

MARCOS EDUARDO VIANA DE ARAUJO

**PROPRIEDADES FÍSICAS E AERODINÂMICAS DE FRUTOS E GRÃOS DE
CAFÉ (*Coffea arabica*) DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A663p
2019

Araujo, Marcos Eduardo Viana de, 1995-
Propriedades físicas e aerodinâmicas de frutos e grãos de
café (*Coffea arabica*) durante o processo de secagem / Marcos
Eduardo Viana de Araujo. – Viçosa, MG, 2019.
xv, 87 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Paulo Cesar Corrêa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 65-85.

1. Café - Secagem. 2. Café - Fisiologia pós-colheita.
3. Arrasto (Aerodinâmica). 4. Modelos matemáticos. 5. Atrito.
6. Café - Pesos e medidas. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

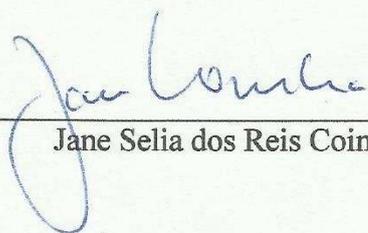
CDD 22. ed. 633.736

MARCOS EDUARDO VIANA DE ARAUJO

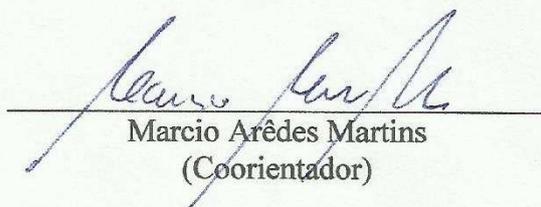
**PROPRIEDADES FÍSICAS E AERODINÂMICAS DE FRUTOS E GRÃOS DE
CAFÉ (*Coffea arabica*) DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

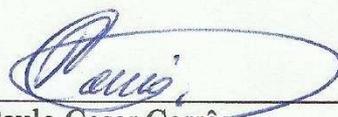
APROVADA: 21 de fevereiro de 2019.



Jane Selia dos Reis Coimbra



Marcio Arêdes Martins
(Coorientador)



Paulo Cesar Corrêa
(Orientador)

Aos meus pais, Marcos Antônio Ribeiro de Araujo e Cleunice da Silva Viana, pela infinita capacidade de amar, aos meus irmãos, Felipe, Gabriel e Rafael pelo companheirismo e confiança e à Eloiny por todo o amor, carinho e dedicação.

DEDICO

Aos meus avós, familiares e amigos, por todos os conselhos, por sempre acreditarem e apoiarem meus sonhos e por me ajudarem a torná-los possíveis.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, que se mostrou criador, que foi criativo. Seu fôlego de vida em mim me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

Aos meus pais, que me serviram como guia e apoio para todas as minhas decisões e realizações nessa jornada, e que a todo tempo não mediram esforços para que tudo isso fosse possível.

À Eloiny Guimarães Barbosa, pela confiança, amizade, paciência, pelas noites que foram exigidas para conclusão de todos os experimentos, pelas inestimáveis críticas e sugestões na redação dessa dissertação, por sempre estar ao meu lado, e por tornar tudo isso possível.

Ao Professor Paulo Cesar Corrêa, pela confiança, incentivo e orientação que permitiram a conclusão deste trabalho, e pelos ensinamentos e conselhos que serão levados por toda vida.

Ao Professor Marcio Arêdes Martins, pela coorientação, pelas valiosas críticas, sugestões e conselhos.

Ao Professor Paulo Roberto Cecon, por todo apoio e ajuda nas análises estatísticas e pelas valiosas dicas para conclusão desse trabalho.

Ao Professor Tetuo Hara, pelos conselhos e valiosos ensinamentos acadêmicos, profissionais e pessoais.

Aos amigos do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), pela troca de conhecimento e apoio constantes.

A todos que de alguma forma fizeram com que esse momento se realizasse, seja com conselhos, sugestões, incentivos, apoios ou confiança.

À Universidade Federal de Viçosa, e em especial, ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

BIOGRAFIA

MARCOS EDUARDO VIANA DE ARAUJO, filho de Marcos Antônio Ribeiro de Araujo e Cleunice da Silva Viana, nasceu em Anápolis, Goiás, Brasil, em 25 de dezembro de 1995.

Em fevereiro de 2013, iniciou o curso de Engenharia Agrícola na Universidade Estadual de Goiás (UEG), graduando-se em julho de 2017. No período de agosto de 2014 a julho de 2017, foi bolsista de iniciação científica pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) na mesma universidade.

Em agosto de 2017, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, na área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa da dissertação, requisito indispensável para a obtenção do título de Magister Scientiae, em fevereiro de 2019.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3 REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 Café	4
3.1.1 Morfologia dos frutos de café	4
3.1.2 Composição química dos grãos de café.....	5
3.1.3 Importância econômica do café.....	6
3.1.4 Processamento pós-colheita e qualidade.....	7
3.2 Propriedades físicas dos produtos agrícolas.....	9
3.2.1 Teor de água.....	9
3.2.2 Tamanho e forma	11
3.2.3 Contração volumétrica.....	12
3.2.4 Massa específica real ou unitária	13
3.2.5 Coeficiente de atrito estático.....	14
3.3 Propriedades aerodinâmicas dos produtos agrícolas	14
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	16
4.1 Obtenção da matéria-prima	16
4.2 Preparo das amostras	18
4.3 Propriedades físicas dos frutos e grãos de café durante a secagem	18
4.3.1 Tamanho e forma	18
4.3.2 Massa específica unitária ou real	19
4.3.3 Índice de contração volumétrica unitária	20
4.3.3.1 Análise estatística	21
4.3.4 Coeficiente de atrito estático.....	22
4.3.4.1 Análise estatística	23
4.4 Propriedades aerodinâmicas dos frutos e grãos de café durante a secagem .	23
4.4.1 Velocidade terminal experimental	23
4.4.2 Coeficiente de arrasto real	25

4.4.3	Coeficiente de arrasto teórico	26
4.4.4	Velocidade terminal teórica	27
4.5	Análise estatística dos dados	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	Propriedades físicas dos frutos de café durante a secagem.....	29
5.1.1	Massa específica unitária, tamanho e forma.....	29
5.1.2	Contração volumétrica unitária	33
5.1.3	Coeficiente de atrito estático.....	37
5.2	Propriedades físicas dos grãos de café durante a secagem	42
5.2.1	Massa específica unitária, tamanho e forma.....	42
5.2.2	Contração volumétrica unitária	46
5.2.3	Coeficiente de atrito estático.....	49
5.3	Propriedades aerodinâmicas dos frutos de café durante a secagem	53
5.3.1	Propriedades aerodinâmicas experimentais	53
5.3.2	Propriedades aerodinâmicas teóricas	56
5.4	Propriedades aerodinâmicas dos grãos de café durante a secagem	58
5.4.1	Propriedades aerodinâmicas experimentais	58
5.4.2	Propriedades aerodinâmicas teóricas	60
6	CONCLUSÕES	63
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	APÊNDICE A	86
	APÊNDICE B.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhe da morfologia do fruto de café.	5
Figura 2 – Fluxograma de condução do experimento.	16
Figura 3 – Cafeeiro (<i>Coffea arabica</i>) cultivar Oeiras (MG-6851).	17
Figura 4 – Lotes de café (<i>Coffea arabica</i>): cereja intacto (A) e cereja descascado (B) utilizados para compor as amostras experimentais.	17
Figura 5 – Representação esquemática dos eixos ortogonais dos frutos (A) e grãos (B) de café, em que: a, b e c são a maior, a intermediária e a menor dimensão característica do produto, respectivamente.	18
Figura 6 – Determinação da massa específica unitária do frutos e grãos de café em picnômetro.	19
Figura 7 – Plano inclinado com movimento de translação utilizado para determinação do coeficiente de atrito estático.	22
Figura 8 – Equipamento utilizado para obtenção da velocidade terminal experimental.	24
Figura 9 – Aferição da velocidade terminal com termo-anemômetro digital de fio quente.	24
Figura 10 – Forças atuantes sobre uma partícula em queda livre em corrente de ar ascendente.	25
Figura 11 – Algoritmo para obtenção da velocidade terminal e coeficiente de arrasto teóricos.	27
Figura 12 – Valores observados e estimados, da massa específica unitária dos frutos de café durante a secagem.	29
Figura 13 – Valores observados e estimados, da esfericidade dos frutos de café durante a secagem.	30
Figura 14 – Valores observados e estimados, da circularidade dos frutos de café durante a secagem.	30
Figura 15 – Valores observados e estimados, da área projetada dos frutos de café durante a secagem.	31
Figura 16 – Valores observados e estimados, do diâmetro geométrico dos frutos de café durante a secagem.	32
Figura 17 – Valores observados e estimados, do volume dos frutos de café durante a secagem.	32

Figura 18 – Correspondência dos valores observados e estimados pelo modelo ARAUJO-COPACE para contração volumétrica dos frutos de café.....	36
Figura 19 – Distribuição dos resíduos dos valores estimados pelo modelo ARAUJO-COPACE para contração volumétrica dos frutos de café.....	36
Figura 20 – Valores observados e estimados, pelo modelo ARAUJO-COPACE, da contração volumétrica unitária dos frutos de café.	37
Figura 21 – Coeficiente de atrito estático dos frutos de café em função do teor de água em Polietileno (A); Acrílico (B); Aço liso (C); Aço rugoso (D) e Ferro (E).	39
Figura 22 – Valores observados e estimados, da massa específica unitária dos grãos de café durante a secagem.....	42
Figura 23 – Valores observados e estimados, da esfericidade dos grãos de café durante a secagem.	43
Figura 24 – Valores observados e estimados, da circularidade dos grãos de café durante a secagem.	43
Figura 25 – Valores observados e estimados, da área projetada dos grãos de café durante a secagem.	44
Figura 26 – Valores observados e estimados, do diâmetro geométrico dos grãos de café durante a secagem.....	45
Figura 27 – Valores observados e estimados, do volume dos grãos de café durante a secagem.	45
Figura 28 – Correspondência dos valores observados e estimados pelo modelo Bala e Woods adaptado para contração volumétrica dos grãos de café.	48
Figura 29 – Valores observados e estimados, pelo modelo Bala e Woods adaptado, da contração volumétrica unitária dos grãos de café.....	48
Figura 30 – Coeficiente de atrito estático dos grãos de café em função do teor de água em Polietileno (A); Acrílico (B); Aço liso (C); Aço rugoso (D) e Ferro (E).	51
Figura 31 – Valores observados e estimados, da velocidade terminal dos frutos de café durante a secagem.....	53
Figura 32 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto real dos frutos de café durante a secagem.	54
Figura 33 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto real dos frutos de café em função do número de Reynolds.....	55
Figura 34 – Valores observados e estimados, da velocidade terminal experimental e teórica para os frutos de café em função do teor de água.....	56

Figura 35 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto experimental e teórico para os frutos de café em função do teor de água.....	57
Figura 36 – Valores observados e estimados, da velocidade terminal dos grãos de café durante a secagem.....	58
Figura 37 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto real dos grãos de café durante a secagem.....	59
Figura 38 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto real dos frutos de café em função do número de Reynolds.....	59
Figura 39 – Valores observados e estimados, da velocidade terminal experimental e teórica para os grãos de café em função do teor de água.	60
Figura 40 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto experimental e teórico para os grãos de café em função do teor de água.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teores médios de alguns constituintes químicos do grão de café maduro beneficiado.....	6
Tabela 2 – Modelos utilizados para simular o índice de contração volumétrica de produtos agrícolas.....	20
Tabela 3 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados para as propriedades físicas dos frutos de café.....	33
Tabela 4 – Parâmetros estimados dos modelos de contração volumétrica unitária dos frutos de café ajustados aos valores experimentais.	34
Tabela 5 – Parâmetros estimados pelo modelo ARAUJO-COPACE e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), erro médio relativo (P), erro padrão da estimativa (SE).	35
Tabela 6 – Médias dos coeficientes de atrito estático dos frutos de café em função do teor de água e do material.	38
Tabela 7 – Rugosidade média (μm) e respectivo desvio padrão das superfícies dos materiais utilizados.....	38
Tabela 8 – Coeficientes dos modelos de regressão linear ajustados para o coeficiente de atrito estático dos frutos de café para diferentes materiais.	40
Tabela 9 – Limites superiores e inferiores do coeficiente de atrito estático dos frutos de café, em função do teor de água e do material.	41
Tabela 10 – Coeficientes dos modelos de regressão ajustados para as propriedades físicas dos grãos de café.....	46
Tabela 11 – Parâmetros estimados dos modelos de contração volumétrica unitária dos grãos de café ajustados aos valores experimentais.	47
Tabela 12 – Médias dos coeficientes de atrito estático dos grãos de café em função do teor de água e do material.	49
Tabela 13 – Coeficientes dos modelos de regressão ajustados para o coeficiente de atrito estático dos grãos de café para diferentes materiais.	50
Tabela 14 – Limites superiores e inferiores do coeficiente de atrito estático dos frutos de café, em função do teor de água e do material.	52
Tabela 15 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados para as propriedades aerodinâmicas dos frutos de café.....	55

Tabela 16 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados para as propriedades aerodinâmicas dos frutos de café.....	57
Tabela 17 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados para as propriedades aerodinâmicas dos grãos de café.....	60
Tabela 18 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados para as propriedades aerodinâmicas dos grãos de café.	62

RESUMO

ARAUJO, Marcos Eduardo Viana, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Propriedades físicas e aerodinâmicas de frutos e grãos de café (*Coffea arabica*) durante o processo de secagem.** Orientador: Paulo Cesar Corrêa. Coorientador: Marcio Arêdes Martins.

O café é a segunda maior commodity de exportação e considerada a mais valiosa cultura de exportação tropical. O conhecimento das propriedades físicas e aerodinâmicas do café é de fundamental importância para melhoria do processo produtivo e correta preservação do produto até sua comercialização. Diante do exposto, objetivou-se com esse estudo, determinar e modelar a variação das propriedades físicas e aerodinâmicas de frutos e grãos de café durante o processo de secagem. Para tanto, foram utilizados frutos e grãos de café arábica (*Coffea arabica*) da variedade Oeiras (MG-6851), procedentes do Sítio Pedra Redonda, localizado em Araponga – Minas Gerais. Os frutos foram colhidos manualmente e selecionados apenas no estágio cereja. Os testes experimentais foram realizados com frutos e grãos de café, com teores de água iniciais de 1,77 e 1,13 (decimal, b.s.), respectivamente. As amostras foram submetidas ao processo de secagem em estufa com circulação forçada de ar à 45 ± 2 °C, até diferentes níveis de teores de água. Foram determinadas as principais propriedades físicas (massa específica unitária, esfericidade, circularidade, diâmetro geométrico, área projetada, volume, contração volumétrica unitária e coeficiente de atrito estático em diferentes materiais) e propriedades aerodinâmicas (velocidade terminal e coeficiente de arrasto, reais e teóricos) dos frutos e dos grãos durante a secagem. Modelos matemáticos foram ajustados para representar a variação das propriedades em função do teor de água. De acordo com os resultados obtidos pôde-se concluir que: (a) a redução do teor de água durante a secagem proporciona a redução da massa específica unitária dos frutos em 30%; (b) o tamanho e a forma dos frutos de café são influenciados pela redução do teor de água, promovendo redução da esfericidade, circularidade, área projetada, diâmetro geométrico e volume; (c) os frutos de café apresentaram contração volumétrica de 40% durante o processo de secagem. A contração volumétrica é mais acentuada no começo do processo de secagem, tendendo a se estabilizar nos menores valores de teor de água; (d) dentre os modelos empíricos testados que descrevem a contração volumétrica, nenhum apresentou ajuste satisfatório. Dessa forma foi proposto um novo modelo, nominado ARAUJO-COPACE, que representou de forma aceitável o fenômeno; (e) o coeficiente de atrito estático dos frutos de café aumentou linearmente com a redução do teor de água,

independentemente do material da superfície. O material utilizado não apresentou influência significativa sobre o coeficiente de atrito estático, contudo, os maiores valores foram observados para os materiais com maior rugosidade; (f) a velocidade terminal experimental dos frutos de café apresentou redução ao longo do processo de secagem, ao passo que o coeficiente de arrasto apresentou tendência de aumento; (g) as propriedades aerodinâmicas teóricas dos frutos de café durante a secagem, encontradas neste estudo, apresentaram valores próximos aos experimentais representando de forma aceitável os fenômenos em função do teor de água. Os erros encontrados foram inferiores aos apresentados na maioria dos estudos; (h) a massa específica unitária dos grãos de café reduziu em 32% com o processo de secagem; (i) a redução do teor de água influencia o tamanho e a forma dos grãos de café, resultando em um ligeiro aumento da esfericidade e circularidade, e na redução do diâmetro geométrico e área projetada; (j) o volume dos grãos de café é reduzido ao longo do processo de secagem, resultando em uma contração volumétrica de aproximadamente 20%; (k) o modelo de Bala e Woods adaptado, dentre os testados, foi o que melhor representou o fenômeno de contração volumétrica dos grãos de café durante a secagem; (l) a redução do teor de água promove a redução do coeficiente de atrito estático dos grãos de café. O atrito dos grãos foi mais influenciado pelo teor de água do que pelo material que compunha a superfície. As superfícies de maior rugosidade apresentaram maiores valores do coeficiente de atrito estático; (m) a velocidade terminal experimental dos grãos de café apresenta redução ao longo da secagem, enquanto o coeficiente de arrasto apresenta aumento; (n) as propriedades aerodinâmicas teóricas dos grãos de café apresentaram resultados semelhantes aos experimentais, representando de forma adequada os fenômenos investigados.

ABSTRACT

ARAUJO, Marcos Eduardo Viana, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Physical and aerodynamic properties of coffee fruits and beans (*Coffea arabica*) during the drying process.** Adviser: Paulo Cesar Corrêa. Co-adviser: Marcio Arêdes Martins.

Coffee is the second largest export commodity and considered the most valuable tropical export crop. The knowledge of the physical and aerodynamic properties of coffee is of fundamental importance for the improvement of the productive process and correct preservation of the product until its commercialization. Given the above, the aim of this study was to determine and model the variations of the physical and aerodynamic properties of coffee fruits and beans during the drying process. For that, Arabica coffee (*Coffea arabica*) fruits and beans of the variety Oeiras (MG-6851), coming from Sítio Pedra Redonda, located in Araponga – Minas Gerais, were used. The fruits were harvested manually and selected only in the cherry stage. The experimental tests were performed with coffee fruits and beans, with initial moisture contents of 1.77 and 1.13 (decimal, d.b.), respectively. The samples were submitted to the oven drying process with forced air circulation at 45 ± 2 ° C, until different moisture contents. The main physical properties (unit specific mass, sphericity, circularity, geometric diameter, projected area, volume, unit volumetric contraction and static friction coefficient in different materials) and aerodynamic properties (terminal velocity and drag coefficient, real and theoretical) of fruits and beans during drying. Mathematical models were adjusted to represent the variation of the properties as a moisture content function. According to the results obtained it was possible to conclude that: (a) the reduction of the moisture content during drying provides the reduction of the unit specific mass of the fruits by 30%; (b) the size and shape of the coffee fruits are influenced by the reduction of moisture content, promoting reduction of sphericity, circularity, projected area, geometric diameter and volume; (c) the coffee fruits presented a volumetric contraction of 40% during the drying process. The volumetric contraction is more pronounced at the beginning of the drying process, tending to stabilize at the lower values of moisture content; (d) among the empirical models tested that describe the volumetric contraction, none presented satisfactory adjustment. Thus, a new model, nominated ARAUJO-COPACE, was proposed, and represented in an acceptable way the phenomenon; (e) the coefficient of static friction of the coffee fruits increases linearly with the reduction of the moisture content, regardless of surface material. The material used did not present significant influence on the coefficient of static friction, however, the higher values were

observed for the materials with greater roughness; (f) the experimental terminal velocity of the coffee fruits presented reduction during the drying process, whereas the coefficient of drag showed an increased tendency; (g) the theoretical aerodynamic properties of the coffee fruits during drying, found in this study, presented values close to the experimental ones, representing in an acceptable way the phenomena as a function of the moisture content. The errors found were lower than those presented in most studies; (h) the unit specific mass of coffee beans was reduced by 32% with the drying process; (i) the reduction of the moisture content influences the size and shape of the coffee beans, resulting in a slight increase in sphericity and circularity, and in the reduction of the geometric diameter and projected area; (j) the volume of the coffee beans is reduced throughout the drying process, resulting in a volumetric contraction of approximately 20%; (k) the Bala and Woods adapted model, among those tested, was the one that best represented the phenomenon of volumetric contraction of coffee beans during drying; (l) the reduction of the moisture content promotes the reduction of the coefficient of static friction of the coffee beans. The grain friction was more influenced by the moisture content than surface material. The surfaces of greater roughness presented higher values of the coefficient of static friction; (m) the experimental terminal velocity of the coffee beans presents reduction during the drying, while the coefficient of drag shows increase; (n) the theoretical aerodynamic properties of the coffee beans presented similar results to the experimental ones, adequately representing the investigated phenomena.

1 INTRODUÇÃO

O café foi descoberto há cerca de 2000 anos na Etiópia e é provável que os etíopes tenham sido os primeiros a reconhecer seus efeitos estimulantes. Segundo a Organização Internacional do Café (ICO, 2018), o consumo global de café é de aproximadamente 148 milhões de xícaras por ano e, apesar da inflação global, contínuas flutuações nos preços e restrições comerciais, há um aumento contínuo na demanda por café de qualidade. A qualidade do café pode ser afetada por diversos fatores, dos quais pode-se citar as condições de crescimento (clima, solo, altitude, etc.) e tratamentos pós-colheita (Liu et al., 2019).

Apesar de mais de 100 espécies de café terem sido identificadas, *Coffea arabica* (café arábica) e *Coffea canephora* (café robusta) representam aproximadamente 60 e 38% de todo o café produzido mundialmente, respectivamente (Geeraert et al., 2019). O café arábica é comumente preferido pelos consumidores, devido às suas propriedades organolépticas (aroma e sabor) características, sendo cultivado em mais de 60 países (Combes et al., 2018). Mais de 1000 compostos responsáveis pelo aroma e sabor do café já foram identificados (Angeloni et al., 2019), e estudos da qualidade de bebida em função das propriedades físicas dos grãos vêm sendo realizados.

O café é considerado a cultura de exportação tropical mais valiosa atualmente, e é economicamente uma das commodities agrícolas mais importantes do mundo, sendo superada apenas pelo petróleo (Peshev et al., 2018). O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, tendo sua produção concentrada nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo, que juntos representam cerca de 84% da produção nacional (CONAB, 2018). O café é comercializado internacionalmente como café verde (café seco antes do processo de torra), obtido após o processamento por via seca ou via úmida (Ciaramelli et al., 2019).

A redução do teor de água nos frutos e grãos de café durante o processamento pós-colheita resulta na alteração de suas propriedades físicas e aerodinâmicas, bem como na qualidade do produto final (Khodabakhshian et al., 2018). A influência do teor de água sobre tais características é de imprescindível conhecimento, uma vez que, de posse dessas informações é possível minimizar os custos de produção, dimensionar e operar equipamentos de forma adequada e oferecer dados para melhorar a conservação do produto (Ramashia et al., 2018). Além disso, o conhecimento dessas propriedades fornece suporte para o desenvolvimento de processos, modelagens matemáticas e simulações que visam aperfeiçoar o sistema produtivo do café (Zielinska et al., 2012).

