	0,007	99,94	0,407	0,011	99,96	0,312	0,011
Exponencial de dois termos	99,45	0,095	0,411	97,87	0,579	0,529	97,25	0,270	0,144	95,42	0,636	0,347
Aproximação da difusão	99,94	0,897	0,011	99,59	0,616	0,264	99,75	1,773	0,264	99,63	0,096	0,416

Fonte: Da autora (2017).

Para as quatro umidades relativas utilizadas para a secagem do café natural, nota-se que os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R^2) próximos a 1,0 (TABELA 15).

Este coeficiente sozinho não constitui um bom critério, para a seleção de modelos não lineares, sendo necessária uma análise conjunta dos parâmetros: coeficiente de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE) e erro médio relativo (P). Diversos pesquisadores utilizaram estes parâmetros estatísticos, a fim de determinar o melhor ajuste de modelos matemáticos, para diferentes tipos de produtos, em que a capacidade para descrever um modelo com fidelidade a determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa. Em relação ao erro médio relativo, são recomendados valores inferiores a 10% (MADAMBA; DRISCOLL; BUCKLE, 1996; MOHAPATRA; RAO, 2005). Esse mesmo critério de seleção será utilizado para a escolha do modelo que melhor se ajusta para o café descascado e para as partes que compõem o fruto do café.

O modelo que apresentou melhor valor para os parâmetros estatísticos, segundo o critério de seleção utilizado, foi o modelo de Midilli, para as todas umidades relativas estudadas. Verifica-se que o modelo de Midilli, independente da umidade relativa estudada, apresentou coeficiente de determinação (R^2) superior a 99%.

Quando observamos o erro médio relativo (P), considerando valores inferiores a 10% como um critério aceitável, os resultados obtidos pelo modelo de Midilli, independente da umidade relativa, apresenta ajustes satisfatórios. Os valores de desvio padrão da estimativa, em todos os modelos considerados como os que melhores se ajustaram, apresentaram um $SE < 0,05$.

Resende, Ferreira e Almeida (2010) recomendam o modelo de Midilli para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki por apresentar um dos melhores ajustes na secagem e, ainda, apresentar operações matemáticas simples

e possuir menor número de coeficientes. O modelo matemático Midilli é matematicamente um dos mais práticos, apresentando menor número de coeficientes, tornando mais simples sua aplicação e uso em simulações de secagem (KASHANINEJAD et al., 2007).

Na Tabela 16, são mostrados os coeficientes do modelo matemático escolhido, com base nos critérios de seleção estatísticos, na modelagem das curvas de secagem do café natural, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.

Tabela 16 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem do café natural, para as quatro umidades relativas estudadas.

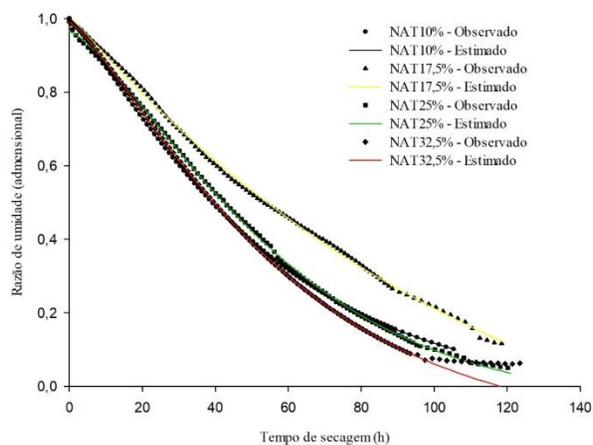
MODELOS	UR (%)	COEFICIENTES			
		a	k	n	B
Midilli	10	0,997203	0,009136	1,176545	-0,000101
Midilli	17,5	1,006359	0,008812	1,042153	-0,001337
Midilli	25	0,966239	0,004079	1,347750	-0,000295
Midilli	32,5	0,990908	0,005793	1,275436	-0,000658

Fonte: Da autora (2017).

k: constantes de secagem; a, b e n: coeficientes dos modelos.

Na Figura 10, apresentam-se os comportamentos da razão de umidade observado e estimado pelo modelo de Midilli, para o café natural nas umidades relativas de 10; 17,5, 25% 32,5%, durante a secagem.

Figura 10 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do café natural nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, em função do tempo.



Fonte: Da autora (2017).

Conforme a Figura 10, nota-se o bom ajuste dos modelos de Midilli para as umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, constatando-se que esse modelo é adequado para representar os dados experimentais do café natural. Esses resultados estão de acordo com estudos realizados para a secagem de frutos do café e que obtiveram um ajuste satisfatório do modelo de Midilli (CORRÊA et al., 2010b).

Em trabalhos com outros produtos, como a carqueja (RADÜNZ et al., 2011), folhas de fruta-de-lobo (PRATES et al., 2012), folhas de manjeriço (REIS et al., 2012) e folhas de aroeira (GONELLI et al., 2014), o modelo de Midilli também foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem.

4.2.2 Curvas de secagem do café descascado

Para a determinação das curvas de secagem do café descascado, os teores de água iniciais foram de 0,5313; 0,5275; 0,5822; 0,5379 (b.s.), e os teores

de água finais, após o processo de secagem, foram de 0,1032; 0,0971; 0,0945; 0,0978 (b.s.), para as umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, utilizando a temperatura do ar de secagem de 40°C.

O tempo médio necessário para a secagem do café descascado foi de 50; 55; 60; 61,5 horas, para as umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, respectivamente.

Observa-se, assim como para o café natural, uma maior redução do teor de água no início da secagem. A secagem do café descascado ocorre, no período de taxa decrescente; isso acontece pelo fato de que há uma maior resistência à transferência de calor e massa no interior do produto para a superfície (KASHANINEJAD et al., 2007). Ribeiro et al. (2003) observaram que a taxa de secagem é maior, nas primeiras horas de secagem, quando se altera o fluxo, corroborando com Kashaninejad et al. (2007) a respeito da maior redução no teor de água no início da secagem, no período de taxa decrescente.

Na Tabela 17, encontram-se os parâmetros estatísticos utilizados, para a comparação entre os doze modelos de secagem analisados, nas quatro condições de secagem utilizadas para o café descascado.

Tabela 17 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem do café descascado, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.

MODELOS	UMIDADE RELATIVA											
	10%			17,5%			25%			32,5%		
	R^2	P	SE	R^2	P	SE	R^2	P	SE	R^2	P	SE
Dois termos	95,52	4,104	0,848	96,45	3,393	0,758	97,04	2,174	0,774	94,11	4,959	0,948
Henderson & Pabis	95,52	4,014	0,829	96,45	3,354	0,752	97,40	2,200	0,780	94,17	4,928	0,942
modificado												
Henderson & Pabis	95,52	4,025	0,832	96,45	3,354	0,752	97,40	2,189	0,778	94,17	4,959	0,948
Midilli	99,59	0,044	0,001	99,43	0,134	0,002	99,73	0,009	0,002	99,62	0,115	0,022
Newton	97,19	1,435	0,090	95,58	3,602	0,276	97,08	1,077	0,262	92,76	4,224	0,042
Page	98,96	5,228	1,080	98,70	5,307	1,916	99,09	0,120	0,273	98,85	1,117	0,978
Thompson	93,16	18,151	3,751	82,07	35,656	6,329	74,15	43,466	10,601	83,81	36,639	7,005
Verma	95,52	3,428	0,708	93,02	4,354	0,751	97,33	1,898	0,706	94,17	4,959	0,948
Wang & Sing	99,31	0,280	0,004	99,42	0,635	0,109	99,60	0,895	0,218	99,11	1,001	0,192
Valcam	99,61	0,162	0,331	99,21	0,267	0,996	98,77	0,233	0,568	99,11	0,465	0,888
Exponencial de dois termos	97,16	1,439	0,090	95,52	1,504	0,259	95,21	1,527	0,128	92,75	3,643	0,123
Aproximação da difusão	98,66	1,765	0,985	97,54	5,123	1,884	99,22	0,451	0,842	99,71	0,266	1,007

Fonte: Da autora (2017).