Uma das mudanças físicas mais importantes durante o processo de secagem dos produtos agrícolas é a redução do seu volume. Negligenciar esse fenômeno nos processos de secagem e armazenagem é uma das fontes mais consideráveis de erros na predição de fenômenos e desenvolvimento de modelos concernentes à tais operações (Brooker et al., 1992). Assim sendo, as informações relacionadas a geometria (tamanho e forma), teor de água e massa específica dos produtos agrícolas, tornam-se subsídios para estudos envolvendo transferência de calor e massa, movimentação de ar em massas granulares, separação e classificação, dentre outros.

Outra importante característica física para o manuseio e armazenamento dos produtos agrícolas é o coeficiente de atrito estático, que limita o ângulo máximo de inclinação de transportadores e de demais acessórios do sistema de armazenamento. A determinação dessa propriedade em diferentes teores de água e diferentes materiais fornece dados de extrema importância para projetistas de unidades armazenadoras. Essas informações são amplamente utilizadas em processos que envolvem a movimentação do produto, principalmente nos processos de carga e descarga por gravidade (Silva et al., 2011).

A utilização dos dados referentes as propriedades físicas dos produtos, pode ser verificada em toda cadeia produtiva agrícola. Juntamente com estas, a determinação das propriedades aerodinâmicas torna-se necessário para aprimorar todo e qualquer processo que envolva escoamento de ar. As propriedades aerodinâmicas apresentam grande aplicação no processo de separação de produtos indesejáveis, como impurezas e materiais de qualidade inferior, principalmente nas operações de colheita, seleção, limpeza, secagem, beneficiamento e classificação (Marathe et al., 2017). Além disso, as informações acerca dessas propriedades permitem a separação de produtos com diferentes teores de água e massa específica, e podem ser utilizadas para a correta utilização de transportadores pneumáticos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar e modelar a variação das propriedades físicas e aerodinâmicas de frutos e grãos de café durante o processo de secagem.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a variação das propriedades físicas: massa específica real, esfericidade, circularidade, diâmetro geométrico, área projetada e volume dos frutos e grãos de café durante a secagem;
- Determinar e modelar a contração volumétrica dos frutos e grãos de café para diferentes teores de água;
- Avaliar a influência da rugosidade do material de superfície e do teor de água dos frutos e grãos de café sobre o coeficiente de atrito estático;
- Determinar experimental e teoricamente as propriedades aerodinâmicas: velocidade terminal e coeficiente de arrasto dos frutos e grãos de café processados por via seca e via úmida.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Café

O café é uma bebida levemente amarga, feita a partir dos grãos de café, torrados e moídos, e é amplamente consumida devido às suas propriedades e composição estimulantes (Ballesteros et al., 2014; Contreras-Calderón et al., 2016). Estima-se que o café possua mais de mil compostos orgânicos, dos quais muitos são biologicamente ativos, incluindo a cafeína, diterpenos e ácido clorogênico, além daqueles que conferem efeito antioxidante e anti-inflamatório, como quininas, ligninas e trigonelinas (O’Keeffe et al., 2018). Tantos benefícios, fizeram com que o café se tornasse a segunda bebida mais consumida em alguns países, ficando atrás somente da água (Martínez et al., 2017).

O valor do café está intimamente associado à sua qualidade, dessa maneira, o valor do produto tende a crescer com o aumento do nível de qualidade. A qualidade do produto pode assumir diferentes significados para diferentes consumidores, produtores e organizações reguladoras. Em termos de café, a qualidade pode resultar de um grande número de fatores determinantes, como o sistema de produção, o aspecto e a composição química dos grãos verdes ou torrados, o processo de torrefação e a preparação da xícara (Craig et al., 2018). Portanto, a busca por produção com qualidade, correto processamento pós-colheita e os melhores meios de comercialização devem ser, no atual momento, as principais metas a serem atingidas pela cafeicultura (Otero et al., 2018).

3.1.1 Morfologia dos frutos de café

O fruto de café (também chamado de baga ou cereja) é uma drupa constituída de duas sementes, cobertas por uma camada de aspecto pergaminoso (endocarpo) formada por fibras esclerenquimáticas alongadas. O endocarpo é coberto pela polpa ou mucilagem, tecido translúcido, incolor, fino, viscoso e altamente hidratado (mesocarpo) e finalmente pela casca (exocarpo) (Esquivel e Jiménez, 2012; Janissen e Huynh, 2018). As sementes apresentam formas plana-convexas sulcadas longitudinalmente na face plana. Estas são formadas pela testa (película prateada composta de fibras alongadas com células de paredes espessadas) e pelo endosperma, principal componente das sementes, apresentando pequenas células ricas em óleo nas camadas externas e células maiores com paredes finas no centro das sementes (Narita e Inouye, 2014). O detalhe da morfologia do fruto de café é apresentado na Figura 1.

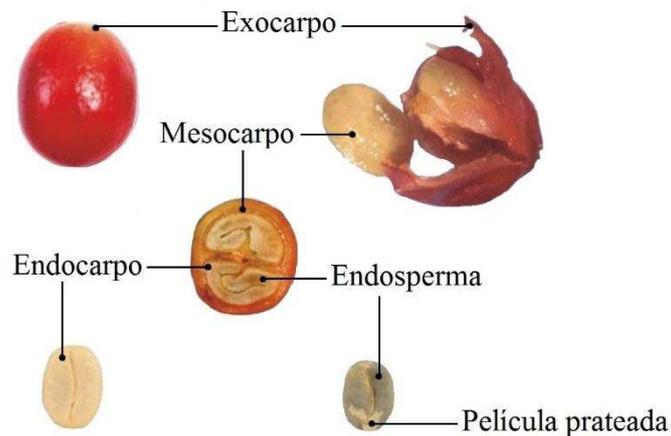


Figura 1 – Detalhe da morfologia do fruto de café.

3.1.2 Composição química dos grãos de café

A bebida nominada café é de longe, o produto final mais importante obtido a partir dos grãos de café. Devido à importância dessa bebida em todo o mundo, extensas pesquisas têm sido conduzidas sobre a composição química, bem como sobre as potenciais propriedades benéficas e prejudiciais do grão de café torrado e da bebida (Esquivel e Jiménez, 2012). Ressalta-se que a composição e muitas características dos grãos, que mais tarde determinam as propriedades e a qualidade do café fabricado, não dependem apenas da espécie (*Coffea arabica* ou *Coffea canephora*), condições de cultivo das plantas (sombra, poda, adubação, solo, altitude, exposição solar, pluviosidade e temperatura), grau de maturação (verde, cereja, passa) e colheita, mas também do método de processamento (via seca ou via úmida) (Stalmach et al., 2006; Belay et al., 2008).

Segundo Pereira et al. (2019), o desenvolvimento eficiente dos processos de secagem e armazenagem requer o conhecimento das características físicas e químicas dos grãos de café. A composição química inicial, assim como as alterações químicas que ocorrem no processamento pós-colheita, podem ter impacto direto na qualidade e valor do produto final (Sunarharum et al., 2014). A influência do genótipo, método de cultivo e tratamento pós-colheita sobre a qualidade final do café, relacionado à sua composição ainda está sendo investigada (Knysak, 2017). Os teores médios de alguns constituintes químicos do grão de café maduro beneficiado são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Teores médios de alguns constituintes químicos do grão de café maduro beneficiado.

Constituinte	Teor (%)	Referências
Água	8,0 - 12,0	Abreu et al., 2015; Corrêa et al., 2014
Proteína	9,0 - 16,0	Amorim e Josephson, 1975; Montavon et al., 2003; Morgano et al., 2005
Minerais	2,5 - 4,5	Clarke e Macrae, 1990; Pujol et al., 2013
Lipídeos	10,0 - 18,0	Kurzrock et al., 2004; Speer e Kolling-Speer, 2006; Toci et al., 2013
Carboidratos	20,0 - 25,0	Mussatto et al., 2011; Wei e Tanokura, 2014; Durán et al., 2017
Sólidos solúveis	24,0 - 31,0	Mendonça et al., 2005
Açúcares totais	5,0 - 11,2	Mendonça et al., 2007; Morgano et al., 2007; Borém et al., 2008; Santos et al., 2009
Açúcares redutores	0,0 - 5,0	Mendonça et al., 2007; Borém et al., 2008; Santos et al., 2009
Ácido clorogênico	2,0 - 9,0	Farah et al., 2008; Suárez-Quiroz et al., 2014; Jeon et al., 2017
Cafeína	0,6 - 1,8	Franca et al., 2005; Mendonça et al., 2007; Mussatto et al., 2011

3.1.3 Importância econômica do café

O cafeeiro pertence ao gênero *Coffea*, da família Rubiaceae, e possui mais de 100 diferentes espécies, das quais apenas duas apresentam valor econômico desejável (Semen et al., 2017). Das duas espécies de café mais cultivadas mundialmente, *Coffea arabica* e *Coffea canephora*, conhecidos popularmente como “arábica” e “robusta” respectivamente, o café arábica é responsável por cerca de 60% da produção mundial, sendo preferido pelos

consumidores graças à sua maior acidez, menor amargor e melhor sabor, comparado ao café robusta (Combes et al., 2018). Por estas características e por apresentar maiores exigências quanto ao clima, solo, manejo e processamento, o café arábica é geralmente mais valorizado economicamente em relação ao café robusta. Alguns cafés arábica de origem geográfica particular, tem seu preço ainda mais elevado (Rubayiza e Meurens, 2005; Dankowska et al., 2017).

Representando a segunda maior commodity de exportação, ficando atrás apenas do petróleo, o café é considerado a mais valiosa cultura de exportação tropical em todo mundo (Atallah et al., 2018; FAO, 2018; Peshev et al., 2018). A produção mundial está concentrada na América do Sul e Central, Caribe, África e Ásia (Restuccia et al., 2015), no entanto é cultivado comercialmente em toda região geográfica entre as latitudes 30° Norte e 30° Sul, conhecida como “cinturão do café” (Pereira et al., 2019). A produção mundial de café em grãos excedeu 9 milhões de toneladas na safra 2017/2018, e apresentou faturamento próximo a US\$ 21 bilhões. O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, com cerca de 50 milhões sacas de 60 kg produzidas em 2017 (ICO, 2018). No Brasil, Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo são os principais estados produtores de café, representando 54, 20, e 10% da produção nacional, respectivamente (CONAB, 2018).

3.1.4 Processamento pós-colheita e qualidade

O café é comercializado internacionalmente como café verde (coberto ou não com a película prateada), obtido após o processamento por via seca ou via úmida (Ciaramelli et al., 2019). No primeiro processo, os frutos de café colhidos são secos, geralmente ao sol, e posteriormente são descascados com o auxílio de um descascador mecânico. Durante o descascamento, a casca, polpa, mucilagem e pergaminho são removidas juntamente com o tanto quanto possível da película prateada (Esquivel e Jiménez, 2012). No processo via úmida, a flutuação dos frutos danificados e verdes na água, permite sua separação dos maduros que afundam. Em seguida, a casca e a maior parte da polpa dos frutos maduros são removidas. A remoção da casca e da polpa é realizada por meio da prensa dos frutos contra um cilindro perfurado. Os restos de polpa e a camada de mucilagem são removidos na etapa seguinte. Isso pode ser feito através de fermentação “controlada” (por 12 – 48 h) e lavagem em tanques de concreto, ou através de lavagem mecânica (aquapulping) (Dadi et al., 2018). A Película prateada pode ser opcionalmente removida por uma máquina de polimento, afim de se obter um produto Premium, de maior qualidade (Joet et al., 2010).

O método de processamento para obtenção do café verde tem influência direta sobre as propriedades sensoriais do café produzido posteriormente. Muitas dessas diferenças podem ser atribuídas a composição química do café verde, incluindo a presença ou não do aminoácido não proteico ácido γ -aminobutírico e hexoses. É geralmente assumido que o café processado por via úmida tem melhor aroma e, portanto, maior aceitação (Bytof et al., 2005; Knopp et al., 2006). O café oriundo do processamento via úmida apresenta ainda teores mais elevados de ácidos clorogênicos e trigonelina e menor conteúdo de sacarose, se comparado ao obtido por via seca (Duarte et al., 2010). Este fato pode ser atribuído às diferentes atividades metabólicas do açúcar e aminoácidos livres no interior dos grãos, como resultado das condições a quais estes são submetidos (Pereira et al., 2017).

Os grãos resultantes de qualquer método de processamento devem ser secos até um teor de água final de 10 a 12%. Este processo pode ser realizado por secagem ao sol ou utilizando secadores (isto é, secadores estáticos, secadores de coluna, secadores redondos ou secadores de ar forçados) (Bruyn et al., 2017). A escolha da técnica de secagem utilizada está vinculada a fatores econômicos e/ou ao tipo de processamento empregado. Por exemplo, no processamento via seca, a preservação do exocarpo e do mesocarpo prolonga o tempo necessário para atingir os níveis desejáveis de umidade, pois o teor de água dos frutos colhidos é de aproximadamente 70%. Por esse motivo, o uso de secadores mecânicos não é recomendado, pois representaria um custo alto e desnecessário (Kleinwachter et al., 2015). Por outro lado, o uso de secadores mecânicos para cafés processados por via úmida ganhou maior visibilidade devido à redução tanto do tempo de secagem quanto do risco de contaminação microbiana (Pereira et al., 2019).

A avaliação de qualidade do café é um passo fundamental na definição de preços e determina seu potencial de exportação nos países produtores. Conseqüentemente, a qualidade associada a cada tipo de café é de grande importância para torrefadores e distribuidores (Santos et al., 2012). Atualmente, a análise da qualidade física está entre as principais ferramentas para avaliação da qualidade do café, juntamente com o teste de xícara (Donovan et al., 2019). A qualidade física dos grãos de café verde está associada a presença de defeitos encontrados em determinados lotes de café, como desvios no odor, cor, tamanho, forma e massa específica (Tolessa et al., 2016). Com base nesses atributos de qualidade, o sistema de classificação do café varia e segue diretrizes específicas do país produtor.

3.2 Propriedades físicas dos produtos agrícolas

A redução do teor de água nos grãos e frutos de café, por ocasião da secagem, pode influenciar diretamente suas propriedades físicas e sua qualidade (Aviara et al., 2013; Khodabakhshian et al., 2018). O conhecimento dessas propriedades é fundamental para a redução de custos, correta conservação e para o dimensionamento e operação de equipamentos nas principais operações pós-colheita da cultura (Ramashia et al., 2018). Além disso, o conhecimento dessas propriedades é um importante fator que contribui para o desenvolvimento de processos e simulações matemáticas, que visam aperfeiçoar o sistema produtivo do café (Ramos et al., 2003; Zielinska et al., 2012).

Durante a última década grandes esforços na avaliação das propriedades físicas dos produtos agrícolas vêm sendo realizados. Munder et al. (2018) apontaram a utilidade prática dessas propriedades nos projetos de máquinas, projetos estruturais, engenharia de processos e controle, dentre outros. No entanto, o conhecimento das propriedades físicas dos produtos agrícolas não tem uso restrito à engenharia, podendo as informações serem de grande utilidade em outros ramos da ciência ou tecnologia relacionadas com o comportamento físico e processamento de frutos e vegetais, de um modo geral (Sharma et al., 2011).

Devido à grande importância das propriedades físicas em todas as etapas da cadeia produtiva dos produtos agrícolas, muitos estudos com foco na determinação dessas propriedades para materiais vegetais foram realizados, como sementes de jatrofa (Garnayak et al., 2008), semente de karanja (Pradhan et al., 2008), frutos de jatrofa (Pradhan et al., 2009), frutos e sementes de simarouba (Dash et al., 2008), frutos de café robusta (Botelho et al., 2016), sementes de mamão (Mansouri et al., 2017), sementes de gergelim (Araujo et al., 2018), sementes de girassol (Khodabakhshian et al., 2018), dentre outros.

3.2.1 Teor de água

O teor de água dos grãos representa a quantidade de água por unidade de massa do grão úmido ou seco. Pode ser expresso pela relação entre a quantidade água e a massa seca do grão (base seca – Equação 1), ou entre a quantidade de água e a massa total do grão (base úmida – Equação 2) (BRASIL, 2009). Para a secagem, a armazenagem e o processamento de café, o teor de água tem sido considerado uma das mais importantes características. Bruyn et al. (2017) relatam que os valores de teor de água considerados seguros para o

armazenamento do café devem ser respeitados para que a qualidade do produto não seja negativamente influenciada por este fator.

$$U^* = \frac{m_a}{m_s} \times 100 = \frac{m_a}{m_t - m_a} \times 100 \quad (1)$$

$$U = \frac{m_a}{m_t} \times 100 = \frac{m_a}{m_s + m_a} \times 100 \quad (2)$$

Em que,

- U – Teor de água em base úmida, %;
- U* – Teor de água em base seca, %;
- m_a – massa de água da amostra, g;
- m_s – massa seca da amostra, g; e
- m_t – massa total da amostra, g.

O teor de água dos produtos agrícolas é de extrema importância para o entendimento das interações entre as moléculas de água e os constituintes do produto (Ghodake et al., 2007), relacionando-se diretamente com os processos de secagem e armazenagem (Corrêa et al., 2010a). Com altos teores de água, o risco de aparecimento de fungos e insetos torna-se maior, comprometendo seriamente o poder germinativo e o vigor das sementes, deteriorando a qualidade dos frutos e grãos armazenados e aumentando as perdas pós-colheita. Por outro lado, a redução do teor de água promove perdas econômicas devido à perda de massa do produto (Yazdani et al., 2006), porém diminui a atividade biológica do produto e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento.

Vários autores buscam determinar comportamento das propriedades dos produtos agrícolas em diferentes teores de água, e no geral relatam alterações diretas com a umidade (Aviara et al., 2013; Sharanagat e Goswami, 2014; Izli, 2015; Gely e Pagano, 2017). No entanto, alguns produtos agrícolas possuem características particulares durante a secagem, por exemplo, aqueles que apresentam parte ou todo o tegumento enrijecido, como o fruto de café (Botelho et al., 2016) e arroz em casca (Zareiforush et al., 2009), nos quais algumas propriedades seguem uma tendência diferente da observada para maioria dos outros produtos. Dessa maneira, a determinação das propriedades físicas em função do teor de água de cada produto torna-se particularmente importante.

3.2.2 Tamanho e forma

Projetos de máquinas e de equipamentos destinados à pós-colheita de produtos agrícolas requerem dados relativos às suas propriedades físicas, das quais se destacam as propriedades geométricas (Goneli et al., 2011). O conhecimento das relações entre estas propriedades e os fatores de deterioração, podem auxiliar na solução de problemas relacionados a transferência de calor e massa durante as etapas de secagem e na aeração, no projeto e dimensionamento de equipamentos transportadores, de limpeza e separação, no emprego de técnicas adotadas no armazenamento e construção de silos e outros dispositivos de acondicionamento (Araujo et al., 2018)

Os grãos e frutos, de modo geral, não apresentam um formato geométrico perfeitamente definido. Dessa maneira torna-se necessário, para a solução de problemas relacionados à sua geometria, assumir para o produto uma forma conhecida, o que acarreta em aproximações e possíveis erros (Corrêa et al., 2002). Agrawal et al. (1973) observaram que, para maioria dos produtos agrícolas, muitas dessas soluções são obtidas assumindo-se, as formas geométricas de um esferoide ou elipsoide composto por três dimensões características, que são os eixos maior, médio e menor.

Diversos produtos agrícolas utilizam as propriedades de tamanho e forma como parâmetro de qualidade. Para o café, essas propriedades estão diretamente relacionadas a qualidade e ao preço final dos grãos. Os grãos de café são classificados por peneiras com base no seu tamanho e forma, sendo as peneiras de crivos redondos para medição e separação do café chato e as de crivo alongado para separação do café moca (Laviola et al., 2006). Grãos pequenos da mesma variedade são comumente vendidos por preços mais baixos. No entanto, grãos maiores não têm necessariamente um gosto melhor.

Idealmente, a torrefação deve ser processada com grãos uniformes (Cheng et al., 2016). Quando a torrefação do café ocorre com grãos de tamanhos diferentes, os maiores tendem a atingir a torra desejada enquanto os menores tendem a queimar ou passar do ponto de torra pré-definido, o que afeta tanto a aparência visual dos grãos quanto a qualidade de xícara (Muschler, 2001). Os grãos de café arábica são em geral maiores do que os grãos de café robusta, dessa maneira a mistura destes durante a torra causa uma não uniformidade do processo. O tamanho dos grãos de café também é influenciado pelo ambiente e local onde são produzidos (Dessalegn et al., 2008).

3.2.3 Contração volumétrica

Segundo Goneli et al. (2011), uma das mais importantes mudanças físicas que ocorrem nos produtos agrícolas durante a secagem é a redução do seu volume. Brooker et al. (1992) indicaram que uma das principais fontes de erros no desenvolvimento de modelos matemáticos para simular o processo de secagem de materiais biológicos, é a desconsideração do fenômeno de alteração volumétrica do produto. Dessa forma, as informações concernentes a redução do volume dos produtos agrícolas durante a secagem, são consideradas importantes para estudos envolvendo transferência de calor e massa, desenvolvimento de modelos matemáticos, estudos de movimentação de ar em massas granulares, separação e classificação (Sologubik et al., 2013, Araujo et al., 2018).

Juntamente com o teor de água, a massa específica e o volume são parâmetros utilizados para determinar as condições de secagem e armazenagem de produtos agrícolas e, conseqüentemente, possibilitar a predição de perdas de qualidade do material até o momento de sua comercialização (Afonso Júnior et al., 2003). De acordo com Ramos et al. (2003), como consequência da redução do teor de água, o processo de secagem origina uma redução no tamanho do tecido celular dos materiais vegetais, fenômeno usualmente definido como contração volumétrica (Krokida e Maroulis, 1997).

As variações volumétricas, causadas pela desidratação, são relatadas como as principais causas das alterações das propriedades físicas dos produtos agrícolas (Ratti, 1994; Sokhansanj e Lang, 1996). Segundo Ramos et al. (2005), as modificações no produto referente à sua contração volumétrica devem ser incluídas nos modelos matemáticos para uma completa descrição, precisão e análise do fenômeno de secagem.

As bases teóricas para o conhecimento do processo de contração volumétrica envolvem complexas leis mecânicas e de deformação de materiais (Towner, 1987). No entanto, vários trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando aproximações e modelos empíricos na tentativa de melhor representar esse complicado fenômeno em produtos de natureza biológica, como marmelo (Koç et al., 2008), cereja (Ochoa et al., 2007), trigo (Corrêa et al., 2006), feijão (Resende et al., 2007), soja (Ribeiro et al., 2005), mamona (Goneli et al., 2011), entre outros.

Khraisheh et al. (2004) observaram que a contração volumétrica da maioria dos produtos agrícolas durante a secagem ocorre de maneira heterogênea. No início da secagem, aparentemente, o produto permanece com a estrutura intacta e mantém sua forma original. Entretanto, com a retirada de água, acontece o seu encolhimento que é acompanhado da

deformação das partículas, formação de poros e demais mudanças microestruturais (Koç et al., 2008).

3.2.4 Massa específica real ou unitária

O conhecimento da massa específica unitária de produtos agrícolas é imprescindível para processos de separação de materiais. Enquanto as diferenças de tamanho e forma possibilitam a separação por peneiras, a massa específica unitária possibilita a separação por ventilação (Khodabakhshian et al., 2018). A diferença na massa específica unitária também é o princípio em que se baseia a separação em mesas densimétricas. Nesse tipo de maquinário os grãos leves, mal granados, chochos, quebrados e brocados, são separados dos grãos sadios, favorecendo a homogeneidade e qualidade final do produto (Santos Neto et al., 2012).