Considerando os mesmos critérios de seleção utilizados para o café natural, todos os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R^2) próximos a 1,0 (Tabela 17), com exceção do Modelo de Thompson para a umidade relativa de 17,5; 25 e 32,5%.

O modelo que apresentou os melhores valores para os parâmetros estatísticos, segundo o critério de seleção utilizado, foi o modelo de Midilli, para todas as umidades relativas estudadas. Verifica-se que o modelo de Midilli, independente da umidade relativa estudada, apresentou ajustes satisfatórios para o coeficiente de determinação ($R^2 > 99\%$), erro relativo médio ($P < 10\%$) e valores de desvio padrão da estimativa ($SE < 0,05$).

Na Tabela 18, são mostrados os coeficientes do modelo matemático escolhido, com base nos critérios de seleção estatísticos, na modelagem das curvas de secagem do café descascado, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.

Tabela 18 - Coeficientes dos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem do café descascado, para as quatro umidades relativas estudadas.

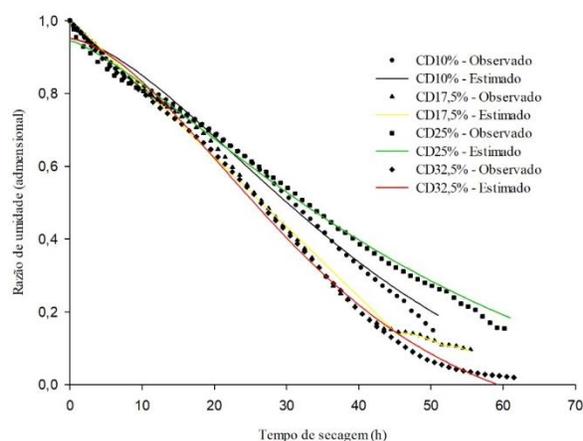
MODELOS	UR (%)	COEFICIENTES			
		a	k	n	b
Midilli	10	0,951169	0,002520	1,595880	-0,001170
Midilli	17,5	0,993661	-0,008218	0,303765	-0,019446
Midilli	25	0,944692	0,005743	1,325081	-0,001089
Midilli	32,5	0,950936	0,002311	1,702461	-0,001446

Fonte: Da autora (2017).

k: constantes de secagem; a, b, n: coeficientes dos modelos.

A Figura 11 apresenta os comportamentos da razão de umidade estimada observados e estimados pelo modelo de Midilli, para o café descascado nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, durante a secagem.

Figura 11 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do café descascado nas quatro umidades relativas estudadas, em função do tempo.



Fonte: Da autora (2017).

Esse resultado concorda com outros estudos já realizados. Silva et al. (2016), também, observaram um melhor ajuste utilizando esse modelo na secagem de frutos de Pimenta Cabacinha; Costa et al. (2016) também indicaram esse modelo para a secagem da casca de jaboticaba; Foroughi-Dahr et al. (2015) secando arroz, também, indicaram o modelo de Midilli para descrever o processo.

Conforme a Figura 11, nota-se o bom ajuste do modelo de Midilli para as umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, adequando-se bem aos dados experimentais. Conforme relatado por outros autores (JOHANN et al., 2016),

que pesquisaram cinética de secagem, isso demonstra que o modelo é aceito para descrever matematicamente a cinética de secagem do produto estudado.

4.2.3 Curvas de secagem das partes anatômicas que compõe o fruto do café

Na determinação das curvas de secagem das partes do fruto do café (exocarpo + parte do mesocarpo; mesocarpo; endocarpo e endosperma), os teores de água iniciais e finais (b.s.), para as umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5, estão demonstrados na Tabela 19. A temperatura do ar secagem manteve-se em torno de 40°C durante todo processo de secagem.

Tabela 19 - Teores de água iniciais e finais (b.s.) das partes do fruto do café, em cada umidade relativa estudada.

PARTES	UMIDADE RELATIVA (%)							
	10		17,5		25		32,5	
	T _i	T _f	T _i	T _f	T _i	T _f	T _i	T _f
Exocarpo + parte do mesocarpo	0,8742	0,1058	0,8849	0,1328	0,8671	0,1563	0,8860	0,1030
Mesocarpo	0,8545	0,2049	0,8619	0,1502	0,8545	0,2205	0,8545	0,2167
Endocarpo	0,1128	0,0762	0,1686	0,0757	0,2567	0,0971	0,2591	0,0729
Endosperma	0,5139	0,1014	0,5003	0,1133	0,5166	0,1326	0,5267	0,0964

Fonte: Da autora (2017).

O tempo necessário para a secagem do exocarpo + parte do mesocarpo até atingir a massa constante foi em torno de 14; 15,3; 17 e 18 horas, para as umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, respectivamente. Já para o mesocarpo, o tempo de secagem foi de 13; 16,5; 17 e 18,5 horas, para as umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, respectivamente.

O endocarpo atingiu a massa constante com 0,9; 1,9; 4 e 19,5 horas, para as umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, respectivamente, no entanto foram realizadas outras pesagens para que fosse observada a continuidade do

equilíbrio. Para o endosperma, a secagem foi realizada em 15; 16,5; 18; e 23,5 horas, para as umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, respectivamente.

Na Tabela 20, encontram-se os parâmetros estatísticos utilizados, para a comparação entre os doze modelos de secagem analisados, nas quatro condições de secagem utilizadas para as partes do fruto do café.

Tabela 20 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem das partes do fruto do café, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.

8

(Continua)

EXOCARPO + PARTE DO MESOCARPO												
MODELOS	UMIDADE RELATIVA											
	10%			17,5%			25%			32,5%		
	R^2	P	SE	R^2	P	SE	R^2	P	SE	R^2	P	SE
Dois termos	91,56	3,584	0,313	76,15	8,657	0,196	90,57	5,740	0,954	93,88	3,517	0,206
Henderson & Pabis	91,56	3,585	0,312	76,17	8,657	0,196	90,57	5,314	0,954	93,89	3,517	0,205
Henderson & Pabis modificado	91,56	3,585	0,312	76,18	8,658	0,196	90,57	5,740	0,954	93,88	3,517	0,206
Midilli	97,43	0,130	0,005	98,21	0,081	0,004	97,54	2,956	0,004	98,80	0,029	0,001
Newton	88,35	12,318	0,667	95,57	3,436	0,777	76,74	15,117	0,850	63,78	13,989	0,636
Page	99,54	6,860	0,266	99,55	9,238	0,497	99,49	4,355	0,723	99,46	4,595	0,209
Thompson	88,34	10,125	0,393	77,59	15,441	0,831	90,92	12,920	2,147	95,36	23,625	1,075
Verma	91,56	8,584	0,312	76,17	3,657	0,197	90,57	5,741	0,954	93,88	4,517	0,928
Wang & Sing	96,91	0,912	0,035	97,94	0,535	0,028	96,28	4,454	0,740	97,95	5,987	0,272
Valcam	98,73	2,414	0,210	98,11	0,535	0,029	99,43	0,960	0,162	99,39	5,366	0,005
Exponencial de dois termos	88,35	5,100	0,431	69,75	14,369	0,777	87,17	7,049	1,171	90,77	9,312	0,287
Aproximação da difusão	96,95	7,115	0,433	90,10	7,937	0,443	97,07	6,740	1,1740	98,66	6,175	0,281

Tabela 20 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem das partes do fruto do café, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.

(Continuação)

MESOCARPO												
Dois termos	98,74	1,829	0,089	98,74	0,040	0,137	99,15	0,180	0,068	96,48	2,893	0,140
Henderson & Pabis	99,76	1,829	0,089	99,46	0,040	0,137	99,15	0,180	0,068	96,48	2,893	0,141
Henderson & Pabis modificado	98,18	1,829	0,089	95,23	0,040	0,137	95,63	3,180	0,068	96,48	2,893	0,141
Midilli	99,21	0,857	0,028	99,14	0,034	0,004	98,08	1,287	0,003	97,64	1,059	0,001
Newton	97,90	2,113	0,058	95,08	4,607	0,144	91,73	4,037	0,104	95,79	4,401	0,150
Page	98,43	1,564	0,200	95,79	2,267	0,276	98,07	1,477	0,152	96,96	4,127	0,379
Thompson	94,65	3,535	0,668	59,79	18,857	0,233	96,55	2,748	0,488	90,05	5,188	1,055
Verma	98,18	1,829	0,089	95,23	4,040	0,137	95,63	4,879	0,006	96,48	4,893	0,141
Wang & Sing	98,79	4,331	0,072	97,19	4,671	0,063	98,50	1,696	0,183	96,40	4,492	0,133
Valcam	99,37	0,860	0,037	99,25	0,490	0,075	98,87	1,250	0,024	98,37	1,970	0,070
Exponencial de dois termos	98,59	1,639	0,144	96,29	4,515	0,198	96,60	4,037	0,104	95,79	4,408	0,150
Aproximação da difusão	99,56	0,909	0,145	98,55	1,774	0,202	98,58	1,373	0,104	97,24	2,001	0,249

Tabela 20 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem das partes do fruto do café, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.

∞

(Continuação)

ENDOCARPO												
Dois termos	99,93	0,878	0,003	90,31	5,519	0,026	66,89	12,159	0,020	34,93	42,902	0,031
Henderson & Pabis modificado	99,93	0,491	3,063	90,31	5,519	0,026	66,98	12,159	0,020	34,93	42,435	0,016
Henderson & Pabis	99,93	0,878	0,03	90,31	5,519	0,026	66,98	12,159	0,020	34,93	42,435	0,016
Midilli	92,44	4,397	0,007	97,55	1,433	0,002	99,97	0,509	0,002	38,38	40,096	0,005
Newton	99,93	0,648	0,073	89,93	15,137	0,072	64,79	12,476	0,011	26,97	55,891	0,403
Page	31,92	49,153	0,047	97,02	2,013	0,009	86,73	10,40	0,496	29,41	72,651	0,163
Thompson	79,09	52,547	0,064	95,35	5,268	0,049	99,97	1,389	0,006	*	*	*
Verma	99,35	1,878	0,003	90,31	9,195	0,026	66,98	11,146	0,089	38,13	40,107	0,512
Wang & Sing	94,52	7,203	0,051	95,83	5,096	0,043	*	*	*	*	*	*
Valcam	95,99	9,576	0,043	97,05	2,213	0,106	89,11	10,319	0,057	*	*	*
Exponencial de dois termos	85,79	17,847	0,021	95,03	5,137	0,072	70,03	22,476	0,010	26,77	75,839	0,421
Aproximação da difusão	99,99	0,649	0,073	89,36	15,136	0,073	95,07	5,399	0,012	35,946	42,470	0,126

Tabela 20 - Coeficiente de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), desvio padrão da estimativa (SE, decimal), para os modelos analisados, na secagem das partes do fruto do café, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.

(Conclusão)

ENDOSPERMA												
Dois termos	98,25	2,873	0,036	96,44	5,832	0,053	96,29	5,106	0,047	94,44	3,598	0,055
Henderson & Pabis modificado	98,25	2,142	0,028	96,44	5,829	0,041	96,29	5,109	0,036	94,43	3,959	0,043
Henderson & Pabis	98,25	1,028	0,062	96,44	5,823	0,091	96,29	5,100	0,082	94,43	3,597	0,096
Midilli	99,71	0,035	0,020	99,07	0,110	0,020	61,35	32,77	0,402	99,82	0,105	0,014
Newton	97,52	1,029	0,150	94,77	5,077	0,226	95,40	5,639	0,015	92,83	4,186	0,144
Page	99,57	0,144	0,057	99,59	0,495	0,014	99,25	0,385	0,095	98,65	1,188	0,033
Thompson	99,01	0,018	0,007	98,37	1,589	0,033	97,93	3,358	0,033	79,67	17,100	0,269
Verma	98,25	0,800	0,265	96,44	3,050	0,258	96,29	5,494	0,819	94,43	3,314	0,277
Wang & Sing	99,27	0,252	0,088	99,35	0,966	0,101	98,67	1,574	0,315	99,68	0,769	0,067
Valcam	99,66	0,342	0,054	99,84	0,849	0,007	99,54	0,123	1,312	99,84	0,134	0,001
Exponencial de dois termos	97,52	4,126	0,061	99,17	0,934	0,062	98,96	1,682	0,016	97,64	3,822	0,096
Aproximação da difusão	99,62	0,607	0,041	99,33	0,915	0,054	99,17	0,958	0,025	97,94	0,605	0,088

Fonte: Da autora (2017).

Pela grande diferença existente entre a cinética de secagem das partes do fruto do café, a análise dos parâmetros estatísticos foi realizada separadamente para cada parte.

Nota-se, na Tabela 20, que para as partes do fruto do café: exocarpo + parte do mesocarpo e mesocarpo, independente da umidade relativa, o modelo que melhor representou o fenômeno estudado foi o de Midilli. Para ambas as partes do fruto, o coeficiente de determinação (R^2), erro relativo médio (P) e desvio padrão (SE) apresentaram valores considerados como satisfatórios.

Para o endocarpo, os modelos que apresentaram os melhores ajustes com base nos critérios de seleção foram o modelo da Aproximação da Difusão, para umidade relativa de 10%; e Midilli, para 25; 17,5 e 32,5%.

Quando observamos a Tabela 20, para o endosperma, o modelo de Midilli apresentou os melhores ajustes, para as umidades relativas de 10; 17,5 e 32,5%; enquanto o modelo de Page se ajustou melhor para a umidade relativa de 25%.

Na Tabela 21, são mostrados os coeficientes dos modelos matemáticos escolhidos, com base nos critérios de seleção estatísticos, na modelagem das curvas de secagem das partes do fruto do café, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.

Tabela 21 - Coeficientes dos modelos matemáticos escolhidos com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem das partes do café, para as quatro umidades relativas estudadas.

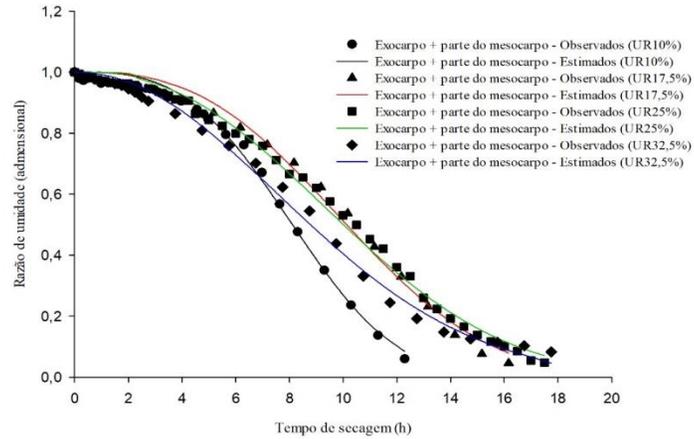
MODELOS	UR (%)	EXOCARPO + PARTE DO MESOCARPO			
		Coeficientes			
		a	k	n	b
Midilli	10	1,158722	0,042104	0,000015	-0,064899
Midilli	17,5	0,858030	-0,281904	0,399347	-0,091057
Midilli	25	0,995418	-0,048970	0,101096	-0,053814
Midilli	32,5	0,989234	-0,060877	0,356580	-0,064851
MODELOS	UR (%)	MESOCARPO			
		Coeficientes			
		a	k	n	b
Midilli	10	0,991104	0,033601	1,192723	0,027556
Midilli	17,5	0,982818	0,031696	1,361278	0,032989
Midilli	25	1,014030	0,059998	0,824967	0,015397
Midilli	32,5	0,997093	-0,011476	0,323153	-0,020076
MODELOS	UR (%)	ENDOCARPO			
		Coeficientes			
		a	k	n	b
Aproximação de difusão	10	0,229333	3,878778		2,714167
Midilli	17,5	0,865697	0,565473	0,000102	-0,542642
Midilli	25	1,003900	1,894378	0,566736	0,073993
Midilli	32,5	0,913286	-0,089299	0,665164	-0,046316
MODELOS	UR (%)	ENDOSPERMA			
		Coeficientes			
		a	k	n	b
Midilli	10	0,964057	0,020511	1,508105	0,002230
Midilli	17,5	1,035119	0,042753	0,474579	-0,047123
Page	25		0,029144	1,486293	
Midilli	32,5	0,975644	0,021769	1,441635	-0,013848

Fonte: Da autora (2017).

k: constantes de secagem; a, b, n: coeficientes dos modelos.