Mohsenin (1986) reporta que a massa específica unitária é considerada um parâmetro fundamental para cálculos de difusividade térmica dos produtos agrícolas, além de cálculos de maquinários pneumáticos para manusear os produtos. O mesmo autor afirma que este conhecimento ajuda na predição da estrutura física e na composição química dos produtos agrícolas. Trabalhos ao longo dos anos (Singh et al., 1997; Mendonça et al., 2009; Corrêa et al., 2010b; Torres et al., 2012) vincularam a necessidade do conhecimento da massa específica real para os processos de secagem e armazenagem, projetos de silos e equipamentos pós-colheita, além de afetar a estabilidade e ser indicador da maturação de produtos agrícolas.

A massa específica unitária é também um dos mais importantes parâmetros físicos relacionados à qualidade dos grãos e sementes. Mendonça et al. (2009) relataram que sementes com maior massa específica são aquelas que foram melhores nutridas durante o desenvolvimento. Com isso, sementes com maior massa específica, são as que possuem, normalmente, embriões mais bem formados e maiores reservas, sendo potencialmente mais vigorosas, refletindo em melhores valores no momento da comercialização. Illy e Viani (1995) realizam um trabalho da influência dessa propriedade na qualidade de bebida de café, e verificaram que grãos de café com maior massa específica, alcançaram maior nota na análise sensorial e dessa maneira foram melhor classificados.

3.2.5 Coeficiente de atrito estático

O coeficiente de atrito estático é determinado pela força capaz de vencer a inércia ao movimento (Razavi et al., 2007). Este limita o ângulo máximo de inclinação de transportadores e de demais acessórios do sistema de armazenamento. A quantidade de energia necessária no processo de transporte depende fundamentalmente da magnitude da força de atrito exercida pelo produto (Sirisomboon et al., 2007). Assim, a determinação correta do valor do coeficiente de atrito torna-se imprescindível para o cálculo seguro das pressões nas paredes de silos e movimentação de produto no processo de carga e descarga por gravidade (Silva et al., 2011).

Shafaei e Kamgar (2017) relatam que o coeficiente de atrito estático de frutos e grãos varia de acordo com o material de contato, devido as diferentes rugosidades de cada tipo de superfície. Portanto, a determinação exata desse coeficiente em diferentes superfícies de contato pode ser útil na otimização do desempenho de equipamentos mecânicos (transportadores, separação, limpeza, secagem e armazenamento) e, conseqüentemente, redução de danos e aumento de eficiência (Mansouri et al., 2017).

Vários autores ao longo dos anos buscam compreender as variações do coeficiente de atrito estático em função do material no qual está em contato, por exemplo, sementes de prosopis africana (Akaaimo e Raji, 2006), sementes de algodão (Manimehalai e Viswanathan, 2006), avelã (Kibar e Öztürk, 2009), milho (Singh et al., 2010), café moído (Oliveira et al., 2014), entre outros. Contudo, os estudos dessa propriedade em função do teor de água e do material para grãos e frutos de café são escassos.

3.3 Propriedades aerodinâmicas dos produtos agrícolas

O comportamento das partículas em um escoamento de ar durante o transporte e separação pneumáticos depende muito de suas propriedades aerodinâmicas, que estão fortemente ligadas à suas propriedades físicas. As forças aerodinâmicas que existem durante o movimento relativo entre o ar e os materiais atuam de maneira distinta em diferentes partículas (Kara et al., 2012; Shahbazi, 2015). Desse modo, as informações acerca das propriedades aerodinâmicas são amplamente utilizadas no transporte e separação de produtos indesejáveis, como impurezas e materiais de qualidade inferior, principalmente nas operações de colheita, seleção, limpeza, secagem, armazenamento, beneficiamento e classificação de produtos agrícolas (Marathe et al., 2017). Dessa maneira, essas informações

podem ser empregadas no aprimoramento das operações relacionadas com o manuseio e as várias etapas do pré-processamento do produto (Shahbazi et al., 2014).

Diversos autores especificam que as propriedades aerodinâmicas de produtos agrícolas são diretamente afetadas por suas características, como espécie, variedade, maturação, tamanho e forma, massa específica real, dentre outras (Mohsenin, 1986; Matouk et al., 2008; Khodabakhshian et al., 2012; Shahbazi et al., 2014). Além disso, muitos pesquisadores relatam um aumento da velocidade terminal de produtos agrícolas com o aumento do teor de água, como feijão guandu (Sherpherd e Bhardwaj, 1986), soja (Deshpande et al., 1993), semente de lentilha (Carman, 1996), avelã (Aydin, 2002), arroz e milho (Matouk et al., 2008), sementes de trigo (Shahbazi et al., 2014), entre outros.

A determinação da velocidade terminal pode ser realizada teoricamente, baseando-se em expressões que relacionam o coeficiente de arrasto (C_d) e o número de Reynolds (Re), e tem sido extensivamente investigada por vários pesquisadores, como Christiansen e Barker (1965), Hartman et al. (1994), Chhabra et al. (1999), Brown e Lawler (2003), Tang et al. (2004), Tran-Cong (2004), Cheng (2009) e Andalib et al. (2010). No entanto, o método de obtenção desses parâmetros requer um procedimento de tentativa e erro, uma vez que a velocidade terminal está presente nas duas variáveis e a relação entre C_d e Re é não linear (Couto et al., 2004). Além disso, a maioria dos modelos semi-empíricos desenvolvidos para prever as forças de arrasto em corpos submersos em um fluido consideram as partículas como perfeitos esferoides. Dessa maneira o estudo particular de cada produto torna-se de extrema relevância para validação de algum desses modelos, uma vez que nem todos os produtos agrícolas apresentam este formato (Chhabra et al., 1999).

Talvez Haider e Levenspiel (1989) tenham sido os primeiros pesquisadores a despertar o interesse no desenvolvimento de expressões para coeficiente de arrasto universalmente aplicáveis e de fácil aplicação para partículas esféricas e não esféricas. Os autores modelaram matematicamente a variação do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds e da esfericidade do objeto. Durante seus estudos experimentais, os autores obtiveram coeficientes de arrasto para materiais com esfericidade variando de 67 a 100% (esfera). Não foram encontrados na literatura trabalhos que utilizem os modelos propostos por esses autores para produtos agrícolas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – Minas Gerais (MG). Os experimentos foram conduzidos conforme o fluxograma apresentado na Figura 2.

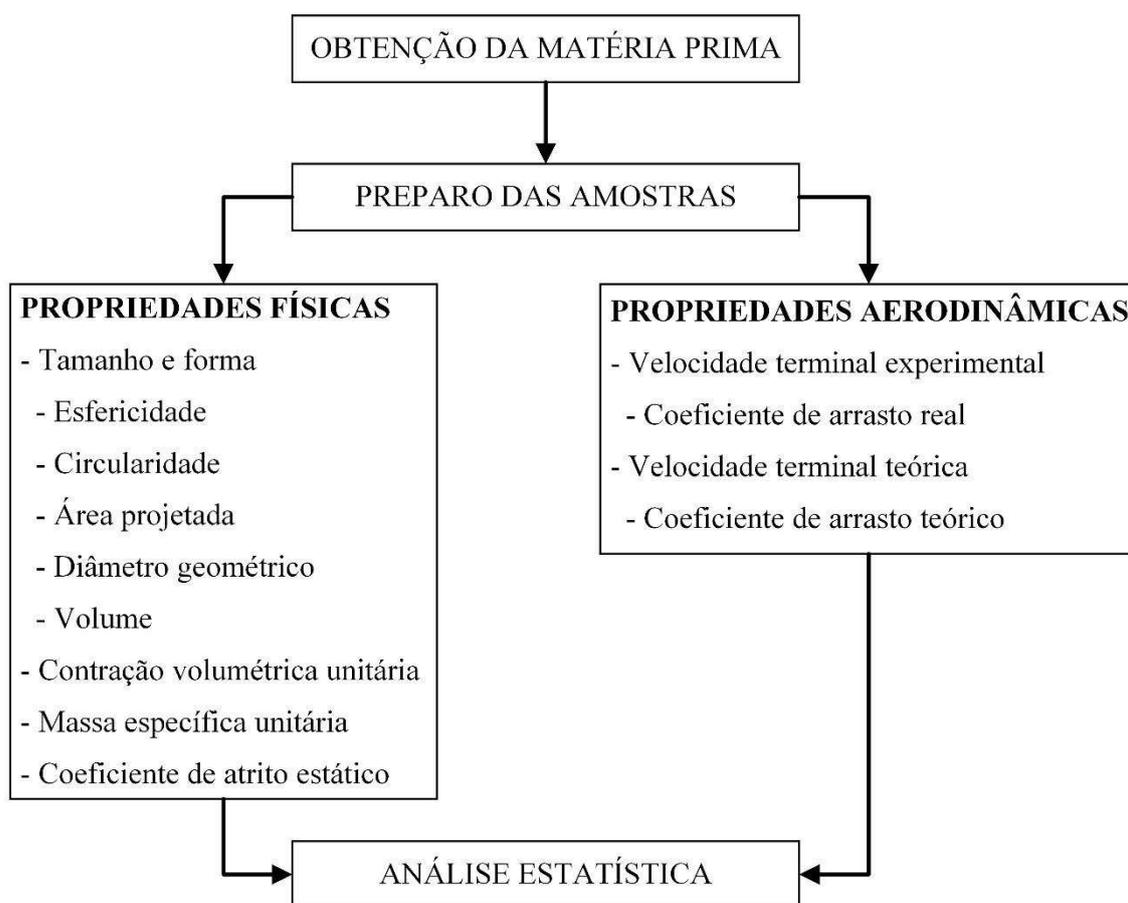


Figura 2 – Fluxograma de condução do experimento.

4.1 Obtenção da matéria-prima

Para realização desse estudo, foram utilizados frutos e grãos de café (*Coffea arabica*) da cultivar Oeiras (MG-6851) (Figura 3), procedentes do Sítio Pedra Redonda, localizado em Araponga – Minas Gerais. Os frutos foram colhidos manualmente e selecionados apenas no estágio cereja.



Figura 3 – Cafeeiro (*Coffea arabica*) cultivar Oeiras (MG-6851).

Os frutos foram submetidos a uma triagem onde foram eliminados todo e qualquer fruto imaturo, deteriorado ou danificado, com o intuito de se obter um material homogêneo. Após a triagem e homogeneização dos frutos, estes foram divididos em dois lotes. Um dos lotes foi utilizado para compor as amostras de frutos cereja intactos (Figura 4A), e o outro para compor as amostras de frutos cereja descascados (Figura 4B).



Figura 4 – Lotes de café (*Coffea arabica*): cereja intacto (A) e cereja descascado (B) utilizados para compor as amostras experimentais.

4.2 Preparo das amostras

Posteriormente à separação das amostras em frutos (café cereja intacto) e grãos (café cereja descascado), estas foram submetidas ao processo de secagem em estufa com circulação forçada de ar (GEHAKA 400-3ND) à 45 ± 2 °C, até diferentes níveis de teores de água. O acompanhamento da redução do teor de água foi feito pelo método gravimétrico (perda de massa), conhecendo-se o teor de água inicial do produto. Para este monitoramento foi utilizada uma balança analítica com precisão de 0,0001g (Marte® AY220).

Os teores de água das amostras foram determinados pelo método padrão da estufa, à 105 ± 2 °C, por 24 horas, em quatro repetições (BRASIL, 2009). Durante a secagem, para cada teor de água obtido, as amostras foram homogeneizadas e caracterizadas pela determinação de suas propriedades físicas e aerodinâmicas, sempre em quatro repetições.

4.3 Propriedades físicas dos frutos e grãos de café durante a secagem

4.3.1 Tamanho e forma

O tamanho e a forma dos frutos de café, considerados esferoides triaxiais (Figura 5A), e dos grãos de café considerados semi-elipsóides (Figura 5B), foram analisados pela esfericidade, circularidade, área projetada, volume e diâmetro geométrico a partir das medidas das dimensões características (eixos ortogonais), em quatro repetições, obtidas por meio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm (Mitutoyo 500-174B).

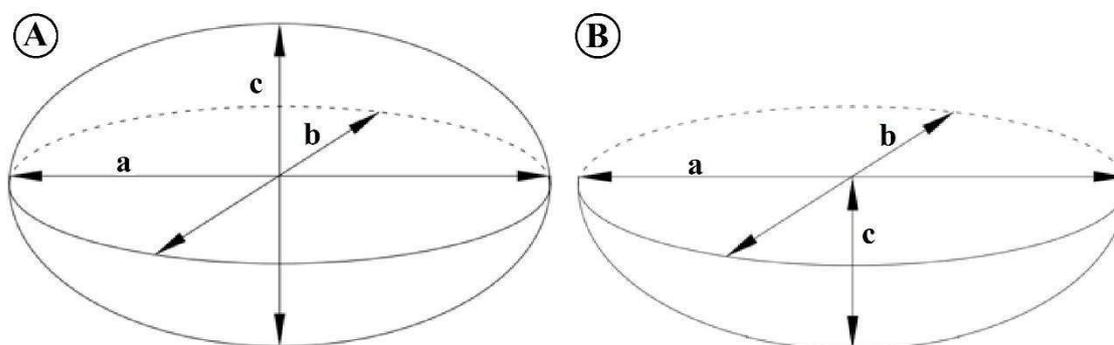


Figura 5 – Representação esquemática dos eixos ortogonais dos frutos (A) e grãos (B) de café, em que: a, b e c são a maior, a intermediária e a menor dimensão característica do produto, respectivamente.

Após a determinação das dimensões características, o volume (V), a esfericidade (E), a circularidade (C), a área projetada (A_p) e o diâmetro geométrico (D_g) dos frutos e grãos de café durante o processo de secagem foram determinados conforme proposto por Mohsenin (1986), de acordo com as Equações 3, 4, 5, 6 e 7 respectivamente.

$$V = \frac{\pi abc}{6} \quad (3)$$

$$E = \left[\frac{(abc)^{1/3}}{a} \right] 100 \quad (4)$$

$$C = \left[\frac{b}{a} \right] 100 \quad (5)$$

$$A_p = \frac{\pi ab}{4} \quad (6)$$

$$D_g = (abc)^{1/3} \quad (7)$$

4.3.2 Massa específica unitária ou real

A massa específica real ou unitária dos frutos e dos grãos de café durante a secagem foi determinada utilizando a metodologia de complementação de volume, proposta por Moreira et al. (1985) e descrita na norma ASTM D 792 (1991), utilizando óleo de girassol como fluido. Como esta metodologia foi desenvolvida para grãos de pequenas dimensões, algumas adaptações foram realizadas quando ao tamanho do recipiente sugerido. Para determinação dessa propriedade, foram utilizados picnômetros de vidro com capacidade de 25 mL (Figura 6).



Figura 6 – Determinação da massa específica unitária do frutos e grãos de café em picnômetro.

A massa específica é definida como a razão entre a massa e o volume ocupado por determinado produto. Esse conceito aplicado à massa e ao volume de apenas um grão determina a massa específica real ou unitária, que foi obtida por meio da equação 8.

$$\rho_u = \frac{m}{V} \quad (8)$$

Em que,

ρ_u – Massa específica real ou unitária, kg m⁻³;

m – Massa, kg; e

V – Volume, m⁻³.

4.3.3 Índice de contração volumétrica unitária

O índice de contração volumétrica (Ψ) dos frutos e grãos de café durante a secagem foi determinado pela relação entre o volume para cada teor de água (V) e o volume inicial (V_0), conforme a Equação 9.

$$\Psi = \frac{V}{V_0} \quad (9)$$

Os dados experimentais do índice de contração volumétrica unitária foram ajustados aos modelos matemáticos utilizados para produtos agrícolas apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Modelos utilizados para simular o índice de contração volumétrica de produtos agrícolas.

Referência	Modelo	Equações
Bala e Woods (1984) adaptado	$\Psi = 1 - \beta_0 \{1 - \exp[-\beta_1(U_0 - U)]\}$	(10)
Corrêa et al. (2004)	$\Psi = \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 \exp(U)}$	(11)
Rahman (1995)	$\Psi = 1 + \beta_0(U - U_0)$	(12)
Linear	$\Psi = \beta_0 + \beta_1 U$	(13)
Exponencial	$\Psi = \beta_0 \exp(\beta_1 U)$	(14)
Polinomial de segundo grau	$\Psi = \beta_0 + \beta_1 U + \beta_2 U^2$	(15)

Em que,

- U – Teor de água, decimal b.s.;
- U₀ – Teor de água inicial, decimal b.s.; e
- β₀, β₁, β₂ – Coeficientes que dependem do produto.

4.3.3.1 Análise estatística

Para o ajuste dos modelos matemáticos, realizou-se a análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 8.0®. Os modelos foram selecionados considerando a significância dos coeficientes de regressão pelo teste t, adotando níveis de 1 e 5% de probabilidade, a magnitude do coeficiente de determinação (R²), a magnitude do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE), além da verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. Considerou-se o valor do erro médio relativo inferior a 10% como um dos critérios para seleção dos modelos, de acordo com Mohapatra e Rao (2005). O erro médio relativo e o desvio padrão da estimativa foram calculados pelas Equações 16 e 17, respectivamente.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i} \quad (16)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{GLR}} \quad (17)$$

Em que,

- Y_i – Valor observado;
- Ŷ_i – Valor estimado;
- n – Número de dados observados; e
- GLR – Graus de liberdade do resíduo.

Os resíduos, que são a diferença entre os valores observados experimentalmente pelos valores estimados pelos modelos, foram representados em gráficos em função dos valores estimados para cada um dos modelos. Um modelo é considerado aceitável se os valores dos resíduos se encontrarem distribuídos de forma aleatória próximos à faixa horizontal em torno de zero, indicando que os resultados não são tendenciosos. Se as

distribuições dos resíduos formam figuras geométricas ou tendem a se acumular em um ponto fora do eixo, a distribuição dos seus resíduos é considerada como tendenciosa e o modelo inadequado para representar o fenômeno em questão (Goneli et al., 2011).

4.3.4 Coeficiente de atrito estático

A determinação do coeficiente de atrito estático dos frutos e grãos de café durante a secagem foi realizada para materiais de diferentes rugosidades. Foi utilizado um equipamento de plano inclinado (Figura 7), com movimento de rotação, que fornece o ângulo no qual o produto consegue vencer a inércia e começa a se movimentar.



Figura 7 – Plano inclinado com movimento de translação utilizado para determinação do coeficiente de atrito estático.

Para medir o ângulo necessário para que o produto vença a inércia numa determinada amostra de material, na base do equipamento foram afixadas placas retangulares (100×150 mm) dos diferentes materiais, aço liso, aço rugoso, polietileno, acrílico e ferro. Após a fixação das placas, os frutos e grãos foram dispostos unitariamente sobre as mesmas, e o plano inclinado foi levemente suspenso até que o produto começasse a se movimentar. Como o plano inclinado forma um triângulo retângulo, onde a medida da base é conhecida, com o auxílio de um paquímetro digital (resolução de 0,01 mm), mediu-se a altura da face superior do equipamento. De posse dessas informações, o ângulo de atrito externo (θ_w) e o coeficiente de atrito estático (μ_w) foram obtidos por trigonometria, de acordo com as Equações 18 e 19 respectivamente.

$$\theta_w = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Cateto oposto}}{\text{Cateto adjacente}} \right) \quad (18)$$

$$\mu_w = \tan \theta_w \quad (19)$$

A caracterização dos materiais, foi representada pela rugosidade média (Ra) da superfície de cada placa, que foi obtida com a utilização de um rugosímetro portátil (Mitutoyo SJ-201) em dez repetições, sendo esta rugosidade medida na mesma direção do deslocamento dos grãos. A utilização da rugosidade média deve-se ao fato de ser o parâmetro de medição mais utilizado e aceito em todo mundo para representar a rugosidade de superfícies.

4.3.4.1 Análise estatística

Os dados foram analisados por meio da análise de variância e regressão empregando-se os softwares de análise estatística STATISTICA 8.0® e SAEG 9.1. Para o fator qualitativo (material das placas), as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo (teor de água), os modelos de regressão foram escolhidos com base na magnitude e significância do coeficiente de determinação, na significância dos coeficientes de regressão e na verificação do ajuste do modelo estatístico aos dados experimentais.

4.4 Propriedades aerodinâmicas dos frutos e grãos de café durante a secagem

4.4.1 Velocidade terminal experimental

Para determinação da velocidade terminal, foi utilizado um secador de bandejas cilíndricas teladas (GrainMan 6623) (Figura 8), dotado de um ventilador centrifugo. O secador possui em sua lateral duas válvulas que permitem controlar o fluxo de ar nas bandejas. Os frutos e grãos foram dispostos unitariamente sobre as bandejas (zona de flutuação), e posteriormente foram submetidos à um fluxo de ar crescente, controlado pelas válvulas do equipamento, até que os mesmos comessem a flutuar. Para aferição da velocidade terminal (Figura 9), foi utilizado um termo-anemômetro digital de fio quente com precisão de $0,1 \text{ m s}^{-1}$ (Instrutherm TARF-180). Foram realizadas quatro leituras da velocidade terminal em diferentes pontos da bandeja para obtenção da velocidade terminal média.



Figura 8 – Equipamento utilizado para obtenção da velocidade terminal experimental.



Figura 9 – Aferição da velocidade terminal com termo-anemômetro digital de fio quente.

4.4.2 Coeficiente de arrasto real

Uma partícula em queda livre, em uma corrente de ar ascendente está sujeita a três tipos de forças (Figura 10): a força peso (\vec{F}_g), a força de empuxo (\vec{E}) e a força de arrasto (\vec{F}_r). No instante em que essas grandezas vetoriais se equilibram, a partícula passa a mover-se a uma velocidade constante (velocidade terminal).

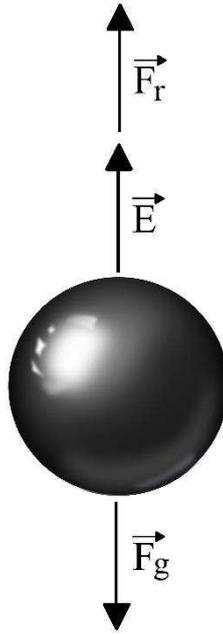


Figura 10 – Forças atuantes sobre uma partícula em queda livre em corrente de ar ascendente.

Quando o equilíbrio das forças ocorre, pode-se escrever:

$$\vec{F}_r = \vec{F}_g - \vec{E}$$

Ou seja,

$$\frac{1}{2} C_d \rho_f A_p V_t^2 = mg \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p}$$

Dessa forma isolando o coeficiente de arrasto (C_d), obtém-se a Equação 20, que é mostrada como meio seguro de determinação do coeficiente de arrasto por diversos autores, quando a velocidade terminal é conhecida (Mohsenin, 1986; Matouk et al., 2008; Khodabakhshian et al., 2012; Shahbazi et al., 2014). Apesar de desprezível, para este caso, a massa específica do ar não foi desconsiderada neste estudo.

$$C_d = \frac{2mg(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p \rho_f A_p V_t^2} \quad (20)$$

Em que,

- C_d – Coeficiente de arrasto, adimensional;
- m – Massa do produto, kg;
- g – Aceleração da gravidade, $m\ s^{-2}$;
- ρ_p – Massa específica unitária ou real do produto; $kg\ m^{-3}$;
- ρ_f – Massa específica do fluido, $kg\ m^{-3}$;
- A_p – Área projetada da partícula, m^2 ; e
- V_t – Velocidade terminal, $m\ s^{-1}$.

4.4.3 Coeficiente de arrasto teórico

Como o coeficiente de arrasto (Equação 20), depende tanto da velocidade, quanto do número de Reynolds, este foi obtido recorrendo-se ao método de ajuste por tentativa e erro, conforme Haider e Levenspiel (1989). Esses autores obtiveram experimentalmente o coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds e da esfericidade do produto, e propuseram o modelo representado pela Equação 21.

$$C_d = \frac{24}{Re}(1 + ARe^B) + \frac{C}{1 + \frac{D}{Re}} \quad (21)$$

O número de Reynolds (Re) e os parâmetros A, B, C e D obtidos em função da esfericidade do produto foram calculados seguindo a metodologia proposta pelos autores por meio das Equações 22, 23, 24, 25 e 26 respectivamente.

$$Re = \frac{D_g \rho_f V_t}{\mu} \quad (22)$$

$$A = \exp(2,3288 - 6,4581 \phi + 2,4486 \phi^2) \quad (23)$$

$$B = 0,0964 + 0,5565 \phi \quad (24)$$

$$C = \exp(4,9050 - 13,8944 \phi + 18,4222 \phi^2 - 10,2599 \phi^3) \quad (25)$$

$$D = \exp(1,4681 + 12,2584 \phi - 20,7322 \phi^2 + 15,8855 \phi^3) \quad (26)$$

Em que,

D_g – Diâmetro geométrico da partícula, m;

ρ_f – massa específica do fluido, kg m^{-3} ;

V_t – Velocidade terminal, m s^{-1} ;

μ – Viscosidade dinâmica do fluido, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$;e

ϕ – Esfericidade do produto, decimal.

4.4.4 Velocidade terminal teórica

A partir dos valores de coeficiente de arrasto teórico para cada teor de água, foi realizada a estimativa da velocidade terminal (V_t) utilizando-se a Equação 27, obtida a partir da Equação 20, apresentada por Mohsenin (1986).

$$V_t = \sqrt{\frac{2mg(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p \rho_f A_p C_d}} \quad (27)$$

Dessa maneira, a determinação da velocidade terminal teórica foi efetuada conforme o algoritmo apresentado na Figura 11.

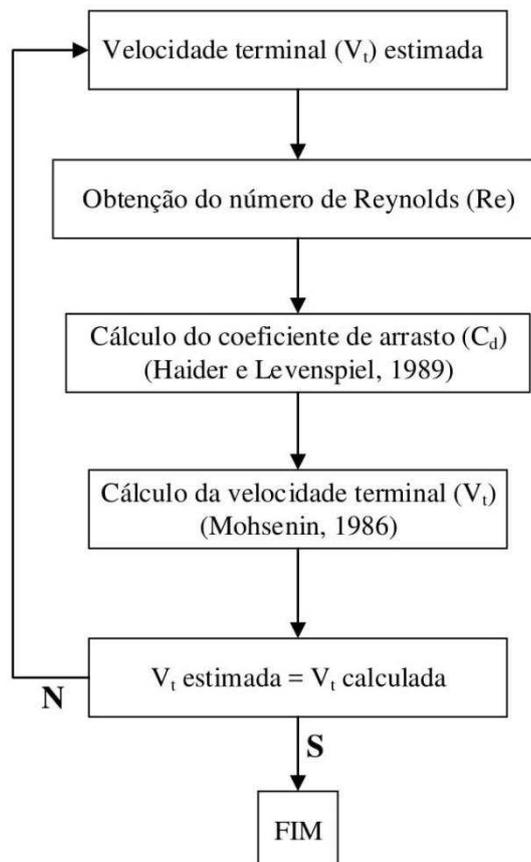


Figura 11 – Algoritmo para obtenção da velocidade terminal e coeficiente de arrasto teóricos.

4.5 Análise estatística dos dados

As análises de variância e regressão foram realizadas empregando-se os softwares de análise estatística STATISTICA 8.0®, SAEG 9.1, Sisvar 5.6 e Sigmaplot 11.0. Foram estimados os valores dos parâmetros dos modelos em função do teor de água. O grau de ajuste dos modelos aos dados experimentais foi baseado na magnitude e significância do coeficiente de determinação, na significância dos coeficientes de regressão e na verificação do ajuste do modelo estatístico aos dados experimentais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades físicas dos frutos de café durante a secagem

5.1.1 Massa específica unitária, tamanho e forma

Na Figura 12, são apresentados os valores experimentais e estimados da massa específica unitária dos frutos de café para os diferentes teores de água. Verifica-se uma redução não linear da massa específica unitária durante o processo de secagem. Os valores experimentais variaram de 1056 a 737 kg m⁻³ para o teor de água variando entre 1,77 e 0,09 (decimal, b.s.).

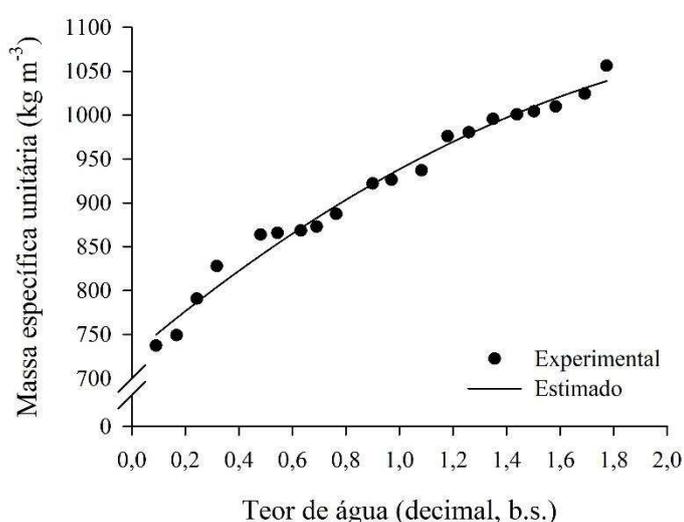


Figura 12 – Valores observados e estimados, da massa específica unitária dos frutos de café durante a secagem.

Apesar de apresentar tendência contrária da maioria dos produtos, esses resultados estão de acordo com os encontrados para alguns produtos agrícolas, como aqueles que tem parte ou todo tegumento enrijecido, como arroz em casca (Zareifourosch et al., 2009), girassol (Figueiredo et al., 2011) e frutos de amendoim (Araujo et al., 2015). Esse fato provavelmente está associado a uma perda mais significativa de massa do que de volume durante a secagem.

O comportamento da esfericidade dos frutos de café durante a secagem pode ser observado na Figura 13. Observa-se um decréscimo não linear com a redução do teor de água. Este fato pode ser resultado de uma maior redução das dimensões características, menor (c) e intermediária (b), em comparação com a maior dimensão (a) durante a secagem. A esfericidade dos frutos variou entre 81 e 72%. Esses resultados corroboram com os comumente apresentados para frutos de café (Botelho et al., 2016).

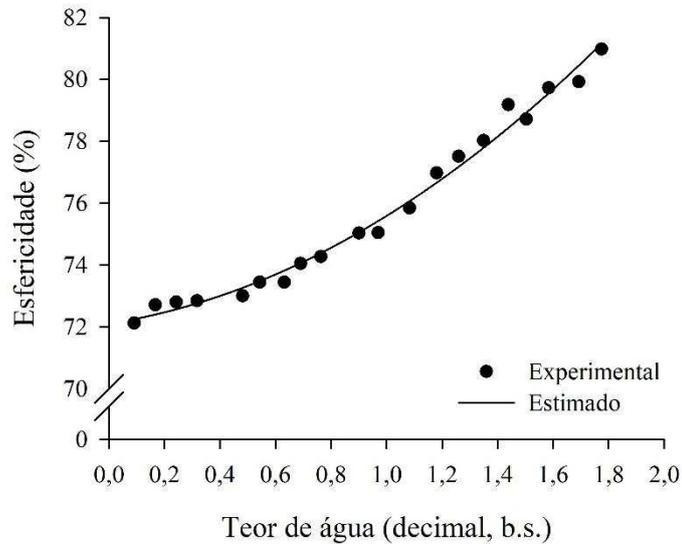


Figura 13 – Valores observados e estimados, da esfericidade dos frutos de café durante a secagem.

Na Figura 14, podem ser observados os valores experimentais e estimados da circularidade dos frutos de café em função do teor de água. Verifica-se que semelhantemente a esfericidade, essa característica apresentou uma redução não linear durante a secagem. Os valores de circularidade encontram-se na faixa de 76 a 66% para o maior e menor teor de água avaliados, respectivamente. Este resultado reafirma que a dimensão característica intermediária sofreu maior redução em comparação com a maior dimensão. O decréscimo não linear dessa propriedade durante a secagem foi observado por Corrêa et al. (2002) para diferentes variedades de café.

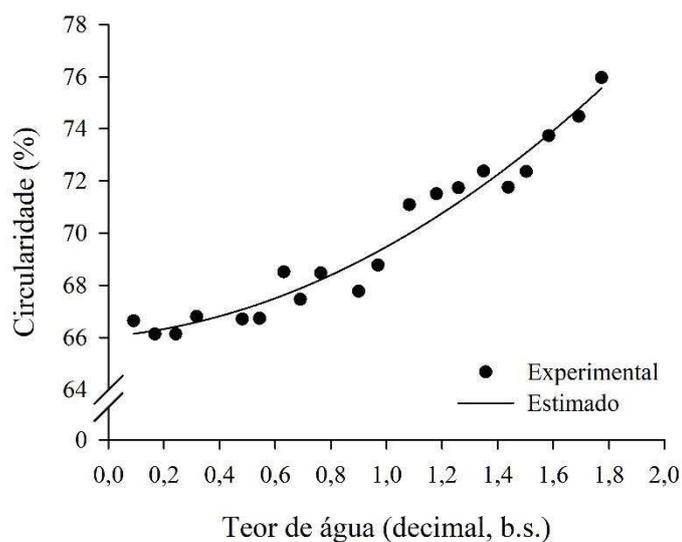


Figura 14 – Valores observados e estimados, da circularidade dos frutos de café durante a secagem.

A variação da área projetada dos frutos de café durante a secagem pode ser observada na Figura 15. Uma redução da área projetada era esperada devido as variações volumétricas dos materiais biológicos durante a secagem (Azmir et al., 2019). Nota-se uma redução não linear com a redução do teor de água. Os valores encontrados variaram entre 203 e 159 mm². A queda acentuada da área projetada no início da secagem, demonstra uma rápida redução das dimensões características dos frutos de café neste período. Os resultados encontrados vão ao encontro dos apresentados por Afonso Júnior et al. (2007) para os frutos de café da variedade Catuaí.

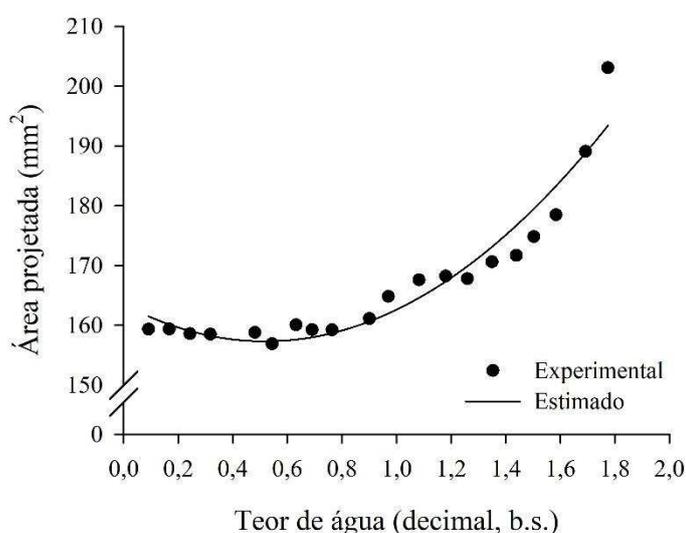


Figura 15 – Valores observados e estimados, da área projetada dos frutos de café durante a secagem.

Na Figura 16, são apresentados os valores do diâmetro geométrico dos frutos de café para diferentes teores de água. Observa-se que durante a secagem, o diâmetro geométrico apresentou uma redução de aproximadamente 15% em relação ao inicial, com valores variando de 14,9 a 12,7 mm. Essa redução está intimamente relacionada à redução das dimensões características e, conseqüentemente, do volume dos frutos durante a secagem. Esse resultado está em consonância com os apresentados na literatura para diversos produtos agrícolas (Baumler et al., 2006; Figueiredo et al., 2011; Zielinska et al., 2012; Mansouri et al., 2017).

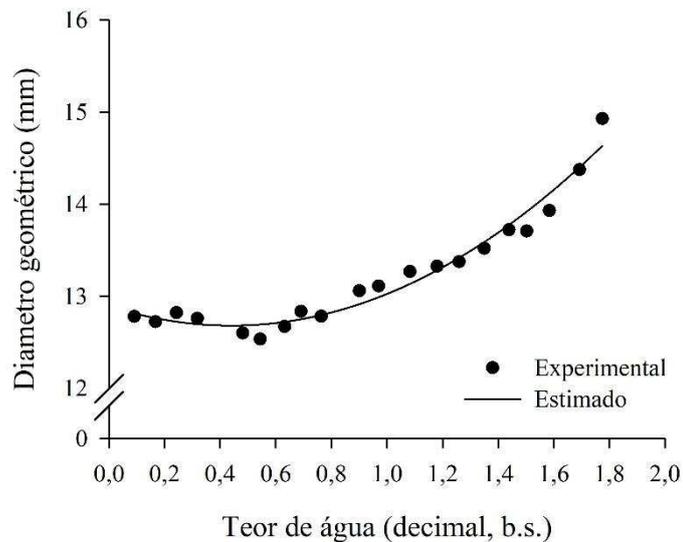


Figura 16 – Valores observados e estimados, do diâmetro geométrico dos frutos de café durante a secagem.

Os valores experimentais e estimados do volume dos frutos de café durante a secagem podem ser observados na Figura 17. Uma redução não linear com o decréscimo do teor de água pode ser verificada. O volume dos frutos variou de 1748 a 1092 mm³ dentro da faixa analisada de teor de água. Nota-se que no início da secagem a redução do volume é mais significativa, e que essa redução tende a se estabilizar nos menores teores de água. Resultado semelhante é reportado por Oliveira et al. (2011) para frutos de café da variedade Catuaí vermelho. Segundo os autores, a redução do volume do produto durante a secagem é conhecida como shrinkage, e ocorre quando a matriz visco-elástica se contrai no espaço anteriormente ocupado pela água removida das células. Dessa maneira, a grande redução do volume dos frutos de café pode ser explicada pelos altos valores de teor de água inicial.

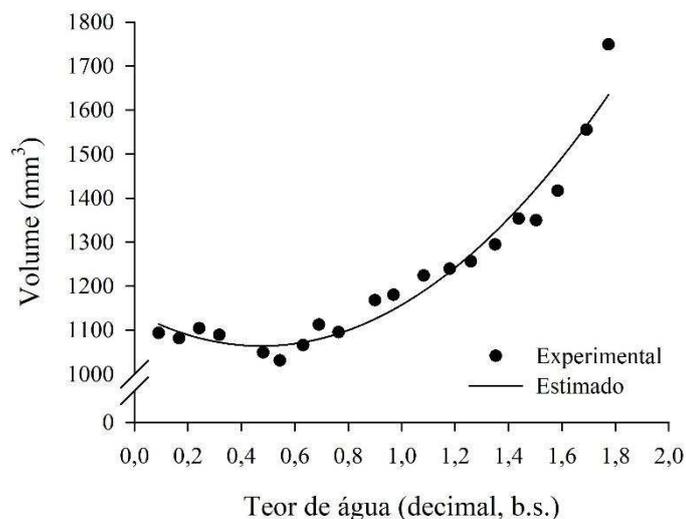


Figura 17 – Valores observados e estimados, do volume dos frutos de café durante a secagem.

Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes dos modelos de regressão não linear de melhor ajuste para, massa específica unitária, esfericidade, circularidade, área projetada, diâmetro geométrico e volume dos frutos de café em função do teor de água. Para estes, o modelo polinomial de segundo grau (Equação 15) apresentou o melhor ajuste. Nota-se que todos os ajustes apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação e, portanto, representam de forma satisfatória os fenômenos estudados.

Tabela 3 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados para as propriedades físicas dos frutos de café.

Propriedade Física	β_0	β_1	β_2	R^2
Massa específica unitária	726,7817	257,4577 ⁺⁺	-46,0299 ⁺⁺	0,9823 ^{**}
Esfericidade	72,1103	1,3850 ⁺	2,0948 ⁺⁺	0,9884 ^{**}
Circularidade	66,0352	0,9551 ⁺	2,4866 ⁺⁺	0,9538 ^{**}
Área projetada	163,4789	-23,7397 ⁺⁺	22,8892 ⁺⁺	0,9215 ^{**}
Diâmetro geométrico	12,8937	-0,9641 ⁺⁺	1,0960 ⁺⁺	0,9877 ^{**}
Volume	1139,8187	-320,4116 ⁺⁺	337,8506 ⁺⁺	0,9512 ^{**}

⁺⁺ Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ⁺ Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t;

^{**} Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

5.1.2 Contração volumétrica unitária

Na Tabela 4, são apresentados os valores dos coeficientes de determinação (R^2), erro médio relativo (P), erro padrão da estimativa (SE) e a tendência da distribuição dos resíduos para os modelos utilizados para avaliar a contração volumétrica unitária dos frutos de café durante a secagem. Além disso são informados os valores dos parâmetros β_0 , β_1 , β_2 referentes a cada modelo, quando aplicado.

Tabela 4 – Parâmetros estimados dos modelos de contração volumétrica unitária dos frutos de café ajustados aos valores experimentais.

Modelo	Parâmetros do modelo			Parâmetros estatísticos			Distribuição dos resíduos
	β_0	β_1	β_2	R ²	SE	P	
(10)	0,38627	2,77608	-	0,9643	0,0201	2,3454	Tendenciosa
(11)	1,84285	-0,13366	-	0,9516	0,0241	2,6579	Tendenciosa
(12)	0,30648	-	-	0,1724	0,1024	12,0243	Tendenciosa
(13)	0,53717	0,17519	-	0,7610	0,0550	5,8065	Tendenciosa
(14)	0,54186	0,26491	-	0,8043	0,0498	5,3361	Tendenciosa
(15)	0,65185	-0,18324	0,19321	0,9512	0,0248	2,3730	Tendenciosa

Verifica-se que os modelos de Bala e Woods adaptado, Corrêa et al. e polinomial, apresentaram altos valores de coeficientes de determinação, se comparado aos demais modelos. Segundo Cano-higuita et al. (2015), esse parâmetro estatístico é de grande importância na modelagem matemática, principalmente quando são utilizados modelos com diferentes números de parâmetros estimados. Altos valores do coeficiente de determinação, indicam uma representação satisfatória dos modelos ajustados aos dados experimentais. No entanto, o coeficiente de determinação não deve ser analisado isoladamente na avaliação de modelos não lineares, sendo necessário o respaldo estatístico sobre a confiabilidade do modelo (Kashaninejad et al., 2007).

Segundo Avhad e Marchetti (2016), o erro médio relativo e o erro padrão da estimativa são considerados fortes auxiliares na escolha de modelos matemáticos. O modelo se adequa bem aos dados experimentais, se o valor do erro médio relativo é inferior a 10% e o erro padrão da estimativa é baixo (em geral, menor que 1) (Costa et al., 2015). Além dos parâmetros supracitados, para garantir que o modelo selecionado descreve o fenômeno de forma aceitável, é indicado que seja realizada a análise de dispersão dos resíduos. O modelo escolhido deve apresentar os valores residuais situados próximo a linha horizontal, em torno de zero, e não apresentar formas geométricas, indicando assim a aleatoriedade da dispersão. Caso a distribuição dos resíduos seja considerada tendenciosa, o modelo é considerado inadequado para representar o fenômeno em estudo (Corrêa et al., 2014).

Observa-se que todos os modelos apresentaram baixos valores do erro padrão da estimativa, e que, com exceção do modelo de Rahman apresentaram valores aceitáveis do erro médio relativo. Contudo, todos os modelos testados apresentaram tendenciosidade da

dispersão dos resíduos (Apêndice A), e dessa forma não podem ser utilizados para descrever a contração volumétrica dos frutos de café. Pelo anterior, foi proposto o modelo matemático nominado ARAUJO-COPACE (Equação 28).

$$\psi = (\beta_0 + \beta_1 U)^{-1/\beta_2} \quad (28)$$

Em que,

- ψ – Índice de contração volumétrica unitária, adimensional;
- U – Teor de água, decimal b.s.; e
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ – Coeficientes que dependem do produto.

O modelo proposto representou de forma aceitável o fenômeno de contração volumétrica para os frutos de café, uma vez que apresentou coeficiente de determinação superior a 97% e valores reduzidos do erro médio relativo e do erro padrão da estimativa (Tabela 5).

Tabela 5 – Parâmetros estimados pelo modelo ARAUJO-COPACE e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), erro médio relativo (P), erro padrão da estimativa (SE).

Equação	Parâmetros do modelo			Parâmetros estatísticos		
	β_0	β_1	β_2	R^2	SE	P
(28)	24,2578	-13,1124	6,1190	0,9742	0,0181	2,0410

Nas Figuras 18 e 19 são apresentadas as correspondências dos dados observados e estimados pelo modelo ARAUJO-COPACE assim como a distribuição dos resíduos. Pode-se observar o alto grau de correlação entre os dados observados e estimados, além da não tendenciosidade do modelo.

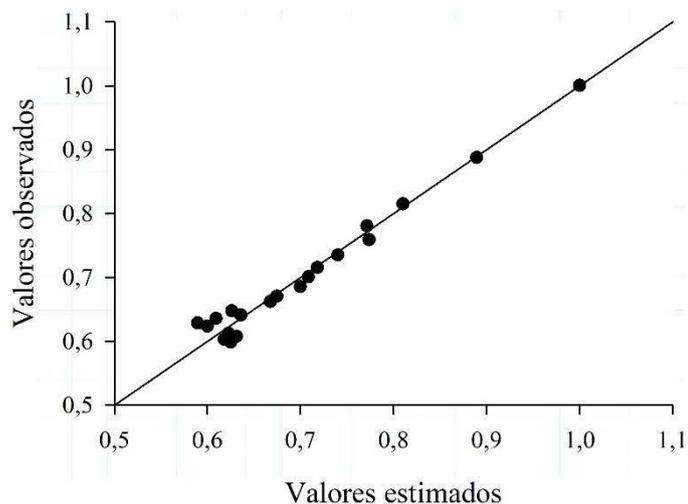


Figura 18 – Correspondência dos valores observados e estimados pelo modelo ARAUJO-COPACE para contração volumétrica dos frutos de café.

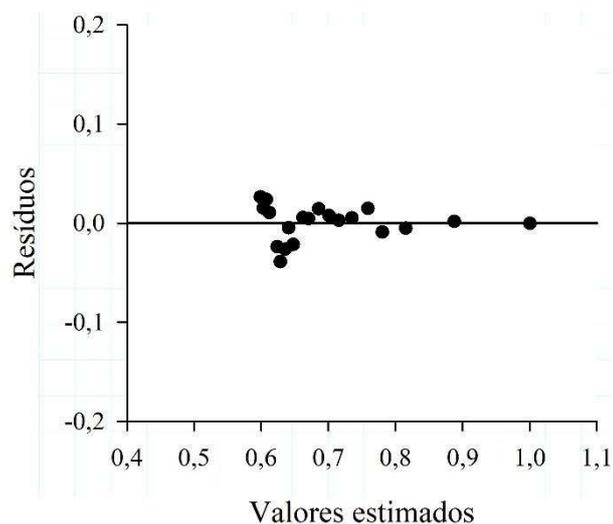


Figura 19 – Distribuição dos resíduos dos valores estimados pelo modelo ARAUJO-COPACE para contração volumétrica dos frutos de café.