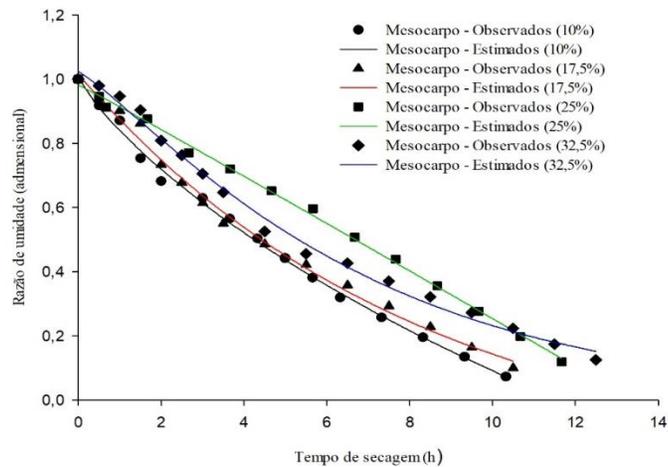
Nas Figuras 12, 13, 14, e 15, apresentam-se os comportamentos da razão de umidade observados e estimados pelos modelos ajustados para cada parte do fruto do café nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%.

Figura 12 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do exocarpo + parte do mesocarpo nas quatro umidades relativas estudadas, em função do tempo.



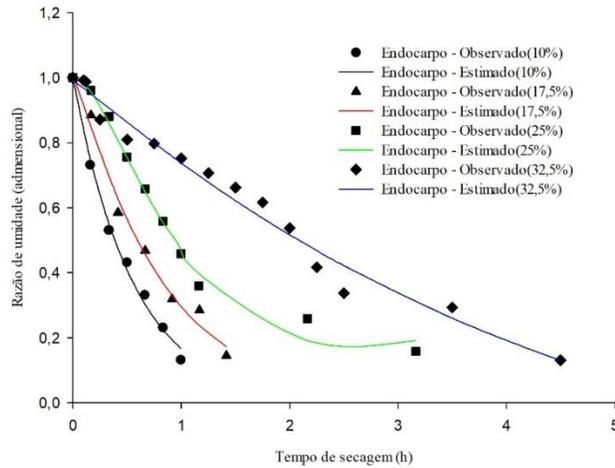
Fonte: Da autora (2017).

Figura 13 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do mesocarpo nas quatro umidades relativas estudadas, em função do tempo.



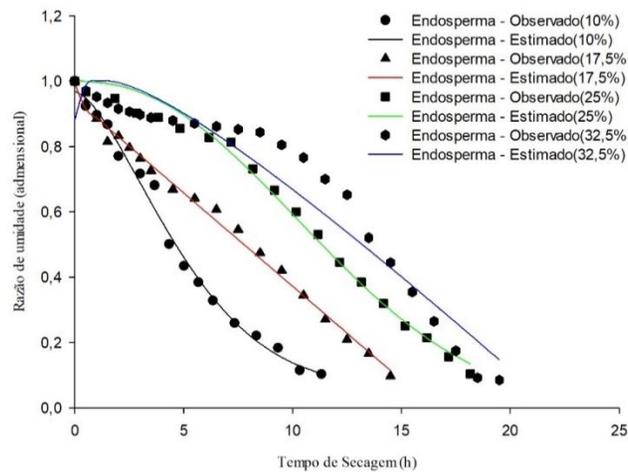
Fonte: Da autora (2017).

Figura 14 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Aproximação da difusão para a umidade relativa de 10% e pelo modelo de Midilli para as umidades relativas de 17,5; 25 e 32,5% para a secagem do endocarpo, em função do tempo.



Fonte: Da autora (2017).

Figura 15 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para as umidades relativas de 10; 17,5 e 32,5% e pelo modelo de Page para a umidade relativa de 25% na a secagem do endosperma, em função do tempo.



Fonte: Da autora (2017).

Independente do tecido do pericarpo ou o endosperma, observando as figuras acima, nota-se que os modelos matemáticos apresentaram bons ajustes aos dados experimentais. A diferença entre a cinética de cada parte do fruto do café pode estar relacionada com as diferentes composições químicas que cada uma delas apresenta.

O endosperma, composto principalmente por celulose e hemicelulose, na umidade relativa de 32,5%, apresentou comportamento diferente de todos os outros componentes anatômicos do fruto do café. Isso porque a celulose e hemicelulose apresentam características higroscópicas, ou seja, absorvem água com facilidade, apresentando uma variação (umedecimento e secagem) durante todo período de secagem.

O mesocarpo por possuir alto conteúdo de açúcares apresenta maior dificuldade a saída de água quando comparado aos outros tecidos do pericarpo. Isso pode ser observado na curva de secagem (FIGURA 13) que apresenta uma curva menos acentuada durante todo o período do processo.

No entanto ainda não existem estudos que descrevam a cinética de secagem de cada parte do fruto do café, necessitando que se façam estudos dos modelos, a fim de minimizar o problema ocasionado pelas partes do fruto do café já estarem separadas e não se comportarem da mesma forma de quando estão na sua conformação normal no fruto.

4.3 Coeficiente de resistência

Para realizar o cálculo do coeficiente de resistência do café e de suas partes, foram considerados os seguintes valores de coeficientes de difusão (Equação 39 – Tabela 22) e área específica (Equações 40, 41 e 42 – Tabela 23):

Tabela 22 - Valores do coeficiente de difusão (D (m)) para as quatro unidades relativas estudadas.

TRATAMENTO	D (m) (m ² .s ⁻¹)
Natural	8,44939E-11
Descascado	6,78055E-11
Exocarpo + parte do mesocarpo	1,24394E-15
Mesocarpo	5,53693E-14
Endocarpo	4,12823E-15
Endosperma	1,62634E-10

Fonte: Da autora (2017).

Tabela 23 - Valores da área específica (γ) do café natural, descascado e das partes que compõe o fruto do café.

(Continua)

TRATAMENTOS	UR (%)	a _w (adimensional)	γ (m ²)
Natural	10	0,07615	0,00033
	17,5	0,0969	0,000348
	25	0,1053	0,000371
	32,5	0,1326	0,000325
Descascado	10	0,0396	0,000184
	17,5	0,0671	0,000159
	25	0,0671	0,00019
	32,5	0,0908	0,000166
Exocarpo + parte do mesocarpo	10	0,08385	8,25E-05
	17,5	0,1336	8,69E-05
	25	0,151	9,27E-05
	32,5	0,1665	8,12E-05
Mesocarpo	10	0,1298	0,072223
	17,5	0,1827	0,075451
	25	0,1827	0,074414
	32,5	0,2222	0,07421
Endocarpo	10	0,0342	2,8E-05
	17,5	0,0717	3,29E-05
	25	0,0826	3,42E-05
	32,5	0,0797	2,91E-05

Tabela 23 - Valores da área específica (γ) do café natural, descascado e das partes que compõe o fruto do café.

			(Conclusão)
TRATAMENTOS	UR (%)	a_w (adimensional)	γ (m ²)
Endosperma	10	0,0396	0,000112
	17,5	0,0979	0,000132
	25	0,0979	0,000137
	32,5	0,1955	0,000116

Fonte: Da autora (2017).

Considerando que a resistência total equivale à resistência do café natural, o modelo proposto, para a resistência à saída de água descrito na equação 43, para cada umidade relativa estudada, as influências da espessura média de cada parte do café foram calculadas (equações 44 – 47). Foram determinados os valores:

Tabela 24 - Valores das influências das espessuras de cada parte do fruto do café (decimal).

Partes do fruto do café	UR (%)			
	10	17,5	25	32,5
X_{cp}	0,125445253	0,115145467	0,137351539	0,136862783
X_m	0,304758796	0,288370308	0,224060758	0,226081216
X_p	0,017480634	0,025884701	0,041480165	0,041718997
X_g	0,552315317	0,570599524	0,597107538	0,595337004

Fonte: Da autora (2017).