Na Figura 20, são apresentados os valores observados e estimados, pelo modelo ARAUJO-COPACE do índice de contração volumétrica unitária dos frutos de café em função do teor de água. Observa-se que os frutos de café apresentaram uma redução de aproximadamente 40% em relação ao volume inicial, para o teor de água variando de 1,77 a 0,09 (decimal, b.s.). Os resultados encontrados demonstram que a contração volumétrica não deve ser desconsiderada durante a modelagem dos processos de secagem dos frutos de café, resultados estes que concordam com os encontrados por Goneli et al. (2011) para frutos de mamona. Segundo esses autores, negligenciar o fenômeno de contração volumétrica é um

dos principais fatores ocasionadores de erros nas simulações e modelagens do processo de secagem.

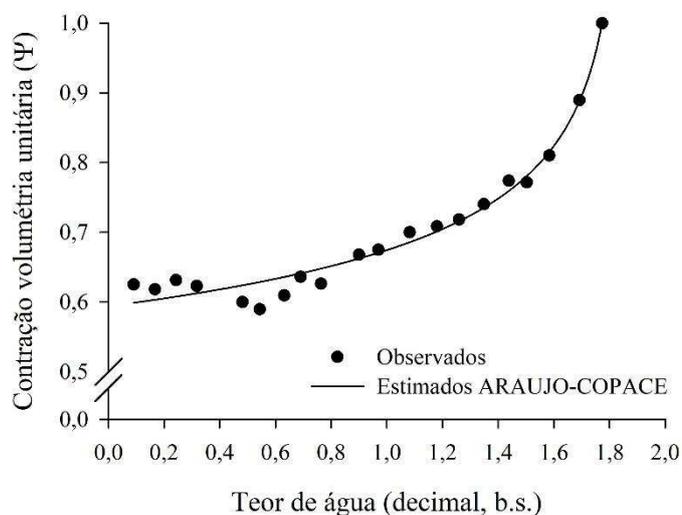


Figura 20 – Valores observados e estimados, pelo modelo ARAUJO-COPACE, da contração volumétrica unitária dos frutos de café.

5.1.3 Coeficiente de atrito estático

Na Tabela 6, são apresentados os valores médios dos coeficientes de atrito estático dos frutos de café para diferentes teores de água, em distintos materiais. Observa-se que o processo de secagem ocasiona o aumento do coeficiente de atrito estático, independentemente do material utilizado. Nota-se que os materiais, aço rugoso e ferro apresentam coeficiente de atrito ligeiramente superiores aos demais, contudo, não houve diferença significativa ($p < 0,05$) dentro de cada teor de água para as diferentes placas. As diferenças encontradas nos valores dos coeficientes de atrito para cada teor de água podem ser atribuídas a diferença das rugosidades entre as placas. As rugosidades médias das diferentes placas podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 6 – Médias dos coeficientes de atrito estático dos frutos de café em função do teor de água e do material.

Teor de água (decimal, b.s.)	Material				
	Polietileno	Acrílico	Aço liso	Aço rugoso	Ferro
1,7740	0,1486 Aa	0,1317 Aa	0,1607 Aa	0,1800 Aa	0,1692 Aa
1,6920	0,1584 Aab	0,1607 Aab	0,1787 Aab	0,1967 Aab	0,1967 Aab
1,5839	0,1878 Aab	0,1764 Aabc	0,1729 Aab	0,2061 Aab	0,1994 Aab
1,5029	0,2127 Aab	0,1629 Aab	0,1922 Aab	0,2151 Aab	0,2219 Aabc
1,4384	0,2263 Aab	0,1832 Aabc	0,2013 Aab	0,2174 Aab	0,2265 Aabc
1,3494	0,2311 Aab	0,1854 Aabc	0,2218 Aab	0,2184 Aab	0,2476 Aabc
1,2593	0,2426 Aab	0,2240 Aabc	0,2268 Aab	0,2036 Aab	0,2245 Aabc
1,1800	0,2448 Aab	0,2195 Aabc	0,2404 Aab	0,2287 Aab	0,2358 Aabc
1,0824	0,2633 Aab	0,2425 Aabc	0,2573 Aab	0,2449 Aab	0,2494 Aabc
0,9699	0,2634 Aab	0,2403 Aabc	0,2681 Aab	0,2365 Aab	0,2872 Aabc
0,9005	0,2798 Aab	0,2803 Aabc	0,2680 Aab	0,2756 Aab	0,2754 Aabc
0,7638	0,3059 Aab	0,3058 Aabc	0,2807 Aab	0,2732 Aab	0,3154 Aabc
0,6905	0,3035 Aab	0,3351 Aabc	0,2922 Aab	0,3014 Aab	0,3270 Aabc
0,6315	0,3332 Aab	0,3303 Aabc	0,2869 Aab	0,3059 Aab	0,3431 Aabc
0,5440	0,3325 Aab	0,3445 Aabc	0,2967 Aab	0,2896 Aab	0,3300 Aabc
0,4814	0,3420 Aab	0,3640 Aabc	0,3347 Aab	0,3038 Aab	0,3469 Aabc
0,3178	0,3470 Aab	0,3818 Aabc	0,3469 Aab	0,3298 Aab	0,4021 Aabc
0,2428	0,3543 Aab	0,3819 Aabc	0,3848 Aab	0,3644 Aab	0,3946 Aabc
0,1675	0,3640 Aab	0,3740 Aabc	0,3740 Aab	0,3648 Aab	0,4151 Aabc
0,0910	0,3719 Aab	0,3890 Aabc	0,3701 Aab	0,3847 Aab	0,4224 Aabc

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 7 – Rugosidade média (μm) e respectivo desvio padrão das superfícies dos materiais utilizados.

Acrílico	Material			
	Polietileno	Aço liso	Aço rugoso	Ferro
0,13 (0,02)	0,59 (0,03)	0,64 (0,04)	1,94 (0,11)	3,94 (0,22)

O comportamento do coeficiente de atrito estático em função do teor de água e do material pode ser observado na Figura 21.

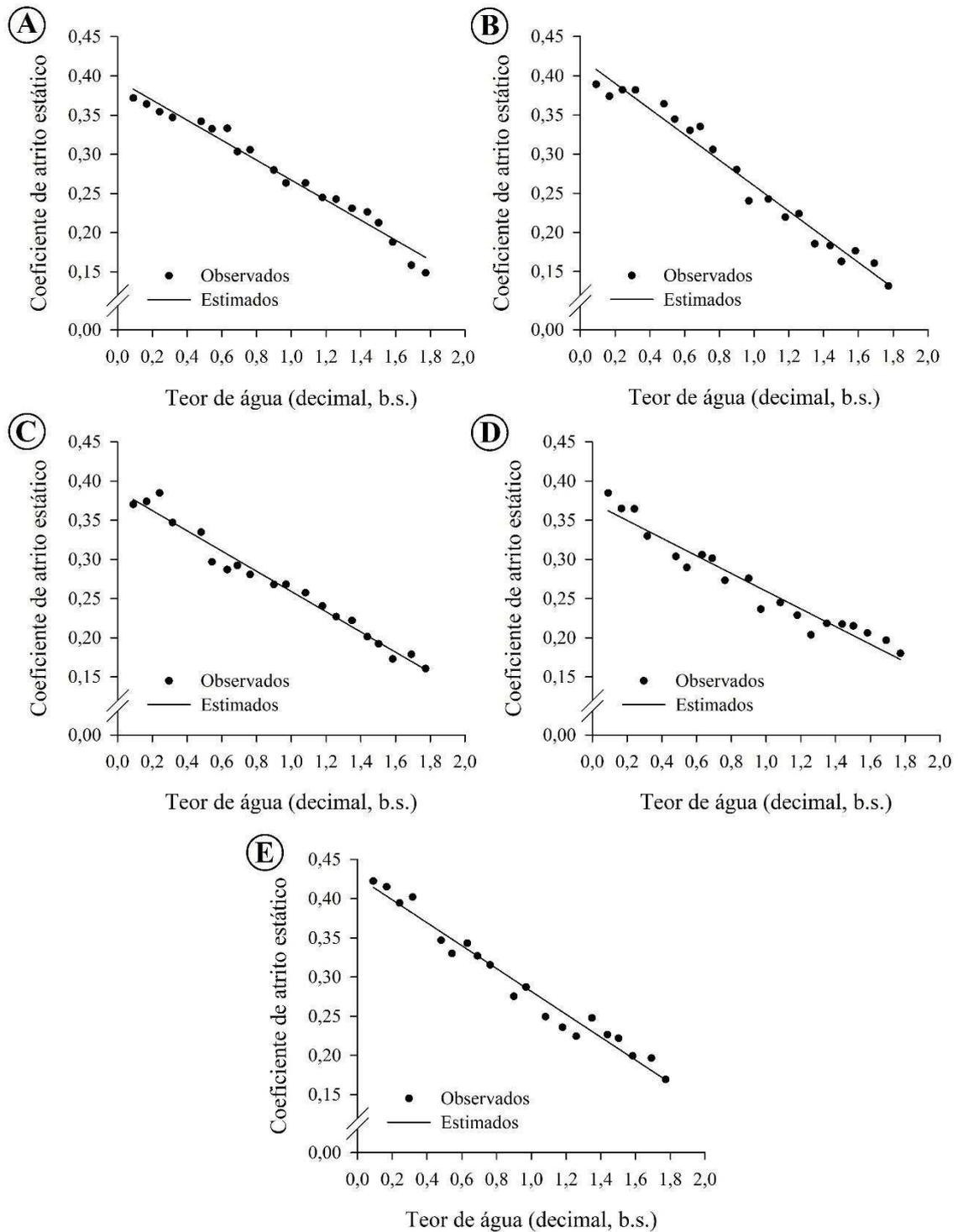


Figura 21 – Coeficiente de atrito estático dos frutos de café em função do teor de água em Polietileno (A); Acrílico (B); Aço liso (C); Aço rugoso (D) e Ferro (E).

Os resultados encontrados são contrários aos observados para maioria dos produtos agrícolas, que tendem a apresentar redução do coeficiente de atrito estático com a redução do teor de água (Kashaninejad et al., 2008; Kalkan e Kara, 2011). Isso pode ser explicado pelo aumento da rugosidade dos frutos de café durante a secagem, causando aumento da força de atrito (Cardona et al., 2008). Além disso, com a redução do teor de água, os frutos de café tornam-se menos esféricos, o que pode contribuir com o aumento da área de contato dos frutos com as placas.

Na Tabela 8, é apresentado o resumo dos modelos de regressão de melhor ajuste para os coeficientes de atrito estático dos frutos de café em função do teor de água. O modelo linear (Equação 13) apresentou ajuste adequado para todos os materiais utilizados. Observa-se que todos os modelos apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação, e representam de forma adequada o fenômeno analisado.

Tabela 8 – Coeficientes dos modelos de regressão linear ajustados para o coeficiente de atrito estático dos frutos de café para diferentes materiais.

Material da placa	β_0	β_1	R^2
Polietileno	0,3948	-0,1277 ⁺⁺	0,9739 ^{**}
Acrílico	0,4229	-0,1632 ⁺⁺	0,9733 ^{**}
Aço liso	0,3883	-0,1291 ⁺⁺	0,9745 ^{**}
Aço rugoso	0,3723	-0,1128 ⁺⁺	0,9420 ^{**}
Ferro	0,4278	-0,1460 ⁺⁺	0,9696 ^{**}

⁺⁺ Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t, ^{**} Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Na Tabela 9 podem ser observados os limites superiores e inferiores do coeficiente de atrito estático para os diversos materiais e teores de água. Segundo Calil Júnior et al. (1997), as propriedades de fluxo dos produtos agrícolas devem ser apresentadas com seus respectivos limites superiores e inferiores, de forma a fornecer dados que permitam a realização de projetos estruturais mais seguros e econômicos. Segundo os autores, os limites superiores são comumente utilizados para o projeto de fluxo, e os inferiores para o projeto de ações (pressões).

Tabela 9 – Limites superiores e inferiores do coeficiente de atrito estático dos frutos de café, em função do teor de água e do material.

Teor de água (decimal, b.s.)	Material									
	Polietileno		Acrílico		Aço liso		Aço rugoso		Ferro	
	Limite inferior	Limite superior								
1,7740	0,1192	0,1763	0,1228	0,1405	0,1228	0,1763	0,1405	0,2089	0,1405	0,1890
1,6920	0,1405	0,1763	0,1405	0,1853	0,1584	0,2217	0,1763	0,2309	0,1763	0,2126
1,5839	0,1317	0,2217	0,1584	0,1944	0,1317	0,2254	0,1709	0,2679	0,1405	0,2679
1,5029	0,1763	0,2309	0,1405	0,1853	0,1763	0,2126	0,1853	0,2679	0,1853	0,2679
1,4384	0,2126	0,2309	0,1584	0,2126	0,1673	0,2309	0,1763	0,2679	0,1763	0,2679
1,3494	0,1763	0,2493	0,1763	0,2126	0,1853	0,2493	0,1763	0,2217	0,1763	0,3153
1,2593	0,1853	0,2679	0,2126	0,2309	0,1763	0,3057	0,1763	0,2493	0,1763	0,3057
1,1800	0,2126	0,2679	0,1853	0,2493	0,1763	0,2679	0,1944	0,2679	0,1853	0,2773
1,0824	0,2493	0,2867	0,2217	0,2679	0,2309	0,2679	0,2126	0,2773	0,2126	0,2679
0,9699	0,2309	0,2867	0,2126	0,2867	0,2309	0,2867	0,1317	0,3249	0,2309	0,3346
0,9005	0,2679	0,3153	0,2217	0,3443	0,2493	0,2867	0,1944	0,3249	0,2217	0,3153
0,7638	0,2679	0,3346	0,2867	0,3249	0,2126	0,3640	0,2126	0,3443	0,2867	0,3443
0,6905	0,2679	0,3249	0,2867	0,3839	0,2217	0,3640	0,2679	0,3640	0,2679	0,4663
0,6315	0,2679	0,4245	0,2679	0,3839	0,2679	0,3249	0,2679	0,3249	0,2493	0,4142
0,5440	0,2867	0,3640	0,3057	0,3640	0,2679	0,3640	0,2309	0,3443	0,2867	0,3640
0,4814	0,3153	0,3640	0,3443	0,3839	0,3249	0,3640	0,2679	0,3640	0,3153	0,3640
0,3178	0,3153	0,3839	0,3153	0,4040	0,3153	0,3640	0,3153	0,3443	0,3640	0,4663
0,2428	0,3249	0,3839	0,3346	0,4452	0,3249	0,4663	0,3153	0,4142	0,3443	0,4663
0,1675	0,3443	0,3839	0,3640	0,4040	0,3640	0,4040	0,3249	0,4663	0,3640	0,4663
0,0910	0,3249	0,4142	0,3640	0,4040	0,3057	0,4663	0,3640	0,4663	0,3640	0,4663

5.2 Propriedades físicas dos grãos de café durante a secagem

5.2.1 Massa específica unitária, tamanho e forma

A Figura 22 apresenta o comportamento da massa específica unitária dos grãos de café durante a secagem. Observa-se a redução linear da massa específica com a redução do teor de água. Os valores observados oscilaram entre 977 e 665 kg m⁻³ para os teores de água variando entre 1,127 e 0,073 (decimal, b.s.). Este resultado concorda com os apresentados por Oliveira (2009) que relataram a mesma tendência avaliando a massa específica do café em pergaminho. Ressalta-se que os resultados observados para o café são contrários aos observados para maioria dos produtos agrícolas, que geralmente, apresentam aumento da massa específica unitária com a redução do teor de água (Dursun et al., 2007; Kibar e Ozturk, 2008; Mansouri et al., 2017; Munder et al., 2017; Cam et al., 2018).

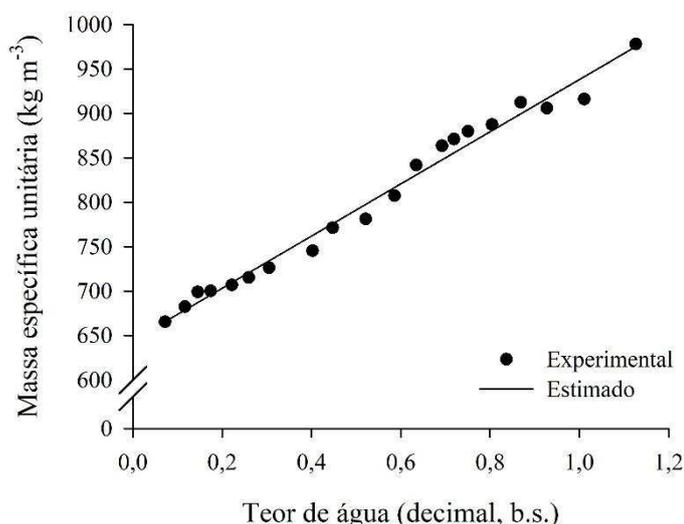


Figura 22 – Valores observados e estimados, da massa específica unitária dos grãos de café durante a secagem.

O comportamento da esfericidade dos grãos de café em função do teor de água pode ser observado na Figura 23. Contrariamente ao apresentado pelos frutos, a esfericidade dos grãos de café apresentou um pequeno aumento de forma não linear com a redução do teor de água. Os valores variaram entre 63,7 e 60,8% para o menor e maior teores de água analisados, respectivamente, um aumento de aproximadamente 4,7% em relação a condição inicial. Esses resultados estão em plena concordância com os apresentados por Afonso Júnior et al. (2007), que relataram durante a secagem a mudança de esfericidade de 2,9 e 4,1% para os grãos de café arábica e robusta, respectivamente. A baixa variação dessa característica pode ser causada por uma redução mais uniforme das dimensões características dos grãos durante a secagem.

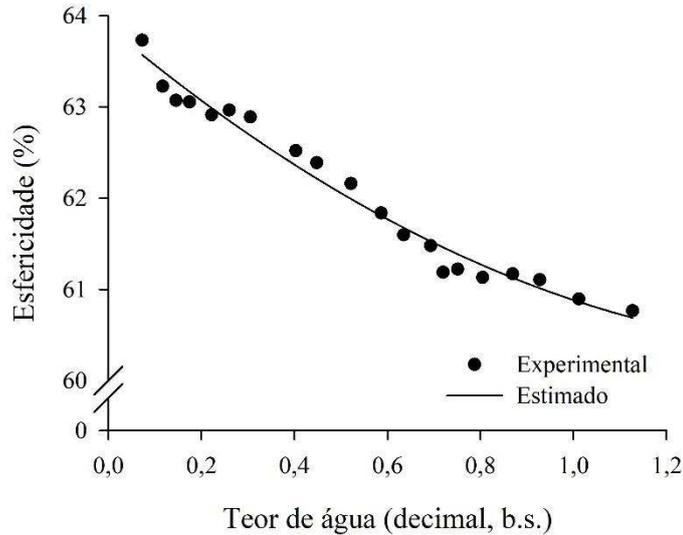


Figura 23 – Valores observados e estimados, da esfericidade dos grãos de café durante a secagem.

A variação da circularidade dos grãos de café durante a secagem é apresentada na Figura 24. Observa-se uma tendência de aumento da circularidade com a redução do teor de água. Esse resultado indica uma redução superior da maior dimensão característica do grão se comparada com a redução da dimensão intermediária. Os valores oscilaram entre 64,2 e 60,4% para os teores de água avaliados. A baixa variação dessa propriedade física também foi relatada para alguns produtos agrícolas como frutos de mamona (Goneli et al., 2011), grãos de feijão (Resende et al., 2005) e grãos de amendoim (Araujo et al., 2014).

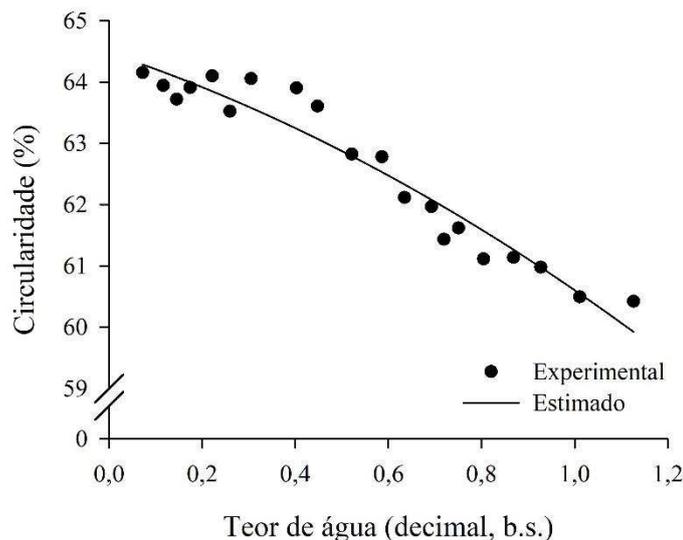


Figura 24 – Valores observados e estimados, da circularidade dos grãos de café durante a secagem.

Na Figura 25, são apresentados os valores observados e estimados da área projetada dos grãos de café em função do teor de água. Como esperado, uma redução dessa propriedade é verificada com a redução do teor de água. Isso está intimamente relacionado com a contração volumétrica dos grãos durante a secagem, ou seja, o processo de dessorção colabora para redução das dimensões características do produto, evidenciando o encolhimento dos grãos de café. Observa-se que tal redução ocorreu de forma não linear, com valores entre 99,6 e 85,7 mm². A redução da área projetada com a redução do teor de água vem sendo evidenciada por diversos autores (Dursun et al., 2007; Bande et al., 2012; Araujo et al., 2014).

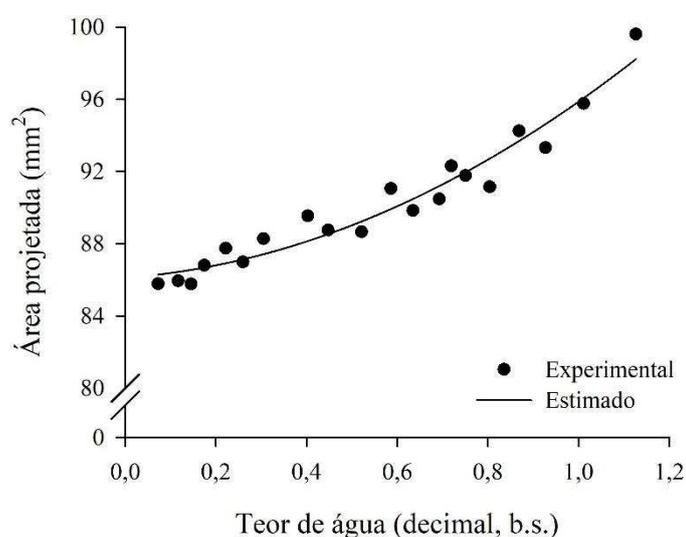


Figura 25 – Valores observados e estimados, da área projetada dos grãos de café durante a secagem.

A variação do diâmetro geométrico dos grãos de café durante a secagem pode ser observada na Figura 26. Uma redução não linear é observada com a redução do teor de água. A redução dessa propriedade também está associada a redução das dimensões características dos grãos de café durante a secagem. Os valores experimentais variaram entre 8,86 e 8,28 mm para o maior e menor teor de água analisados, respectivamente. Verifica-se que a redução apresentada é pouco significativa, e pode indicar uma baixa contração volumétrica dos grãos durante a secagem. Esse comportamento é comumente observado para diversos produtos agrícolas como trigo (Karimi et al., 2009), milho (Barnwal et al., 2011), mamona (Goneli et al., 2011), amendoim (Araujo et al., 2014) e soja (Hauth et al., 2018), dentre outros.