O cálculo do coeficiente de resistência do café natural, descascado e de cada parte do fruto foi realizado pela equação 38. Na Tabela 25 estão demonstradas as resistências encontradas de acordo com a atividade de água:

Tabela 25 - Valores dos coeficientes de resistência ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$) para o café natural, descascado e para cada parte do fruto, em função da atividade de água.

TRATAMENTOS	UR (%)	a_w (adimensional)	η ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Natural	10	0,07615	7,66E-13
	17,5	0,0969	6,17E-13
	25	0,1053	6E-13
	32,5	0,1326	4,74E-13
Descascado	10	0,0396	1,28E-15
	17,5	0,0671	8,12E-16
	25	0,0671	7,19E-16
	32,5	0,0908	5,11E-16
Exocarpo + parte do mesocarpo	10	0,08385	1,75E-21
	17,5	0,1336	1,27E-21
	25	0,151	1,18E-21
	32,5	0,1665	1,03E-21
Mesocarpo	10	0,1298	5,61E-17
	17,5	0,1827	4,76E-17
	25	0,1827	4,64E-17
	32,5	0,2222	4,28E-17
Endocarpo	10	0,0342	4,08E-20
	17,5	0,0717	1,59E-20
	25	0,0826	9,54E-21
	32,5	0,0997	8,3E-21
Endosperma	10	0,0396	1,33E-15
	17,5	0,0979	6,3E-16
	25	0,0979	6,02E-16
	32,5	0,1955	3,35E-16

Fonte: Da autora (2017).

Pode-se observar, na Tabela 25, que independente da parte do fruto do café, ou sendo natural ou descascado, a menor resistência à saída de água é obtida na maior atividade de água, para as quatro umidades relativas estudadas.

Isso acontece porque, na maior atividade de água, a disponibilidade de água livre é maior quando comparada as menores atividades de água. Essa

diferença de gradiente facilita a saída de água, ou seja, a água consegue sair com maior facilidade.

Para realizar a modelagem matemática dos dados, a fim de corrigir o fato das partes já estarem separadas, foi necessária a criação de coeficientes de correção para cada parte do fruto do café.

Por meio da Tabela 25, mostra-se satisfatória a consideração do café natural como a resistência total, pois o valor da resistência é superior ao café descascado, aos tecidos do pericarpo o endosperma.

A menor resistência é observada para o exocarpo + parte do mesocarpo. Esse valor pode ser explicado pela anatomia que o exocarpo apresenta, pois esse tecido é formado por uma camada de células compactas, poligonais e parenquimatosas, ou seja, é extremamente delgada, o que facilita a saída de água.

A partir da determinação desses valores, foi possível determinar os coeficientes de correção das partes do fruto do café. Estes parâmetros foram calculados experimentalmente pela simulação computacional no *software* STATISTICA 5.0[®]. Foram obtidos os valores para cada parâmetro:

Tabela 26 - Parâmetros do modelo proposto para analisar a resistência de cada parte do fruto do café, coeficiente de determinação (%), desvio padrão da estimativa (decimal) e erro relativo médio (%).

MODELO	Parâmetros						
	A	B	C	D	R ²	SE	P
Modelo proposto	2,676592E+09	18317,91	105729,9	-155,143	92,84	0,031	1,105

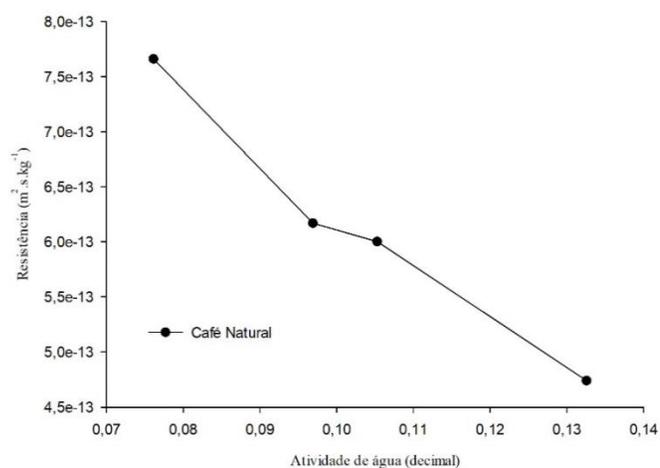
Fonte: Da autora (2017).

Com os dados obtidos, na Tabela 26, nota-se que o modelo utilizado, para determinar os parâmetros do coeficiente de resistência, apresentou valores

de coeficiente de determinação satisfatórios ($R^2 > 90\%$). Em relação ao erro relativo médio, o valor encontrado pelo modelo foi de 1,105%, indicando um $P < 10\%$; o valor encontrado indica que o modelo é adequado para representação do fenômeno estudado, assim como o desvio padrão da média (SE) apresenta valores satisfatórios, com $SE < 0,05$.

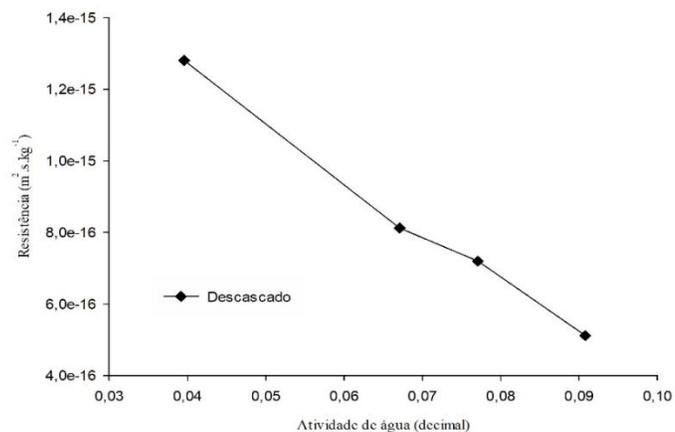
Nas figuras abaixo, pode-se observar as diferenças das resistências que cada parte do fruto do café na saída de água de acordo com a atividade de água.

Figura 16 - Variação da resistência do café natural em relação a atividade de água.



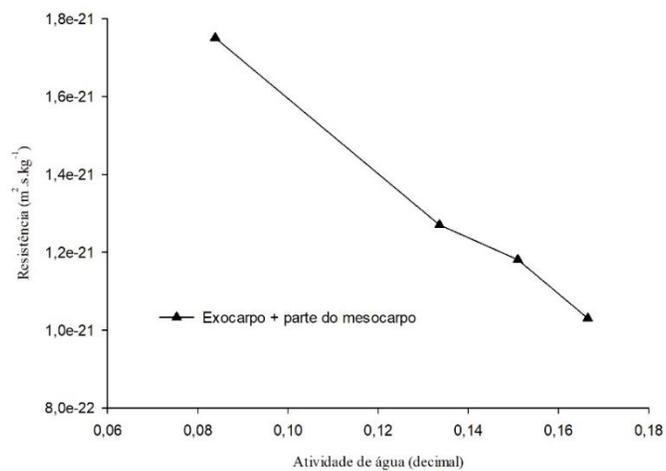
Fonte: Da autora (2017).

Figura 17 - Variação da resistência do café descascado em relação a atividade de água.



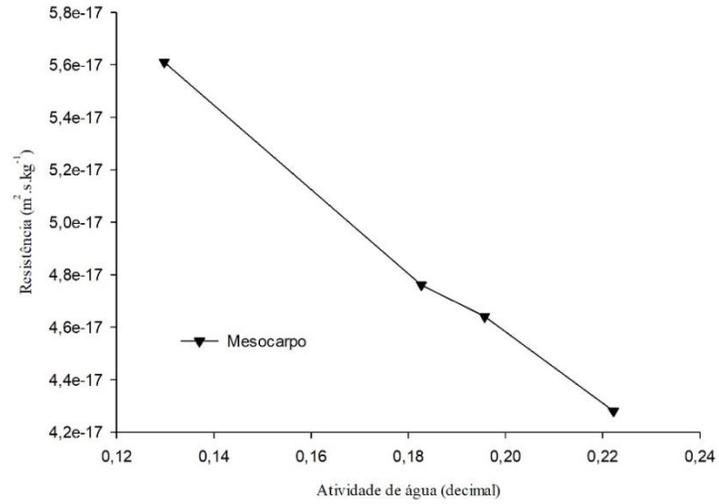
Fonte: Da autora (2017).

Figura 18 - Variação da resistência exocarpo + parte do mesocarpo em relação a atividade de água.



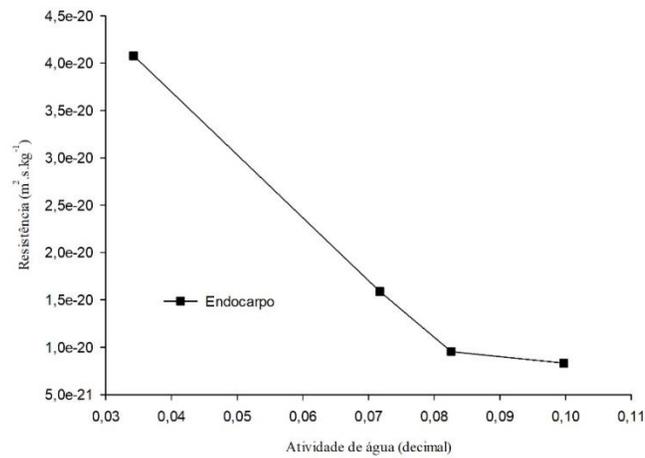
Fonte: Da autora (2017).

Figura 19 - Variação da resistência do mesocarpo em relação a atividade de água.



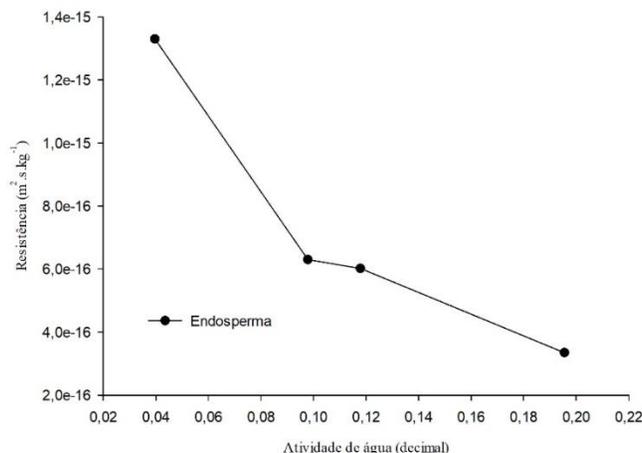
Fonte: Da autora (2017).

Figura 20 - Variação da resistência do endocarpo em relação a atividade de água.



Fonte: Da autora (2017).

Figura 21 - Variação da resistência endosperma em relação a atividade de água.



Fonte: Da autora (2017).

A Tabela 27 apresenta os valores corrigidos das resistências dos tecidos do pericarpo e do endosperma do fruto do café de acordo os parâmetros encontrados no *Statistica 5.0*.

Tabela 27 - Somatório das resistências de cada parte do fruto do café considerando espessura média e o fator de correção em comparação com a resistência total (café natural).

TRATAMENTOS	UR (%)			
	10	17,5	25	32,5
Natural	7,65657E-13	6,17111E-13	6,00363E-13	4,74079E-13
Exocarpo + parte do mesocarpo	5,89178E-13	3,90698E-13	3,57954E-13	3,11653E-13
Mesocarpo	3,12997E-13	2,51412E-13	2,10859E-13	1,95971E-13
Endocarpo	7,53844E-17	4,34389E-17	4,18466E-17	3,65964E-17
Endosperma	-1,13712E-13	-5,57508E-14	-5,57261E-14	-3,0981E-14
Somatório das partes do fruto do café	7,88538E-13	5,86403E-13	5,13129E-13	4,7668E-13

Fonte: Da autora (2017).

Os parâmetros encontrados pelo modelo proposto corrigem o fato dos tecidos e do endosperma do fruto do café estarem separados, no momento da

secagem para cada unidade relativa estudada, já que o somatório se aproxima ao resultado encontrado para o café natural, considerado como resistência total para validação do modelo.

De acordo com a Tabela 27, verifica-se que o café natural pode ser considerado como resistência total, já que apresenta o maior valor de resistência, assim como é composto de todas as partes anatômicas constituintes dos frutos. Os resultados encontrados corroboram com os valores encontrados para o coeficiente de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE) e erro relativo médio (P).

5 CONCLUSÕES

Isotermas de sorção:

De acordo com os resultados obtidos no estudo das isotermas de sorção do fruto do café e de suas partes e, nas condições que foi desenvolvido o trabalho, pode-se concluir que:

- a) Para o café natural, o modelo matemático que melhor descreveu os dados experimentais de teor de água de equilíbrio foi o modelo de Sigma Copace.
- b) O modelo de Sabbab foi o que apresentou os melhores ajustes aos dados experimentais para o café descascado e para o endosperma.
- c) O modelo de GAB modificado foi o que descreveu melhor o processo de sorção para o exocarpo + parte do mesocarpo e para o mesocarpo.
- d) Para o endocarpo, o modelo que melhor descreve o fenômeno estudado foi o Henderson modificado.
- e) Independentemente do tipo de processamento ou da parte do fruto do café, para uma mesma temperatura, o aumento da atividade de água promove o aumento do teor de água de equilíbrio.
- f) Para uma mesma atividade de água, para qualquer um dos tratamentos, o aumento de temperatura ocasiona um menor teor de água de equilíbrio.

Cinética de secagem:

Nas condições em que foi desenvolvido o presente trabalho, conclui-se que:

- a) Para o café natural, descascado, exocarpo + parte do mesocarpo e mesocarpo, o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais independente da umidade relativa estudada.
- b) O modelo de Midilli melhor descreveu os dados experimentais da cinética de secagem para o endocarpo, exceto na umidade relativa de 10%, em que o processo foi melhor descrito pelo modelo da Aproximação da difusão.
- c) Para o endosperma, o modelo de Page apresentou os melhores ajustes dos dados experimentais na umidade relativa de 25%, enquanto o modelo de Midilli apresentou os melhores ajustes para as umidades relativas de 10; 17,5 e 32,5%.

Coefficiente de resistência:

Pode-se concluir, nas condições em que o trabalho foi desenvolvido, que:

- a) O café natural é o que possui a maior resistência, $7,65657 \cdot 10^{-13}$; $6,17111 \cdot 10^{-13}$; $6,4715 \cdot 10^{-13}$; $4,74079 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$, nas umidades relativas de 10; 17,5; 25 e 32,5%, respectivamente.
- b) Café natural, café descascado, os tecidos do pericarpo e o endosperma do café apresentaram o maior valor de resistência na menor atividade de água.
- c) Cada parte do café imprime uma resistência diferente quanto à saída de água, sendo o maior valor encontrado para o endosperma, seguido pelo mesocarpo, endocarpo e exocarpo + parte do mesocarpo, sucessivamente.

REFERÊNCIAS

ABALONE, R.; GASTÓN, A.; CASSINERA, A. Thin layer drying of amaranth seeds. **Biosystems Engineering**, London, v. 93, p. 179-188, 2006.

ABDELMOTALEB, A. Thin layer drying of garlic slices using convection and combined (convection - infrared) heating modes. **Misr Journal of Agricultural Engineering**, Cairo, v. 26, n. 1, p. 251-281, Jan. 2009.

ADEOLA, O.; ORBAN, J. I. Chemical composition and nutrient digestibility of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) fed to growing pigs. **Journal of Cereal Science**, London, v. 22, p. 177-184, 1995.

AKPINAR, E. K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 73, n. 1, p. 75-84, Jan. 2006.

ALVES, T. P.; FÓZ, H. D.; NICOLETI, J. F. Isotermas de dessecção de pimentão verde e energia envolvida no processo. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 18, n. 2, p. 137-145, 2015.

ANDRADE, E. T.; BORÉM, F. M. Modelagem matemática e simulação aplicados na secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. p. 301-347.