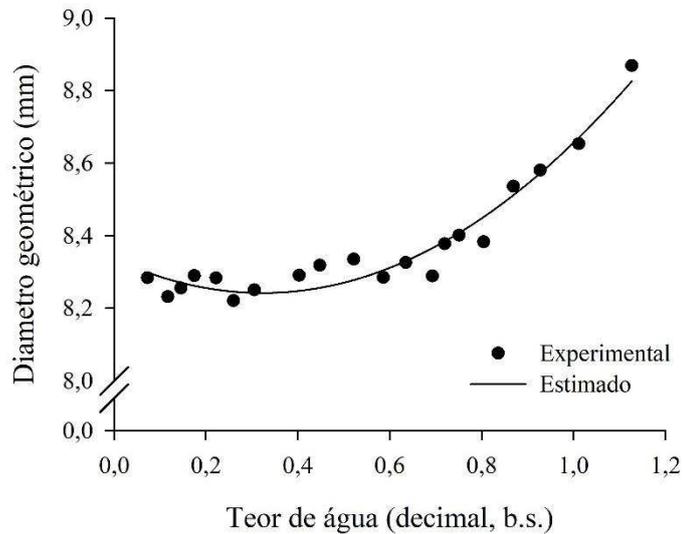


Figura 26 – Valores observados e estimados, do diâmetro geométrico dos grãos de café durante a secagem.

Os valores experimentais e estimados do volume dos grãos de café em função do teor de água podem ser observados na Figura 27. Observa-se que o volume dos frutos decai de forma não linear durante a secagem. O volume médio dos grãos reduziu de 365 mm³ no teor de água inicial, para 297 mm³ no teor de água final. Assim como observado para os frutos de café, a redução do volume é mais significativa no início da secagem com tendência de estabilização. Esses resultados corroboram com os anteriormente observados por outros autores (Garnayak et al., 2008; Solomon e Zewdu, 2009; Figueiredo et al., 2011; Aviara et al., 2013).

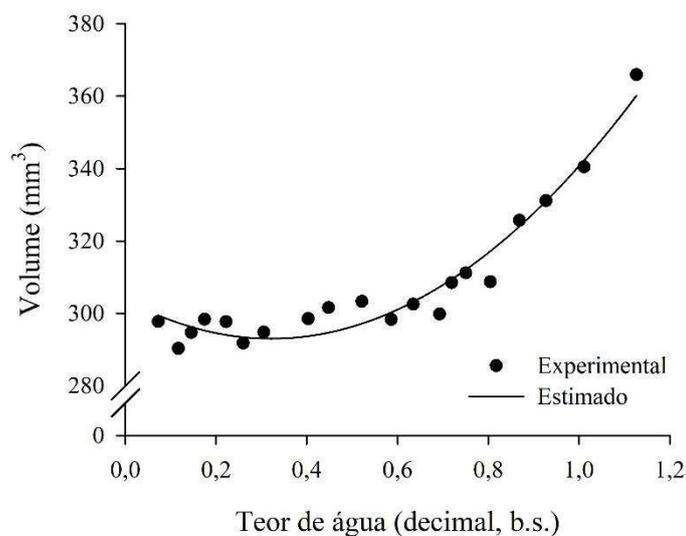


Figura 27 – Valores observados e estimados, do volume dos grãos de café durante a secagem.

O resumo dos modelos de regressão de melhor ajuste para massa específica unitária, esfericidade, circularidade, área projetada, diâmetro geométrico e volume dos frutos de café em função do teor de água pode ser observado na Tabela 10. O modelo polinomial de segundo grau (Equação 15) apresentou o melhor ajuste para todas as variáveis analisadas, exceto massa específica unitária, representada pelo modelo linear (Equação 13). Nota-se que todos os ajustes apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação, e, portanto, representam de forma satisfatória os fenômenos estudados.

Tabela 10 – Coeficientes dos modelos de regressão ajustados para as propriedades físicas dos grãos de café.

Propriedade Física	β_0	β_1	β_2	R^2
Massa específica unitária	644,4200	293,5445 ⁺⁺	-	0,9840 ^{**}
Esfericidade	63,8773	-4,2911 ⁺⁺	1,2964 ⁺⁺	0,9756 ^{**}
Circularidade	64,4761	-2,5346 ⁺	-1,3366 ⁺	0,9364 ^{**}
Área projetada	86,1075	1,8774 ⁺	7,8803 ⁺⁺	0,9426 ^{**}
Diâmetro geométrico	8,3364	-0,5831 ⁺⁺	0,9029 ⁺⁺	0,9455 ^{**}
Volume	303,7127	-66,6132 ⁺⁺	103,5264 ⁺⁺	0,9467 ^{**}

⁺⁺ Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t, ⁺ Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t,

^{**} Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

5.2.2 Contração volumétrica unitária

Na Tabela 11, são apresentados os valores dos coeficientes de determinação (R^2), erro médio relativo (P), erro padrão da estimativa (SE) e a tendência da distribuição dos resíduos para os modelos utilizados para avaliar a contração volumétrica unitária dos frutos de café durante a secagem.

Tabela 11 – Parâmetros estimados dos modelos de contração volumétrica unitária dos grãos de café ajustados aos valores experimentais.

Modelo	Parâmetros do modelo			Parâmetros estatísticos			Distribuição dos resíduos
	β_0	β_1	β_2	R ²	SE	P	
(10)	0,19947	3,83558	-	0,9663	0,0101	0,9133	Aleatória
(11)	1,39733	-0,11412	-	0,8513	0,0211	1,7398	Tendenciosa
(12)	0,23978	-	-	0,1632	0,0502	4,7604	Tendenciosa
(13)	0,76880	0,13524	-	0,6994	0,0301	2,5149	Tendenciosa
(14)	0,76921	0,16453	-	0,7187	0,0291	2,4284	Tendenciosa
(15)	0,82997	-0,18204	0,28291	0,9467	0,0127	1,1096	Aleatória

O modelo Bala e Woods modificado e o modelo polinomial de segundo grau apresentaram os maiores valores do coeficiente de determinação, e as menores magnitudes dos erros médios relativos e erro padrão da estimativa, quando comparado aos demais modelos analisados. Verifica-se, ainda, que somente esses modelos, apresentaram distribuição não tendenciosa dos resíduos, podendo representar satisfatoriamente o fenômeno em estudo (Apêndice B).

Devido a maior magnitude do coeficiente de determinação e menores valores do erro médio relativo e erro padrão da estimativa, o modelo Bala e Woods modificado foi escolhido para representar a contração volumétrica dos grãos de café. Resultados semelhantes foram obtidos por Corrêa et al. (2006), que ao analisarem diversos modelos matemáticos observaram que o modelo de Bala e Woods modificado foi o que melhor representou a contração volumétrica dos grãos de trigo. O mesmo comportamento também foi relatado para grãos de feijão (Resende et al., 2005) e de soja (Ribeiro et al., 2005).

Na Figura 28 é apresentada a correspondência dos dados observados e estimados pelo modelo Bala e Woods modificado. Pode-se observar o alto grau de correlação entre os dados observados e estimados.

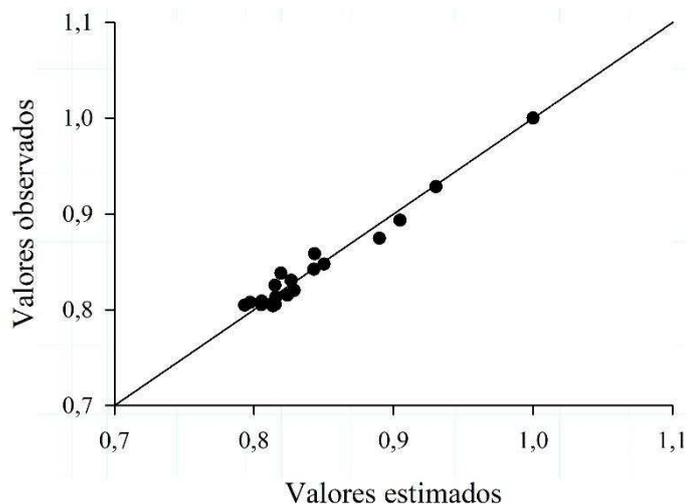


Figura 28 – Correspondência dos valores observados e estimados pelo modelo Bala e Woods adaptado para contração volumétrica dos grãos de café.

Os valores observados e estimados pelo modelo Bala e Woods modificado para o índice de contração volumétrica unitária dos grãos de café em função do teor de água podem ser observados na Figura 29. Nota-se que os grãos de café apresentaram uma redução volumétrica de aproximadamente 20% em relação ao volume inicial para o teor de água variando de 1,13 a 0,07 (decimal, b.s.).

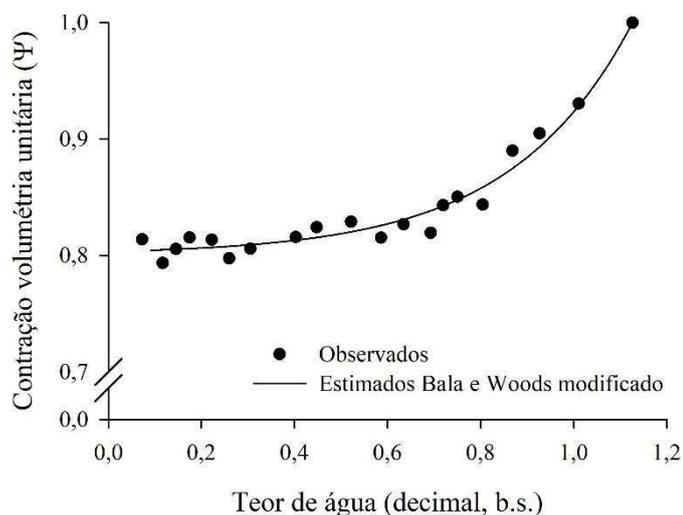


Figura 29 – Valores observados e estimados, pelo modelo Bala e Woods adaptado, da contração volumétrica unitária dos grãos de café.

5.2.3 Coeficiente de atrito estático

Os valores médios dos coeficientes de atrito estático dos grãos de café para diferentes teores de água, em distintos materiais são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Médias dos coeficientes de atrito estático dos grãos de café em função do teor de água e do material.

Teor de água (decimal, b.s.)	Material				
	Poliétileno	Acrílico	Aço liso	Aço rugoso	Ferro
1,127	1,0000 Ab	1,0000 Aa	1,0000 Aa	1,0000 Aa	1,0000 Aa
1,011	1,0000 Ab	1,0000 Aa	1,0000 Aa	1,0000 Aa	1,0000 Aa
0,927	1,0000 Ab	1,0000 Aa	1,0000 Aa	1,0000 Aa	1,0000 Aa
0,869	1,0000 Ab	0,9579 Aa	0,9746 Aa	1,0000 Aa	1,0000 Aa
0,805	0,9828 Aab	0,9135 Aa	0,9429 Aa	0,9914 Aa	1,0000 Aa
0,751	1,0000 Ab	0,8664 Aa	0,9663 Aa	1,0000 Aa	1,0000 Aa
0,720	0,9746 Aab	0,8698 Aa	0,8675 Aa	0,9582 Aa	1,0000 Aa
0,693	1,0000 Ab	0,8620 Aa	0,9349 Aa	0,9408 Aa	1,0000 Aa
0,635	0,9598 Aab	0,8327 Aa	0,8882 Aa	0,8837 Aa	1,0000 Aa
0,586	0,9195 Aab	0,7578 Aa	0,8698 Aa	0,8397 Aa	1,0000 Aa
0,522	0,9036 Aab	0,7240 Aa	0,8511 Aa	0,8440 Aa	1,0000 Aa
0,448	0,8257 Aab	0,7448 Aa	0,7821 Aa	0,8379 Aa	1,0000 Aa
0,403	0,7899 Aab	0,6883 Aa	0,7483 Aa	0,7894 Aa	0,9889 Ba
0,305	0,7757 Aab	0,6963 Aa	0,7642 Aa	0,7899 Aa	0,9645 Ba
0,260	0,7335 Aab	0,7057 Aa	0,6880 Aa	0,7981 Aa	0,9567 Ba
0,222	0,6894 Aab	0,6761 Aa	0,7011 Aa	0,7682 Ba	0,9354 Ba
0,175	0,6801 Aab	0,7082 Aa	0,6930 Aa	0,7737 Aa	0,9164 Aa
0,145	0,6346 Aab	0,7042 Aa	0,6537 Aa	0,7539 Aa	0,8937 Aa
0,117	0,6507 Aab	0,6695 Aa	0,6880 Aa	0,7401 Aa	0,8873 Aa
0,073	0,6082 Aa	0,7018 Aa	0,7074 Aa	0,7473 Aa	0,8753 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se que os resultados encontrados para os grãos de café são contrários aos encontrados para os frutos. Verifica-se que a redução do teor de água ocasionou a redução do coeficiente de atrito estático, independentemente do material da placa utilizada. Esse resultado é semelhante aos observados para outros produtos agrícolas (Coskuner e Karababa,

2007; Dursun et al., 2007). Essa redução em função do teor de água se deve, possivelmente, ao fato de que os produtos com maior teor de água geram maiores forças de adesão (devido a plasticidade) entre os grãos e a superfície de contato. Nota-se que o coeficiente de atrito para as diferentes placas dentro de cada teor de água, apresentou diferença estatística ($p < 0,05$) somente para alguns casos. Dessa forma verifica-se que o teor de água apresentou maior influência sobre essa característica do que o material utilizado.

A redução do coeficiente de atrito estático dos grãos de café durante a secagem (Figura 30), também pode ser atribuída a contração volumétrica dos grãos durante a secagem, e conseqüentemente, redução da área de contato entre o grão e a superfície. Os resultados encontrados neste estudo são superiores aos apresentados por Silva et al. (2011) para grãos de café robusta. Possivelmente, esse resultado é reflexo da diferença das propriedades geométricas do café robusta, que apresenta em geral grãos menores, quando comparados aos do café arábica. Verifica-se que o coeficiente de atrito estático foi maior nas placas de aço rugoso e ferro. As diferenças devido às diferentes superfícies, se devem ao fato de que superfícies mais lisas, proporcionam menor resistência ao deslocamento (Gupta e Das, 1998).

O resumo dos modelos de regressão de melhor ajuste para os coeficientes de atrito estático dos grãos de café em função do teor de água pode ser observado na Tabela 13. O modelo linear (Equação 13) apresentou ajuste adequado para os materiais, aço liso e aço rugoso. Os demais materiais apresentaram comportamento não linear e foram representados pelo modelo polinomial de segundo grau (Equação 15). Elevados valores do coeficiente de determinação podem ser observados, demonstrando que os modelos apresentaram ajustes satisfatórios.

Tabela 13 – Coeficientes dos modelos de regressão ajustados para o coeficiente de atrito estático dos grãos de café para diferentes materiais.

Material da placa	β_0	β_1	β_2	R^2
Polietileno	0,5203	0,9641 ⁺⁺	-0,4733 ⁺⁺	0,9822 ^{**}
Acrílico	0,6655	0,0805 ⁺	0,2442 ⁺	0,9299 ^{**}
Aço liso	0,6344	0,3736 ⁺⁺	-	0,9376 ^{**}
Aço rugoso	0,7083	0,3048 ⁺⁺	-	0,9182 ^{**}
Ferro	0,8559	0,3933 ⁺⁺	-0,2500 ⁺⁺	0,9395 ^{**}

⁺⁺ Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t, ⁺ Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t, ^{**} Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

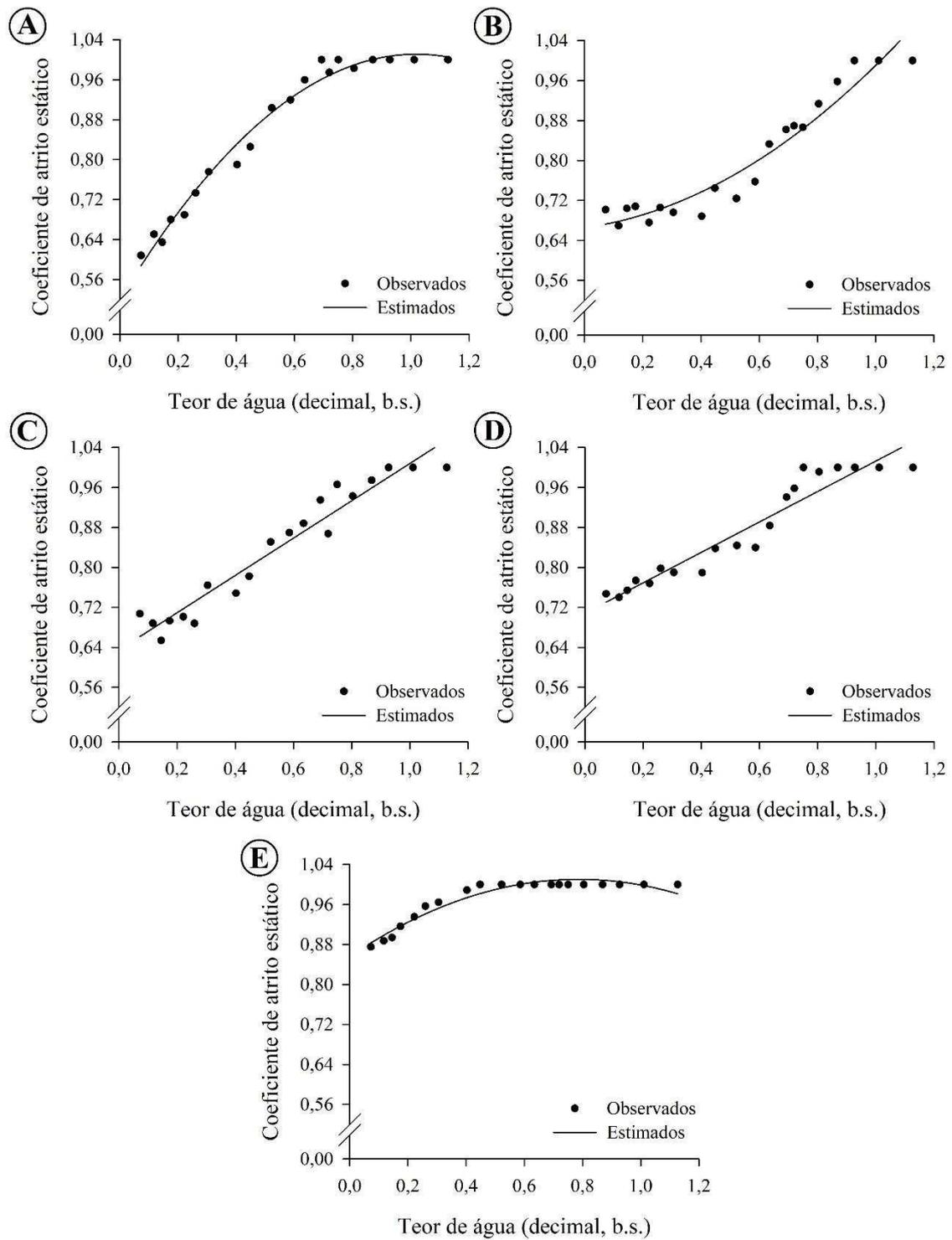


Figura 30 – Coeficiente de atrito estático dos grãos de café em função do teor de água em Polietileno (A); Acrílico (B); Aço liso (C); Aço rugoso (D) e Ferro (E).

Os limites superiores e inferiores do coeficiente de atrito estático para os diferentes materiais e teores de água podem ser observados na Tabela 14.

Tabela 14 – Limites superiores e inferiores do coeficiente de atrito estático dos frutos de café, em função do teor de água e do material.

Teor de água (decimal, b.s.)	Material									
	Polietileno		Acrílico		Aço liso		Aço rugoso		Ferro	
	Limite inferior	Limite superior								
1,127	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
1,011	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,927	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,869	1,0000	1,0000	0,9004	1,0000	0,9325	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,805	0,9657	1,0000	0,7536	1,0000	0,8391	1,0000	0,9657	1,0000	1,0000	1,0000
0,751	1,0000	1,0000	0,7002	0,9325	0,9325	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,720	0,9325	1,0000	0,6745	1,0000	0,7002	1,0000	0,9004	1,0000	1,0000	1,0000
0,693	1,0000	1,0000	0,8391	0,9004	0,8391	1,0000	0,9325	0,9657	1,0000	1,0000
0,635	0,8391	1,0000	0,5774	1,0000	0,7813	1,0000	0,7536	1,0000	1,0000	1,0000
0,586	0,8391	1,0000	0,5774	1,0000	0,8391	0,9004	0,5774	1,0000	1,0000	1,0000
0,522	0,7813	1,0000	0,5317	0,9004	0,7002	0,9325	0,6494	1,0000	1,0000	1,0000
0,448	0,7536	0,9004	0,5774	0,8391	0,7265	0,8391	0,6494	0,9325	1,0000	1,0000
0,403	0,7002	0,8391	0,6249	0,7536	0,7002	0,8391	0,7536	0,8693	0,9778	1,0000
0,305	0,7002	0,8391	0,5774	0,7813	0,6249	0,8391	0,7002	0,8391	0,9445	1,0000
0,260	0,7002	0,7536	0,5774	0,8391	0,6249	0,7265	0,7265	0,9004	0,9412	1,0000
0,222	0,5774	0,7536	0,5774	0,7265	0,6249	0,7265	0,7265	0,8391	0,9237	1,0000
0,175	0,5317	0,8391	0,5774	0,8391	0,6128	0,8098	0,5774	0,8391	0,9004	0,9325
0,145	0,5774	0,6745	0,5774	0,8391	0,5774	0,7002	0,6371	0,8391	0,8391	0,9163
0,117	0,5774	0,7002	0,5774	0,7002	0,5774	0,9004	0,6249	0,9325	0,8391	0,9004
0,073	0,5317	0,6745	0,6249	0,7813	0,6494	0,7536	0,7002	0,7813	0,7536	0,8793

5.3 Propriedades aerodinâmicas dos frutos de café durante a secagem

5.3.1 Propriedades aerodinâmicas experimentais

O comportamento da velocidade terminal experimental dos frutos de café durante a secagem pode ser observado na Figura 31. A velocidade terminal decresce de forma não linear com a redução do teor de água. Este comportamento está associado ao comportamento da massa específica unitária apresentada anteriormente. Durante o processo de secagem a massa específica unitária é reduzida e conseqüentemente, a velocidade para garantir a flutuação dos frutos diminui. Além disso, Couto et al. (2004) argumentam que a redução do teor de água ocasiona o aumento da rugosidade superficial dos frutos de café, e por consequência, a redução da velocidade terminal. Os valores de velocidade terminal variaram de 11,4 a 6,4 m s⁻¹ para os teores de água entre 1,77 e 0,09 (decimal, b.s.).

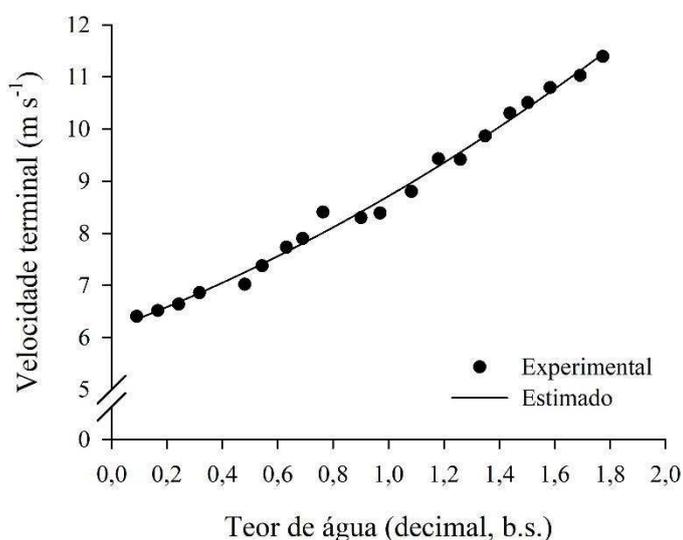


Figura 31 – Valores observados e estimados, da velocidade terminal dos frutos de café durante a secagem.