ANDRADE, E. T. et al. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engvista**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 2, p. 83-95, 2006.

AVALONE, S. et al. Fate of mucilage cell wall polysaccharides during coffee fermentation. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Oxford, v. 49, p. 5556-5559, 2001.

AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. **Industrial Crops and Products**, London, n. 91, p. 76-87, 2016.

BABBITT, J. D. On the diffusion of adsorbed gases through solids. **Canadian Journal of Physics**, Ottawa, v. 29, p. 437-446, 1950.

BECKER, H. A.; SALLANS, H. R. A theoretical study of the mechanism of moisture diffusion in wheat. **Cereal Chemistry**, Saint Paul, v. 34, p. 395-409, 1957.

BETCHEL, D. B. How the structure of the wheat cariopsis should be modified to increase its end-use value. In: POMERANZ, Y. (Ed.). **Wheat is unique: structure, composition, processing, end-use properties, and products**. Saint Paul: American Association Cereal Chemists, 1989. chap. 5, p. 71-83.

BORÉM, F. M. **Handbook of coffee post-harvest technology**. Norcross: Gin, 2013.

BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. v. 1, 631 p.

BORÉM, F. M. et al. Qualidade do café submetido a diferentes temperaturas, fluxos de ar e períodos de pré-secagem. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 1, p. 55-63, 2006.

BORÉM, F. M.; GARCIA SALVA, T. J.; SILVA, E. A. A. da. Anatomy and chemical composition of the coffee fruit and seed. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Handbook of coffee post-harvest technology**. Norcross: Gin, 2013. p. 1-10.

BORÉM, F. M.; MARQUES, E. R.; ALVES, E. Ultra structural analysis damage in parchment Arabica coffee endosperm cells. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 99, n. 1, p. 62-66, Feb. 2008.

BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; ANDRADE, E. T. Secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. p. 205-240.

BRANDO, C. H. J. Harvesting and green coffee processing. In: WINTGENS, J. N. (Ed.). **Coffee: growing, processing, sustainable production**. Wiley: VCH, 2004. p. 605-714.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 2009. 399 p.

BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION. **O que são cafés especiais**. Disponível em: <<http://bsca.com.br/cafes-especiais.php>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI, 1992. 450 p.

BURGH, J. M.; FOSTER, S. J.; VALIPOUR, H. R. Prediction of water vapour sorption isotherms and microstructure of hardened Portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 81, p. 134-150, Mar. 2016.

BURMESTER, K.; EGGERS, R. Heat and mass transfer during the coffee drying process. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 99, n. 4, p. 430-436, Aug. 2010.

CAMICIA, R. G. M. et al. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 3, p. 206-214, 2015.

CAMPOS, A. N. R. et al. Isotermas de adsorção e calor isostérico da palma forrageira enriquecida proteicamente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 734-740, 2009.

CARVALHO, N. M. de; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4. ed. Jaboticabal: Ed. FUNEP, 2000. 588 p.

CARVALHO, V. D. de. **Cafeicultura empresarial: produtividade e qualidade**. 1997. 73 p. Monografia (Especialização *Lato Sensu* em Pós-Colheita do Café)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

CHRISTENSEN, C. M.; KAUFMANN, H. H. Microflora. In: CHRISTENSEN, C. M. (Ed.). **Storage of cereal grain and their products**. Saint Paul: AACC, 1974. p. 158-192.

CLIFFORD, M. N.; RAMIREZ-MARTINEZ, J. R. Phenols and caffeine in wet-processed coffee beans and coffee pulp. **Food Chemistry**, Oxford, v. 40, p. 35-42, 1991.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café, safra 2016 primeira estimativa, fev/2016**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; STRINGHETA, P. C. Estudo do fenômeno de adsorção de água e seleção de modelos matemáticos para representar a higroscopicidade do café solúvel. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 2, p. 19-25, 2000.

CORRÊA, P. C. et al. Curvas de dessecamento e calor latente de vaporização para sementes de milho pipoca (*Zea mays*). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, p. 75-79, 1998.

CORRÊA, P. C. et al. Isotermas de sorção de água de frutos de *Coffea canephora*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 10, p. 1047-1052, 2014.

CORRÊA, P. C. et al. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 4, p. 575-581, 2011.

CORRÊA, P. C. et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica*L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010a.

CORRÊA, P. C. et al. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. **International Journal of Food Science & Technology**, Oxford, v. 45, p. 2016-2022, 2010b.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2006.

COSTA, C. F. et al. Mathematical modeling and determination of thermodynamic properties of jaboticaba peel during the drying process. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 6, p. 576-580, 2016.

COSTA, L. M. et al. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crame. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1089-1096, 2011.

COSTA, L. M. et al. Isotermas e calor isostérico de sementes de *Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 516-523, 2015.

DI SCALA, K.; CRAPISTE, G. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, London, v. 41, n. 5, p. 789-795, June 2008.

DOYMAZ, I. Convective drying kinetics of strawberry. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Istanbul, v. 47, n. 5, p. 914-919, 2008.

FARIA, R. Q. et al. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 57-583, 2012.

FELDMAN, J. R.; RYDER, W. S.; KUNE, J. T. Importance of nonvolatile compounds to the flavor of coffee. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 17, n. 4, p. 733-739, 1969.

FOROUGH-DAHR, M. et al. On the characteristics of thin layer drying models for intermittent drying of rough rice. **Journal Chemical Engineering Communications**, London, v. 202, n. 8, p. 1024-1035, 2015.

FORTES, M. et al. Modelagem de um condicionador de ar de alta precisão para uso em processamento agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 578-589, maio/ago. 2006.

GARBALIŃSKA, H. et al. Comparative analysis of the dynamic vapor sorption (DVS) technique and the traditional method for sorption isotherms determination: exemplified at autoclaved aerated concrete samples of four density classes. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 91, p. 97-105, 2017.

GARCIA-PEREZ, J. V. et al. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. **LWT-Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 41, p. 18-25, 2008.

GONELLI, A. L. D. et al. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 11, p. 64-73, 2009. Edição especial café.

GONELLI, A. L. D. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.

GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of National Bureau of Standards A. Physics and Chemistry**, New York, v. 81A, n. 1, p. 89-96, 1977.

HASSINI, L. et al. Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. **Industrial Crops and Products**, London, v. 67, p. 457-465, 2015.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 17, p. 1167-1168, 1974.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 6, p. 169-174, 1961.

HERNÁNDEZ-DÍAZ, A. et al. Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 86, n. 1, p. 1-9, Jan. 2008.

HIMMEL, S.; MAI, C. Effects of acetylation and formalization on the dynamic water vapor sorption behavior of wood. **Holzforschung**, Berlin, v. 69, p. 633-643, 2015.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo, 2005. 1020 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Green coffee: determination of loss in mass at 105°C: ISO 6673**. Geneva, 2003. 17 p.

ISQUIERDO, E. P. **Cinética de secagem de café natural e suas relações com a qualidade para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar**. 2011. 157 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

ISQUIERDO, E. P. et al. Drying kinetics and quality of natural coffee. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 56, n. 3, p. 1003-1010, 2013.

JOHANN, G. et al. Comparing models to Neumann and Dirichlet conditions in grape seed drying. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 93, p. 865-871, 2016.

KANE, C. S. E. et al. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of two mints: *Mentha pulegium* and *Mentha roundifolia*. **Revue des Energies Renouvelables**, Alger, v. 11, n. 2, p. 181-195, 2008.

KARATHANOS, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 39, n. 4, p. 337-344, 1999.

KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 1, p. 98-108, Feb. 2007.

KRZYZANOWSKI, F. C.; WEST, S. H.; FRANÇA NETO, J. B. Drying soybean seed using air ambient temperature at low relative humidity. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, DF, v. 28, n. 2, p. 77-83, mar./abr. 2006.

LASSERAN, J. C. Princípios gerais de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 3, n. 3, p. 17-45, 1978.

LAZOUK, M. A. et al. Oilseeds sorption isotherms, mechanical properties and pressing: global view of water impact. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 153, p. 73-80, 2015.

LEHN, D. N.; PINTO, L. A. A. Isotermas de equilíbrio e curvas de secagem para arroz em casca em silos de armazenagem. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 12, n. 3, p. 177-191, 2004.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.

LOPES, C. R.; MUSCHE, R.; HEC, M. Identificação de pigmentos flavonóides e ácidos fenólicos nos cultivares Bourbon e Caturra de *C. arábica* L. **Revista Brasileira de Genética**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 657-669, 1984.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

MELO, P. C. **Cinética de secagem e armazenamento de *spirulina platensis***. 2016. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2016.

MESQUITA, J. B.; ANDRADE, E. T.; CORRÊA, P. C. Modelos matemáticos e curvas de umidade de equilíbrio de sementes de jacarandá-da-bahia, angico-vermelho e óleo-copaiba. **Cerne**, Lavras, v. 7, p. 12-21, 2001.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, New York, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 66, n. 4, p. 513-518, Feb. 2005.

MORAIS, S. J. S. **Cinética de secagem de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2010.

NILNONT, W. et al. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica* L.) drying. **Food and Bioproducts Processing**, Essex, v. 20, p. 341-350, Apr. 2012.

OLIVEIRA, G. H. H. et al. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 45, n. 3, p. 546-554, Mar. 2010.

OLIVEIRA, P. D. **Microscopia eletrônica de varredura e aspectos fisiológicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 181-189, 2006.

ONDIER, G. O.; SIEBENMORGEN, T. J.; MAUROMOUSTAKOS, A. Low-temperature, low-relative humidity drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 100, n. 3, p. 545-550, Oct. 2010.

PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice**. New York: J. Wiley, 1998. 303 p.

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying of shelled corn in thin layers**. 1949. 44 f. Thesis (Ph.D. in Mechanical Engineering)-Purdue University, Lafayette, 1949.

PARK, K. J. et al. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2007. 121 p.

POLACHINI, T. C. et al. Water adsorption isotherms and thermodynamic properties of cassava bagasse. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 632, p. 79-85, 2016.

PRATES, M. F. O. et al. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 514-521, 2012.

PUTRANTO, A. et al. Mathematical modeling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA). **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 105, n. 4, p. 638-646, Aug. 2011.

RADÜNZ, L. L. et al. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 19, n. 1, p. 19-27, 2011.

RAHIM, A. A.; GARBA, Z. N. Efficient adsorption of 4 Chloroguaiacol from aqueous solution using optimal activated carbon: equilibrium isotherms and kinetics modeling. **Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences**, Bahrain, v. 21, p. 17-23, 2016.

REIS, R. C. et al. Cinética de secagem de folhas de manjeriçã (*Ocimum basilicum* L.) via infravermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 12, p. 1346-1352, 2012.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. In: RENA, A. B. et al. (Ed.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1986. p. 13-106.

RESENDE, O. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansão (*Jatropha phacurcas* L.) durante a secagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 6, p. 1123-1135, 2011.

RESENDE, O. et al. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreno de concreto. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para a descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 12, p. 171-178, 2010.

RESIO, C. A.; AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C. The drying of amaranthus grain: mathematical modeling and simulation. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 303-309, June 2005.

RIBEIRO, D. M. et al. Taxa de redução de água do café cereja descascado em função da temperatura da massa, fluxo de ar e período de pré-secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 28, n. 7, p. 94-107, 2003.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. (Ed.). **Engineering properties of foods**. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005. chap. 7, p. 1-88.

ROLZ, C. et al. Coffee fermentation studies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COFFEE SCIENCE, 5., 1975, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa: ASIC, 1971. p. 259-269.

ROSA, D. P.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J. Study of the enthalpy-entropy mechanism from water sorption of orange seeds (*C. sinensiscv. Brazilian*) for the use of agro-industrial residues as a possible source of vegetable oil production. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 33, n. 1, p. 95-101, 2013.

ROSENTRATER, K. A.; VERBEEK, C. J. R. Water adsorption characteristics of extruded blends of corn gluten meal and distillers dried grains with solubles. **Food and Bioproducts Processing**, Davis, v. 101, p. 110-117, 2017.

SAATH, R. et al. Microscopia eletrônica de varredura do endosperma de café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 196-203, jan./fev. 2010.

SACILIK, K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 79, n. 1, p. 23-30, 2007.

SALAZAR, G. M. R. et al. Estudio morfológico, anatómico y ultraestructural del fruto de café *Coffea arabica* L. **Cenicafe**, Chinchina, v. 45, n. 3, p. 93-105, 1994.

SANTOS, A. E. et al. Modelagem matemática para a descrição da cinética de secagem do fruto da palma (*Opuntia ficus indica*). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 11, n. 1, p. 1-6, 2016.

SCHÄR, W.; RUÈGG, M. The Evaluation of GAB Constants from Water Sorption Data. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, London, v. 18, p. 225-229, 1985.

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 23, p. 1261-1265, 1980.

SILVA, H. W. et al. Kinetics and thermodynamic properties related to the drying of 'Cabacinha' pepper fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 2, p. 174-180, 2016.

SIMON, C. et al. Thermodynamic analysis of water vapour sorption behaviour of juvenile and mature wood of *Abies alba* Mill. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 50, p. 7282-7292, 2015.

SIMON, C. et al. Thermodynamic properties of the water sorption isotherms of wood of limba (*Terminalia superba* Engl. & Diels), obeche (*Triplochitonscleroxylon* K. Schum.), radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) and chestnut (*Castanea sativa* Mill.). **Industrial Crops and Products**, London, v. 94, p. 122-131, 2016.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Drying kinetics of *Jatropha* seeds. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 59, n. 2, p. 171-177, 2012.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Mathematical modelling of the drying of *Jatropha* fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 278-285, 2013.

SIVETZ, M. **Coffee processing technology**. Boca Raton: AVI, 1963. 598 p.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introducción a la termodinámica en ingeniería química**. 5. ed. México: McGraw Hill, 1997. 616 p.

SPADA, J. C. et al. Water adsorption isotherms of microcapsules with hydrolyzed pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds) starch as wall material. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 114, p. 64-69, 2013.

STATSOFT. **Statistica**: data analysis software system. Version 5.0. 1995. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

SUBBAIAH, M. V.; KIM, D. S. Adsorption of methyl orange from aqueous solution by aminated pumpkin seed powder: Kinetics, isotherms, and thermodynamic studies. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 128, p. 109-117, 2016.

TEIXEIRA, L. P.; ANDRADE, E. T.; SILVA, P. G. L. Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico da polpa e da casca do abacaxi (*Ananas comosus*). **Engevista**, Niterói, v. 14, p. 172-184, ago. 2012.

THOMPSON, T. L.; PEARTT, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 11, n. 4, p. 582-589, 1968.

TOHIDI, M.; SADEGHI, M.; TORKI-HARCHEGANI, M. Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 70, p. 519-528, 2017.

VERMA, L. R. et al. Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 28, n. 1, p. 296-301, 1985.

VILLELA, F. A.; PESKE, S. T. Secagem de sementes. In: PESKE, S.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G. (Ed.). **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. Pelotas: UFPel, 2003. p. 281-320.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transaction of ASAE**, Saint Joseph, v. 11, p. 668-672, 1978.

WANI, S. A.; KUMAR, P. Moisture sorption isotherms and evaluation of quality changes in extruded snacks during storage. **LWT - Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 74, p. 448-455, 2016.

WILBAUX, R. **Agricultural engineering**. Rome: FAO, 1963. 293 p. (Informal Working Bulletin, 20).

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; UZUN, H. I. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy**, Oxford, v. 26, n. 5, p. 457-465, 2001.

YEMMIREDDY, V. K. Effect of drying method on drying time and physico-chemical properties of dried rabbiteye blueberries. **Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 50, n. 2, p. 739-745, Mar. 2013.

ZANARDI, M. S. et al. Simulação da secagem da soja com coeficiente de difusão variável. **Engevista**, Niterói, v. 18, n. 1, p. 207-224, jul. 2016.

ZULUAGA, V. J. **Chemical properties of coffee**. Los Angeles: Coffee Chemistry, 1999. v. 2.