A tendência de aumento dos valores da variável dependente, velocidade terminal, com a elevação do teor de água é relatada por diversos autores (Gursoy e Guzel, 2010; Eissa, 2011; Khodaei e Akhijahani, 2012; Shahbazi et al., 2014). Esse fato está associado às alterações das características físicas do produto durante a secagem. Dentre essas características, destacam-se a massa específica unitária, e as características de tamanho e forma. Dessa forma pode-se dizer que o estudo das propriedades aerodinâmicas é altamente dependente do estudo das demais propriedades físicas apresentadas neste estudo.

Os modelos de regressão linear são comumente utilizados para representação da velocidade terminal em função do teor de água (Khodabakhshian et al., 2012). No entanto,

os modelos não lineares vêm apresentando melhores ajustes para diversos produtos agrícolas, como sementes de turgenia e grãos de trigo (Nalbandi et al., 2010), sementes de Makhobeli (Shahbazi et al., 2014), grãos de feijão da china (Shahbazi, 2015), sementes de feijão fava (Dilmac et al., 2016) e sementes de gergelim (Marathe et al., 2017).

O coeficiente de arrasto real em função do teor de água pode ser observado na Figura 32. Observa-se um aumento não linear dessa variável com a redução do teor de água, comportamento oposto ao observado para velocidade terminal. Isto já era esperado uma vez que essas variáveis são inversamente proporcionais. Maiores valores do coeficiente de arrasto nos menores teores de água podem ser explicados pela alteração das características físicas dos frutos de café durante a secagem.

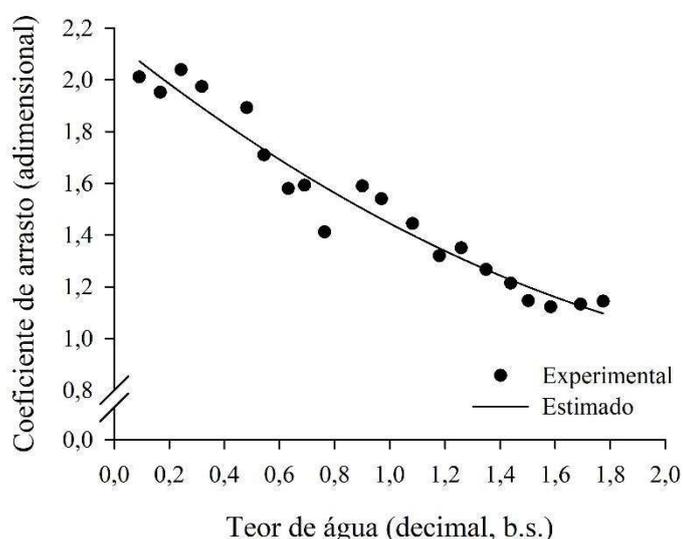


Figura 32 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto real dos frutos de café durante a secagem.

Os valores do coeficiente de arrasto variaram entre 2,1 e 1,1 para os teores de água entre 1,77 e 0,09 (decimal, b.s.), valores superiores aos encontrados por Afonso Júnior et al. (2007) para frutos de café das variedades Catuaí e Conilon. Tal diferença pode ser associada à diferença das características físicas entre os materiais utilizados. Destaca-se que apesar de a variedade Catuaí pertencer à mesma espécie da cultivar utilizada nesse estudo, diferenças físicas são observadas, principalmente quanto ao tamanho e esfericidade dos frutos, características que influenciam diretamente no coeficiente de arrasto.

Na Figura 33, é apresentado o comportamento do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds (Re), que está diretamente relacionado com as dimensões características e com a velocidade terminal dos frutos de café. Os resultados apresentados

corroboram com os registrados por Rosendahl (2000), que avaliou o comportamento do coeficiente de arrasto para diferentes formas geométricas em função de Reynolds. É possível verificar que a partir do número de Reynolds igual a 9500, o coeficiente de arrasto apresenta tendência de estabilização em torno de 1,2.

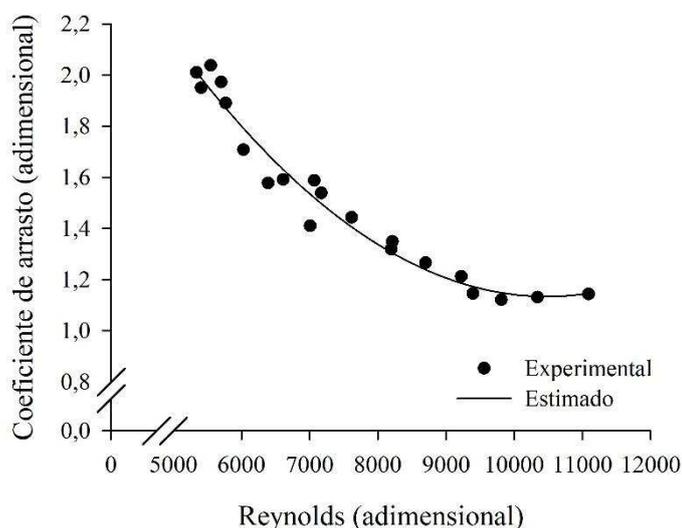


Figura 33 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto real dos frutos de café em função do número de Reynolds.

Na Tabela 15, podem ser observados os coeficientes de regressão não linear de melhor ajuste para velocidade terminal e coeficiente de arrasto real para os frutos de café em função do teor de água, e do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds. Para estes, o modelo polinomial de segundo grau (Equação 15) apresentou o melhor ajuste. Nota-se que ambos os ajustes apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação, e, portanto, representam de forma satisfatória os fenômenos estudados.

Tabela 15 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados para as propriedades aerodinâmicas dos frutos de café.

Propriedade Aerodinâmica	β_0	β_1	β_2	R^2
Velocidade terminal $f(U)$	6,1618	1,9976 ⁺⁺	0,5527 ⁺⁺	0,9907 ^{**}
Coeficiente de arrasto $f(U)$	2,1476	-0,8458 ⁺⁺	0,1428 ⁺⁺	0,9475 ^{**}
Coeficiente de arrasto $f(Re)$	4,7838	-0,0007 ⁺⁺	3,3249e-8 ⁺⁺	0,9653 ^{**}

U – Teor de água (decimal, b.s.); Re – Número de Reynolds (adimensional); $f()$ – em função de; ⁺⁺ Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ^{**} Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

5.3.2 Propriedades aerodinâmicas teóricas

Na Figura 34 são apresentados os valores das velocidades terminais experimentais e teóricas, para os frutos de café durante a secagem. Observa-se que os valores obtidos teoricamente apresentam comportamento semelhante aos valores experimentais. Nota-se que os valores teóricos subestimam os valores experimentais na faixa de teor de água entre 1,77 e 0,4 (decimal, b.s.) e superestimam na faixa de 0,4 e 0,09 (decimal, b.s.).

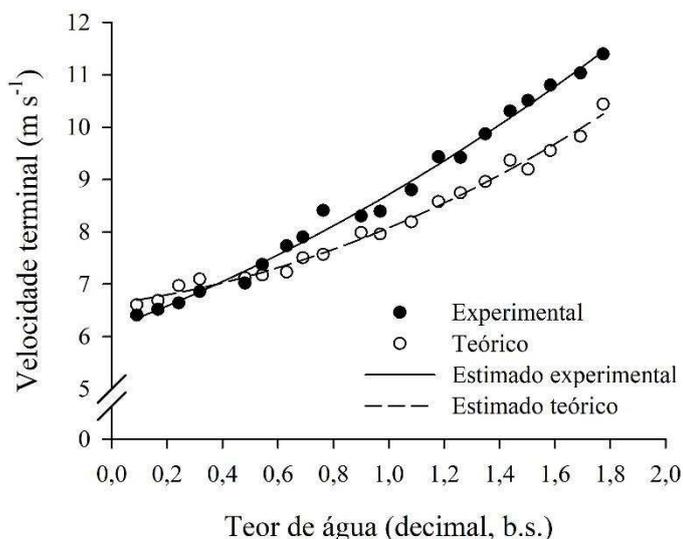


Figura 34 – Valores observados e estimados, da velocidade terminal experimental e teórica para os frutos de café em função do teor de água.

Os erros encontrados na determinação teórica da velocidade terminal em relação à experimental neste estudo variaram entre -12,5 e 5,0%. Ao verificarem diferentes metodologias para determinação da velocidade terminal para amendoim, Simplício e Braga (1999) constataram que os valores obtidos experimentalmente diferiam-se significativamente dos valores numéricos. Nesse contexto, os erros obtidos pelos autores pelo método de Mohsenin (1986) chegaram a 72,8%, enquanto pelo método de Pettyjohn e Christiansen (1948) foram de até 37,85%. Quanto ao considerar o amendoim como um esferoide perfeito, encontraram diferenças de até 24,0%.

Afonso Júnior et al. (2007), avaliaram a velocidade terminal numericamente pela relação do coeficiente de arrasto e Reynolds pelo método descrito por Mohsenin (1986), e obtiveram erros variando de 27,7 a 52,5% para os frutos de café arábica e de 33,5 a 47,3% para os frutos de café robusta. Constata-se que o modelo numérico utilizado pelos autores superestima de forma acentuada os valores experimentais. Dessa maneira pode-se dizer que o método descrito por Haider e Levenspiel (1989), utilizado neste estudo, apresenta ajuste satisfatório para os frutos de café, uma vez que apresentou resultados semelhantes aos

experimentais, e erros inferiores aos apresentados na literatura. Ressalta-se que, a saber, o método utilizado neste estudo, nunca foi utilizado para produtos agrícolas.

Os coeficientes de arrasto teórico e experimental para os frutos de café durante a secagem podem ser observados na Figura 35. Verifica-se que o modelo teórico, opostamente ao observado para velocidade terminal, superestima os valores experimentais na faixa de teor de água entre 1,77 e 0,4 (decimal, b.s.) e subestima na faixa de 0,4 e 0,09 (decimal, b.s.). Esse fato pode estar associado ao fato de, que apesar de o modelo de Haider e Levenspiel (1989) incluir a esfericidade do produto, outros fatores como a massa e a área projetada não são considerados.

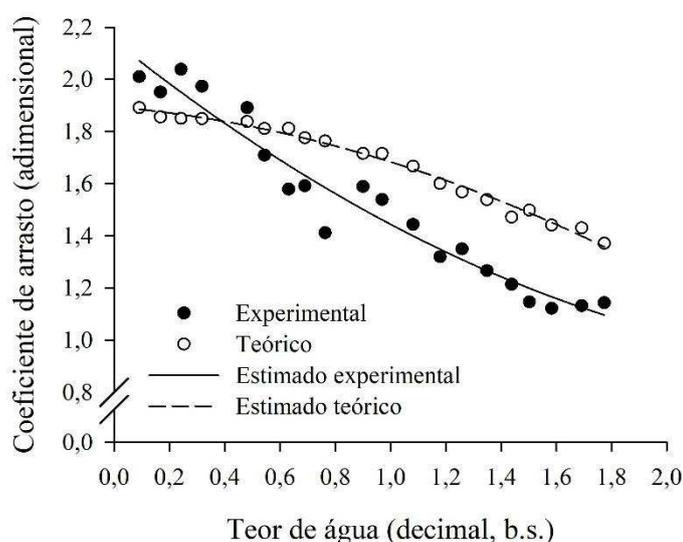


Figura 35 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto experimental e teórico para os frutos de café em função do teor de água.

Na Tabela 16, pode ser observado o resumo dos modelos de regressão não linear de melhor ajuste para velocidade terminal e coeficiente de arrasto teóricos para os frutos de café em função do teor de água. O modelo polinomial de segundo grau (Equação 15) apresentou o melhor ajuste para as variáveis. Os modelos ajustados apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação e representaram de forma satisfatória os fenômenos estudados.

Tabela 16 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados para as propriedades aerodinâmicas dos frutos de café.

Propriedade Aerodinâmica	β_0	β_1	β_2	R^2
Velocidade terminal	6,6288	0,6814 ⁺⁺	0,7652 ⁺⁺	0,9899 ^{**}
Coeficiente de arrasto	1,8943	-0,0935 ⁺	-0,1178 ⁺⁺	0,9877 ^{**}

⁺⁺ Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ⁺ Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; ^{**} Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

5.4 Propriedades aerodinâmicas dos grãos de café durante a secagem

5.4.1 Propriedades aerodinâmicas experimentais

A influência do teor de água sobre a velocidade terminal dos grãos de café pode ser observada na Figura 36. Assim como observados para os frutos de café, a velocidade terminal apresentou um decréscimo não linear com a redução do teor de água. Observa-se que os valores de velocidade terminal variaram de 5,4 a 3,9 m s⁻¹ para os teores de água entre 1,12 e 0,07 (decimal, b.s.).

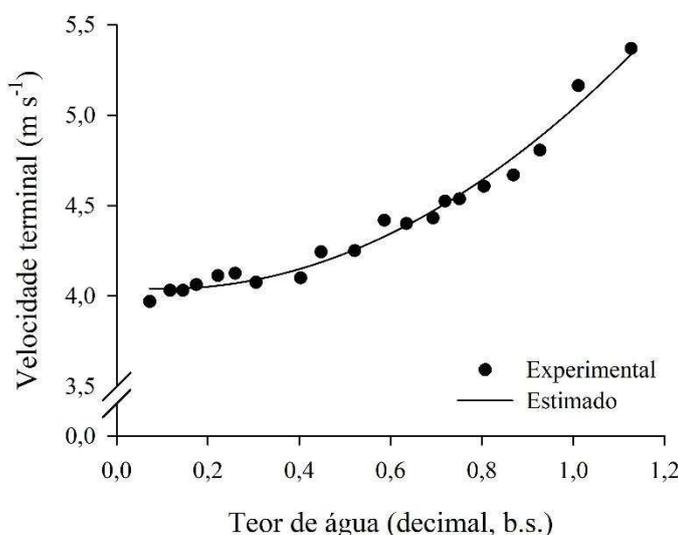


Figura 36 – Valores observados e estimados, da velocidade terminal dos grãos de café durante a secagem.

O aumento nos valores de velocidade terminal com o aumento do teor de água confirma a visão de que o aumento do teor de água aumenta a massa e o volume dos grãos, resultando no aumento da velocidade necessária para sua flutuação. A notável diferença entre as velocidades terminais dos frutos e dos grãos de café indica que a separação dessas frações por meios pneumáticos é viável. Os valores encontrados neste estudo são ligeiramente inferiores aos encontrados por Afonso Júnior et al. (2007) para cultivar Catuaí. Segundo Gupta et al. (2007) diferenças nas propriedades aerodinâmicas na mesma espécie, podem ser o resultado das propriedades individuais das cultivares e das diferentes condições de crescimento das culturas.

Na Figura 37, são apresentados os valores do coeficiente de arrasto real em função do teor de água. Esta variável também apresentou aumento não linear com a redução do teor de água. Os valores do coeficiente de arrasto variaram aproximadamente entre 2,4 a 2,3 para

o maior e menor teor de água, respectivamente. Esses valores implicam em um aumento de apenas 5% dessa variável ao longo de toda secagem.

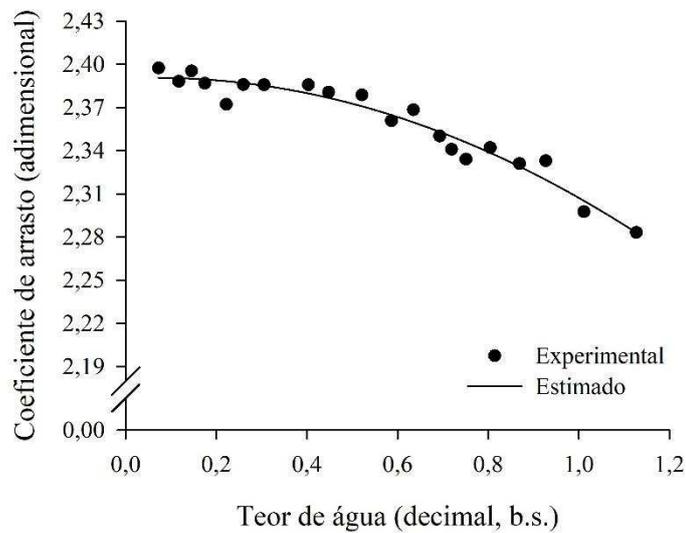


Figura 37 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto real dos grãos de café durante a secagem.

Segundo Krueger et al. (2015), o coeficiente de arrasto para objetos com bordas proeminentes, como ocorre na parte plana do grão de café, é essencialmente independente do número de Reynolds (para Reynolds > 1000), ou seja, não é afetado pela velocidade, pois segundo eles, essa variável passa a ser dependente apenas da geometria do objeto. Isso poderia explicar a baixa variação observada durante a secagem. Esses resultados podem ser confirmados ao se analisar o comportamento do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds (Figura 38).

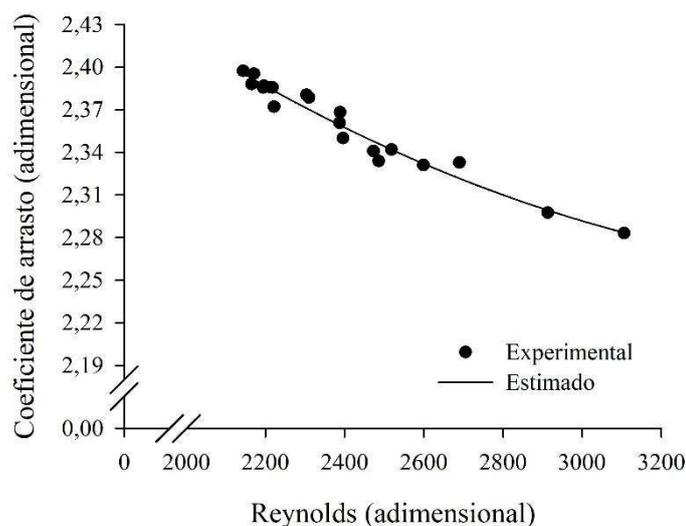


Figura 38 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto real dos frutos de café em função do número de Reynolds.

Na Tabela 17 podem ser observados os coeficientes dos modelos de regressão não linear de melhor ajuste para velocidade terminal e coeficiente de arrasto real para os grãos de café em função do teor de água, e do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds. O modelo polinomial de segundo grau (Equação 15) apresentou o melhor ajuste para as variáveis. Todos os modelos ajustados apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação e, portanto, representam de forma satisfatória os fenômenos estudados.

Tabela 17 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados para as propriedades aerodinâmicas dos grãos de café.

Propriedade Aerodinâmica	β_0	β_1	β_2	R^2
Velocidade terminal $f(U)$	4,0529	-0,2569 ⁺	1,2392 ⁺⁺	0,9799 ^{**}
Coeficiente de arrasto $f(U)$	2,3901	0,0128 ⁺	-0,0958 ⁺⁺	0,9486 ^{**}
Coeficiente de arrasto $f(Re)$	2,9451	-0,0004 ⁺⁺	4,5086e-8 ⁺	0,9598 ^{**}

U – Teor de água (decimal, b.s.); Re – Número de Reynolds (adimensional); f () – em função de; ++ Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; + Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

5.4.2 Propriedades aerodinâmicas teóricas

O comportamento da velocidade terminal teórica e experimental dos grãos de café durante a secagem podem ser observadas na Figura 39. Observa-se que os valores obtidos pelo modelo apresentam o mesmo comportamento dos valores experimentais. Nota-se, no entanto, uma subestimação dos valores reais durante toda a secagem.

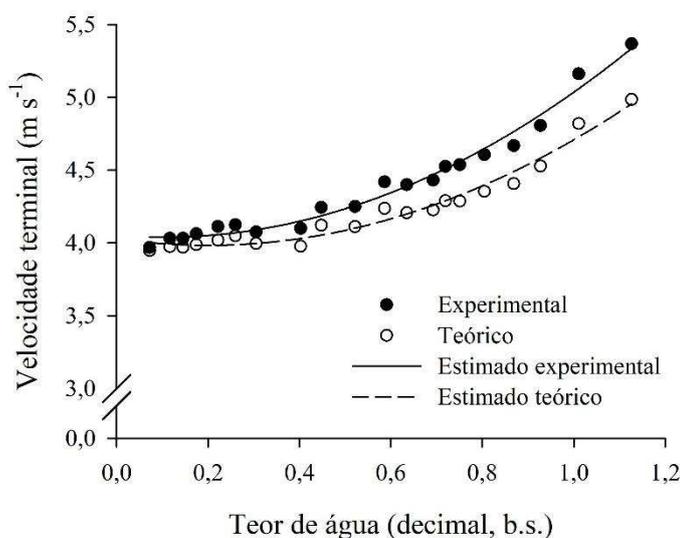


Figura 39 – Valores observados e estimados, da velocidade terminal experimental e teórica para os grãos de café em função do teor de água.

A exemplo do observado para os frutos de café, o modelo numérico utilizado para os grãos de café representa de forma satisfatória o fenômeno estudado. Os erros apresentados pelo modelo teórico variaram entre -0,5 e -7,0% em comparação com os valores experimentais. Esses valores são inferiores aos encontrados por Afonso Júnior et al. (2007) que encontraram erros de até 10,2% para os grãos de café arábica e de até 17% para os grãos de café robusta. Zanini et al. (2008) estudaram experimentalmente pelo método de Mohsenin (1986) e numericamente pelo método de Pettyjohn e Christiansen (1948) o comportamento aerodinâmico de grãos de milho e de feijão. Os autores determinaram os erros pelos métodos citados e obtiveram valores entre de 30,8 a 73,2 % para o milho, e de 31,3 a 40,3 % para o feijão, para essa variável.

Na Figura 40, são apresentados os valores dos coeficientes de arrasto teórico e experimental para os grãos de café durante a secagem. Verifica-se que o modelo teórico, superestima os valores experimentais para todos os teores de água. Observa-se que nos maiores teores de água, a diferença entre os coeficientes teóricos e experimentais foi mais pronunciada (16%). Isso pode ser atribuído às menores esfericidades apresentadas nos maiores teores de água para os grãos de café (aproximadamente 61%), pois o modelo proposto por Haider e Levenspiel (1989) foi elaborado para uma faixa de esfericidade entre 100 e 67%. Apesar disso, à média do coeficiente de arrasto teórico (2,55) foi próxima à encontrada para o coeficiente de arrasto experimental (2,36).

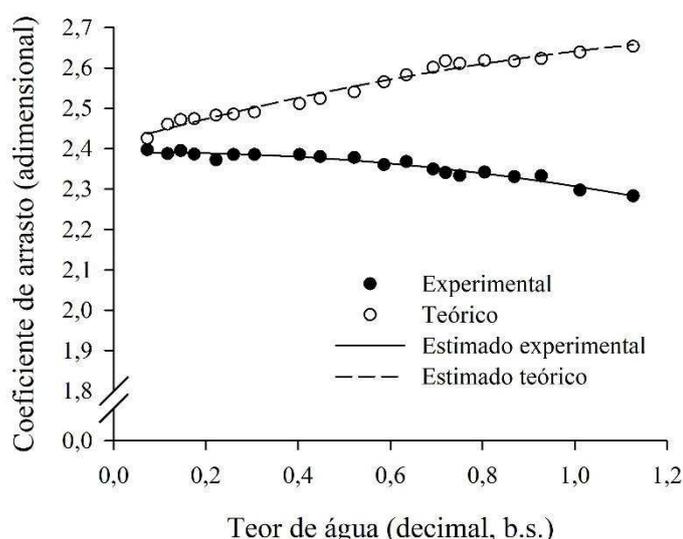


Figura 40 – Valores observados e estimados, do coeficiente de arrasto experimental e teórico para os grãos de café em função do teor de água.

O resumo dos modelos de regressão não linear de melhor ajuste para velocidade terminal e coeficiente de arrasto teóricos para os grãos de café em função do teor de água pode ser observado na Tabela 18. O modelo polinomial de segundo grau (Equação 15) apresentou o melhor ajuste para as variáveis. Nota-se que ambos os ajustes apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação, e, portanto, representam de forma adequada os fenômenos estudados.

Tabela 18 – Coeficientes dos modelos de regressão não linear ajustados para as propriedades aerodinâmicas dos grãos de café.

Propriedade Aerodinâmica	β_0	β_1	β_2	R^2
Velocidade terminal	4,0268	-0,4451 ⁺⁺	1,1264 ⁺⁺	0,9700 ^{**}
Coeficiente de arrasto	2,4141	0,3151 ⁺⁺	-0,0880 ⁺⁺	0,9775 ^{**}

⁺⁺ Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ^{**} Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e para as faixas de teor de água utilizadas neste trabalho, pode-se concluir que:

- 1) A redução do teor de água durante a secagem proporciona a redução da massa específica unitária dos frutos de café em 30%;
- 2) O tamanho e a forma dos frutos de café são influenciados pela redução do teor de água, promovendo redução da esfericidade, circularidade, área projetada, diâmetro geométrico e volume;
- 3) Os frutos de café apresentaram contração volumétrica de 40% durante o processo de secagem. A contração volumétrica é mais acentuada no começo do processo de secagem, tendendo a se estabilizar nos menores valores de teor de água;
- 4) Dentre os modelos empíricos testados que descrevem a contração volumétrica, nenhum apresentou ajuste satisfatório. Dessa forma foi proposto um novo modelo, nominado ARAUJO-COPACE, que representou de forma aceitável o fenômeno;
- 5) O coeficiente de atrito estático dos frutos de café aumentou linearmente com a redução do teor de água, independentemente do material. O material utilizado não apresentou influência significativa sobre o coeficiente de atrito estático, contudo, os maiores valores foram observados para os materiais com maior rugosidade;
- 6) A velocidade terminal experimental dos frutos de café apresentou redução ao longo do processo de secagem, ao passo que o coeficiente de arrasto apresentou tendência de aumento;
- 7) As propriedades aerodinâmicas teóricas dos frutos de café durante a secagem, encontradas neste estudo, apresentaram valores próximos aos experimentais representando de forma aceitável os fenômenos em função do teor de água. Os erros encontrados foram inferiores aos apresentados na maioria dos estudos;

- 8) A massa específica unitária dos grãos de café reduziu em 32% com o processo de secagem;
- 9) A redução do teor de água influencia o tamanho e a forma dos grãos de café, resultando em um ligeiro aumento da esfericidade e circularidade, e na redução do diâmetro geométrico e área projetada;
- 10) O volume dos grãos de café é reduzido ao longo do processo de secagem, resultando em uma contração volumétrica de aproximadamente 20%;
- 11) O modelo de Bala e Woods adaptado, dentre os testados, foi o que melhor representou o fenômeno de contração volumétrica dos grãos de café durante a secagem;
- 12) A redução do teor de água promove a redução do coeficiente de atrito estático dos grãos de café. O atrito dos grãos foi mais influenciado pelo teor de água do que pelo material que compunha a superfície. As superfícies de maior rugosidade apresentaram maiores valores do coeficiente de atrito estático;
- 13) A velocidade terminal experimental dos grãos de café apresenta redução ao longo da secagem, enquanto o coeficiente de arrasto apresenta aumento;
- 14) As propriedades aerodinâmicas teóricas dos grãos de café apresentaram resultados semelhantes aos experimentais, representando de forma adequada os fenômenos investigados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, G.F., Pereira, C.C., Malta, M.R., Clemente, A.C.S., Coelho, L.F.S., Rosa, S.D.V.F. Changes in the coffee grain color related to the post-harvest operations. **Coffee Science**, v.10, p.429-436, 2015.
- Afonso Júnior, P.C., Corrêa, P.C., Pinto, F.A.C., Queiroz, D.M. Aerodynamic properties of coffee cherries and beans. **Biosystems Engineering**, v.98, p.39-46, 2007.
- Afonso Júnior, P.C., Corrêa, P.C., Pinto, F.A.C., Sampaio, C.P. Shrinkage Evaluation of Five Different Varieties of Coffee Berries during the Drying Process. **Biosystems Engineering**, v.86, p.481-485, 2003.
- Agrawal, K.K., Clary, B.L., Schroeder, E.W. Mathematical Models of Peanut Pod Geometry. **Transactions of ASAE**, v.16, p.315-319, 1973.
- Akaaimo, D. I., Raji, A. O. Some physical and engineering properties of prosopis africana seed. **Biosystems Engineering**, v.95, p.197-205, 2006.
- Amorim, H.V., Josephson, R.V. Water soluble protein and nonprotein components of Brazilian green coffee beans. **Journal of Food Science**, v.40, p.1179-1184, 1975.
- Andalib, M., Zhu, J., Nakhla, G. Terminal settling velocity and drag coefficient of biofilm-coated particles at high Reynolds numbers. **AIChE Journal**, v.56, p.2598-2606, 2010.
- Angeloni, G., Guerrini, L., Masella, P., Bellumori, M., Daluiso, S., Parenti, A., Innocenti, M. What kind of coffee do you drink? An investigation on effects of eight different extraction methods. **Food Research International**, v.116, p.1327-1335, 2019.
- Araujo, M.E.V., Barbosa, E.G., Gomes, F.A., Teixeira, I.R., Lisboa, C.F., Araujo, R.S.L, Corrêa, P.C. Physical properties of sesame seeds harvested at different maturation stages and thirds of the plant. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v.79, p.495-502, 2018

- Araujo, W.D., Goneli, A.L.D., Orlando, R.C., Martins, E.A.S., Hartman Filho, C.P. Propriedades físicas dos frutos de amendoim durante a secagem. **Revista Caatinga**, v.28, p.170-180, 2015.
- Araujo, W.D., Goneli, A.L.D., Souza, C.M.A., Gonçalves, A.A., Vilhasanti, H.C.B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.279-286, 2014.
- ASTM D 792. **Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement**. Philadelphia, 1991.
- Atallah, S.S., Gómez, M.I., Jaramillo, J. A Bioeconomic Model of Ecosystem Services Provision: Coffee Berry Borer and Shade-grown Coffee in Colombia. **Ecological Economics**, v.144, p.129-138, 2018.
- Avhad, M.R., Marchetti, J.M. Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. **Industrial Crops and Products**, v.91, p.76-87, 2016.
- Aviara, N.A., Power, P.P., Abbas, T. Moisture-dependent physical properties of Moringa oleifera seed relevant in bulk handling and mechanical processing. **Industrial Crops and Products**, v.42, p.96-104, 2013.
- Aydyn, C. Physical properties of hazel nuts. **Biosystems Engineering**, v.80, p.297-303, 2002.
- Azmir, J., Hou, Q., Yu, A. CFD-DEM simulation of drying of food grains with particle shrinkage. **Powder Technology**, v.343, p.792-802, 2019.
- Bala, B.K., Woods, J.L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.30, p.235-244, 1984.
- Ballesteros, L.F., Teixeira, J.A., Mussato, S.I. Chemical, functional and structural properties of spent coffee grounds and coffee silver skin. **Food and Bioprocess Technology**, v.7, p.3493-3503, 2014.

- Bande, Y. M., Adam, N. M., Azni, Y., Jamarei, O. Moisture dependent physical and compression of bitter melon (*Citrullus colocynthis lanatus*) seeds. **International Journal of Agricultural Research**, v.7, p.243-254, 2012.
- Barnwal, P., Kadam, D.M., Singh, K.K. Influence of moisture content on physical properties of maize. **International Agrophysics**, v.26, p.331-334, 2011.
- Baumler, E., Cuniberti, A., Nolasco, S.M., Riccobene, I.C. Moisture dependent physical and compression properties of safflower seed. **Journal of Food Engineering**, v.72, p.134-140, 2006.
- Belay, A., Ture, K., Redi, M., Asfaw, A. Measurement of caffeine in coffee beans with UV/vis spectrometer. **Food Chemistry**, v.108, p.310-315, 2008.
- Borém, F.M., Coradi, P.C., Saath, R., Oliveira, J.A. Qualidade do café natural e despulpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, p.1609-1615.
- Botelho, F.M., Corrêa, P.C., Botelho, S.C.C., Vargas-Elías, G.A., Almeida, M.D.S.D., Oliveira, G.H.H. Propriedades físicas de frutos de café robusta durante a secagem: determinação e modelagem. **Coffee Science**, v.11, p.65-75, 2016.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399p.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. The AVI Publishing Company, Westport, Connecticut, USA. 1992. 468p.
- Brown, P.P., Lawler, D.F. Sphere Drag and Settling Velocity Revisited. **Journal of Environmental Engineering**, v.129, p.222-231, 2003.
- Bruyn, D., Zhang, S.J., Pothakos, V., Torres, J., Lambot, C., Moroni, A.V., Callanan, M., Sybesma, W., Weckx, S., Vuyst, L. Exploring the Impacts of Postharvest Processing on

- the Microbiota and Metabolite Profiles during Green Coffee Bean Production. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 83, e02398-16, 2017.
- Bytof, G., Knopp, S.E., Schieberle, P., Teutsch, I., Selmar, D. Influence of processing on the generation of γ -aminobutyric acid in green coffee beans. **European Food Research and Technology**, v.220, p.245-250, 2005.
- Calil Júnior, C., Araújo, E.C., Nascimento, J.W. **Silos metálicos multicelulares**. São Carlos, USP, 1997, 178p.
- Cam, I.B., Balci-Torun, F., Topuz, A., Ari, E., Deniz, I.G., Genc, I. Physical and chemical properties of cow cockle seeds (*Vaccaria hispanica* (Mill.) Rauschert) genetic resources of Turkey. **Industrial Crops and Products**, v.126, p.190-200, 2018.
- Cano-Higueta, D.M., Villa-Vélez, H.A., Telis-Romero, J., Váquiro, H.A., Telis, V.R.N. Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: a thermodynamic approach. **Food and Bioproducts Processing**, v.93, p.19-28. 2015.
- Cardona, Y.P., Oliveiros, C.E., Arias, D.F., Alvarez, F., Devia, A. Epicarp characterization of coffee fruits by atomic force microscopy. **Journal of Food Engineering**, v.86, p.167-171, 2008.
- Carman, K. Some physical properties of lentil seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.63, p.87-92, 1996.
- Cheng, B., Furtado, A., Smyth, H.E., Henry, R.J. Influence of genotype and environment on coffee quality. **Trends in Food Science & Technology**, v.57, p.20-30, 2016.
- Cheng, N. Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles. **Powder Technology**, v.189, p.395-398, 2009.
- Chhabra, R.P., Agarwal, L., Sinha, N.K. Drag on non-spherical particles: an evaluation of available methods. **Powder Technology**, v.101, p.288-295, 1999.

- Christiansen, E.B., Barker, D.H. The effect of shape and density on the free settling of particles at high Reynolds numbers. **AIChE Journal**, v.11, p.145-151, 1965.
- Ciaramelli, C., Palmioli, A., Airoidi, C. Coffee variety, origin and extraction procedure: Implications for coffee beneficial effects on human health. **Food Chemistry**, v. 278, p.47-55, 2019.
- Clarke, R.J., Macrae, R. **Coffee Chemistry**. Elsevier Applied Science, London. 1990. 306p.
- Combes, M.C., Joet, T., Lashermes, P. Development of a rapid and efficient DNA-based method to detect and quantify adulterations in coffee (Arabica versus Robusta). **Food Control**, v.88, p.198-206, 2018.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim do café**. Brasília: CONAB, 2018. (Análise mensal, março, 2018). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativis/ta/analises-do-mercado/historico-mensal-de-cafe/item/download/15885_5fb8c6a72d57cbe7b21f4dc2de209c95>. Acesso em: 03, dez., 2018.
- Contreras-Calderón, J., Mejía-Dias, D., Martínez-Castaño, M., Bedoya-Ramírez, D., López-Rojas, N., Gómez-Narváez, F., Medina-Pineda, Y., Veja-Castro, O. Evaluation of antioxidant capacity in coffees marketed in Colombia: Relationship with the extent of non-enzymatic browning. **Food Chemistry**, v.209, p.162-170, 2016.
- Corrêa P.C., Afonso Júnior, A.C., Queiroz, D.M., Sampaio, C.P., Cardoso, J.B. Variação das dimensões características e da forma dos frutos de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p.466-470, 2002.
- Corrêa, P. C., Oliveira, G. H. H., Rodrigues, A. P. L., Campos, S. C., Botelho, F. M. Hygroscopic equilibrium and physical properties evaluation affected by parchment presence of coffee grain. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.8, p.694-702, 2010a.

- Corrêa, P.C., Oliveira, G.H.H., Botelho, F.M., Goneli, A.L.D., Carvalho, F.M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v.57, p.595-601, 2010b.
- Corrêa, P.C., Botelho, F.M., Botelho, S.C.C., Goneli, A.L.D. Isotermas de sorção de água de frutos de *Coffea canefora*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.1047-1052, 2014.
- Corrêa, P.C., Ribeiro, D.M., Resende, O., Afonso Júnior, P.C., Goneli, A.L.D. Mathematical modeling for representation of coffee berry volumetric shrinkage. In: International Drying Symposium, 14., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2004. (CD ROM).
- Corrêa, P.C., Ribeiro, D.M., Resende, O., Botelho, F.M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.665-670, 2006.
- Coskuner, Y., Karababa, E. Physical properties of coriander seeds (*Coriandrum sativum* L.). **Journal of Food Engineering**, v.80, p.408-416, 2007.
- Costa, J.M.G., Silva, E.K., Hijo, A.A.C.T, Azevedo, V.M., Borges, S.V. Physical and Thermal Stability of Spray-Dried Swiss Cheese Bioaroma Powder. **Drying Technology**, v.33, p.346-354, 2015.
- Couto, S.M., Magalhães, A.C., Queiroz, D.M., Bastos, I.T. Parâmetros relevantes na determinação da velocidade terminal de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, p.141-148, 2003.
- Couto, S.M., Santos, A.E.O., Vieira, S.M.J., Silva, D.J.P. Determination of drag force and terminal velocity of coffee fruits using finite element technique. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, p.274-283, 2004.
- Craig, A.P., Botelho, B.G., Oliveira, L.S., Franca, A.S. Mid infrared spectroscopy and chemometrics as tools for the classification of roasted coffees by cup quality. **Food Chemistry**, v.245, p.1052-1061, 2018.

- Dadi, D., Mengistie, E., Terefe, G., Getahun, T., Haddis, A., Birke, W., Beyene, A., Luis, P., Bruggen, B.V. Assessment of the effluent quality of wet coffee processing wastewater and its influence on downstream water quality. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v.18, p.201-211, 2018.
- Dankowska, A., Domagala, A., Kowalewski, W. Quantification of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* var. *robusta* concentration in blends by means of synchronous fluorescence and UV-Vis spectroscopies. **Talanta**, v.172, p.215-220, 2017.
- Dash, A.K., Pradhan, R.C., Das, L.M., Naik, S.N. Some physical properties of simarouba fruit and kernel. **International Agrophysics**, v.22, p.111-116, 2008.
- Deshpande, S.D., Bal, S., Ojha, T.P. Physical properties of soybean. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.56, p.89-98, 1993.
- Dessalegn, Y., Labuschagne, M.T., Osthoff, G., Herselman, L. Genetic diversity and correlation of bean caffeine content with cup quality and green bean physical characteristics in coffee (*Coffea arabica* L.). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.88, p.1726-1730, 2008.
- Dilmac, M., Tarhan, S., Polatci, H. Aerodynamic properties of Faba bean (*Vicia faba* L.) seeds. **Legume Research**, v.39, p.379-384, 2016.
- Donovan, N.K., Foster, K.A., Salinas, C.A.P. Analysis of green coffee quality using hermetic bag storage. **Journal of Stored Products Research**, v.80, p.1-9, 2019.
- Duarte, G.S., Pereira, A.A., Farach, A. Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods. **Food Chemistry**, v.118, p.851-855, 2010.
- Durán, C.A.A., Tsukui, A., Santos, F.K.F., Martinez, S.T., Bizzo, H.R., Resende, C.M. Café: Aspectos gerais e seu aproveitamento para além da bebida. **Revista Virtual de Química**, v.9, p.107-134, 2017.

- Dursun, I., Tugrul, K.M., Dursun, E. Some physical properties of sugarbeet seed. **Journal of Stored Products Research**, v.43, p.149-155, 2007.
- Eissa, A.H.A. Physical and aerodynamic properties of flaxseeds for proper separation by using airsistem. **Journal of Food Process Engineering**, v.34, p.983-1012, 2011.
- Esquivel, P., Jiménez, V.M. Functional properties of coffee and coffee by-products. **Food Research International**, v.46, p.488-495, 2012.
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nation. **FAOSTAT**. Rome: FAO, 2018. Disponível em: < <http://www.fao.org/faostat/en/#home>>. Acesso em: 01, dez., 2018.
- Farah, A., Monteiro, M., Donangelo, C.M., Lafay S. Chlorogenic Acids from green coffee extract are highly bioavailable in humans. **Journal of Nutrition**, v.138, p.2309-2315, 2008.
- Figueiredo, A.K., Baumler, E., Riccobene, I.C., Nolasco, S.M. Moisture-dependent engineering properties of sunflower seeds with different structural characteristics. **Journal of Food Engineering**, v.102, p.58-65, 2011.
- Franca, A.S., Mendonça, J.C.F., Oliveira, S.D. Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. **LWT – Food Science and Technology**, v.38, p.709-715, 2005.
- Garnayak, D.K., Pradhan, R.C., Naik, S.N., Bhatnagar, N. Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (*Jatropha curcas* L.). **Industrial Crops and Products**, v.27, p.123-129, 2008.
- Geeraert, L., Berecha, G., Honnay, O., Aerts, R. Organoleptic quality of Ethiopian Arabica coffee deteriorates with increasing intensity of coffee forest management. **Journal of Environmental Management**, v.231, p.282-288, 2019.

- Gely, M.C., Pagano, A.M. Effect of moisture content on engineering properties of sorghum grains. **Agricultural Engineering International**, v.19, p.200-209, 2017.
- Ghodake, H.M, Goswami, T.K., Chakraverty, A. Moisture sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. **Journal of Food Engineering**, v.78, p.827-935, 2007.
- Goneli, A.L.D., Corrêa, P.C., Magalhães, F.E.A., Baptestini, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum – Agronomia**, v.33, p.1-8, 2011.
- Gupta, R.K., Arora, H.G., Sharma, R. Aerodynamic properties of sunflower seed (*Helianthus annuus* L.). **Journal of Food Engineering**, v.79, p.899-904, 2007.
- Gupta, R.K., Das, S.K. Friction coefficients of sunflower seed and kernel on various structural surfaces. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.71, p.175-180, 1998.
- Gursoy, S., Guzel, E. Determination of physical properties of some agricultural grains. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v.2, p.492-498, 2010.
- Haider, A., Levenspiel, O. Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles. **Powder Technology**, v.58, p.63-70, 1989.
- Hartman, M., Trnka, O., Svoboda, K. Free Settling of Nonspherical Particles. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.33, p.1979-1983, 1994.
- Hauth, M.R., Botelho, F.M., Hoscher, R.H., Botelho, S.C.C., Oliveira, G.H.H. Physical properties of different soybean cultivars during drying. **Engenharia Agrícola**, v.38, p.590-598, 2018.

- ICO – International Coffee Organization. **Trade statistics tables**. London: ICO, 2018.
Disponível em: <http://www.ico.org/trade_statistics.asp?section=Statistics>. Acesso em: 01, dez., 2018.
- Illy, A., Viani, R. **Espresso coffee: The Chemistry of Quality**. Academic Press, London, 1995.
- Izli, N. Effect of moisture on the physical properties of three varieties of kenaf seeds. **Journal of Food Science and Technology**, v.52, p.3254-3263, 2015.
- Janissen, B., Huynh, T. Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v.128, p.110-117, 2018.
- Jeon, J.S., Kim, H.T., Jeong, I.H., Hong, S.R., Oh, M.S., Park, K.H., Shim, J.H., Abd El-Aty, A.M. Determination of chlorogenic acids and caffeine in homemade brewed coffee prepared under various conditions. **Journal of Chromatography**, v.1064, p.115-123, 2017.
- Joet, T., Laffargue, A., Descroix, F., Doulebeau, S., Bertrand, B., Kochko, A., Dussert, S. Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. **Food Chemistry**, v.118, p.693-701, 2010.
- Kalkan, F., Kara, M. Handling, frictional and technological properties of wheat as affected by moisture content and cultivar. **Powder Technology**, v.213, p.116-122, 2011.
- Kara, M., Bastaban, S., Ozturk, I., Kalkan, F., Yildiz, C. Moisture dependent frictional and aerodynamic properties of safflower seeds. **International Agrophysics**, v.26, p.203-215, 2012.
- Karimi, M., Kheiralipour, K., Tabatabaeefar, A., Khobakht, G.M., Naderi, M., Heidarbeigi, K. The effect of moisture content on physical properties of wheat. **Pakistan Journal of Nutrition**, v.8, p.90-95, 2009.

- Kashaninejad, M., Ahmadi, M., Daraei, A., Chabra, D. Handling and frictional characteristics of soybean as a function of moisture content and variety. **Powder Technology**, v.188, p.1-8, 2008.
- Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., Tabil, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, p.98-108, 2007.
- Khodabakhshian, R., Emadi, B., Abbaspour-Fard, M.H. The effect of variety, size and moisture content of sunflower seed and its kernel on their terminal velocity, drag coefficient and Reynold's number. **International Journal of Food Properties**, v.15, p.262–273, 2012.
- Khodabakhshian, R., Emadi, B., Abbaspour-Fard, M.H., Golzarian, M.R. Aerodynamic separation and cleaning of pomegranate arils from rind and white segments (locular septa). **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.17, p.61-68, 2018.
- Khodaei, J., Akhijahani, H.S. Some physical properties of rasa grape (*Vitis vinifera* L.). **Words Applied Sciences Journal**, v.18, p.818-825, 2012.
- Khraisheh, M.A.M., Mcminn, W.A.M., Magee, T.R.A. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. **Food Research International**, v.34. p.497-503, 2004.
- Kibar, H., Ozturk, T. Physical and mechanical properties of soybean. **International Agrophysics**, v.22, p.239-244, 2008.
- Kibar, H., Ozturk, T. The effect of moisture content on the physico-mechanical properties of some hazelnut varieties. **Journal of Stored Products Research**, v.45, p.14-18, 2009.
- Kleinwacher, M., Bytof, G., Selmar, D. Coffee Beans and Processing, p.73-81 .In: **Coffee in health and Disease Prevention**. 1st edition, Academic Press. 2015, 1080p.

- Knopp, S.E., Bytof, G., Selmar, D. Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans. **European Food Research and Technology**, v.223, p.195-201, 2006.
- Knysak, D. Volatile compounds profiles in unroasted Coffea arabica and Coffea canephora beans from different countries. **Food Science and Technology**, v.37, p.444-448, 2017.
- Koç, B., Eren, I., Ertekin, F.K. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. **Journal of Food Engineering**, v.85, p.340-349, 2008.
- Krokida, M.K., Maroulis. Z.B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v.15, p.2441-2458, 1997.
- Krueger, B., Wirtz, S., Scherer, V. Measurement of drag coefficients of non-spherical particles with a camera-based method. **Powder Technology**, v.278, p.157-170, 2015.
- Kurzrock, T., Kolling-Speer, I., Speer, K. Effects of controlled stored on the lipid fraction of green Arabica coffee beans. **Food Chemistry**, v.66, p.161-168, 2004.
- Laviola, B.G., Mauri, A.L., Martinez, H.E.P., Araújo, E.F., Neves, Y.P. Influência da adubação na formação de grãos mocas e no tamanho de grãos de café (Coffea arábica L.). **Coffee Science**, v.1, p.36-42, 2006.
- Liu, C., Yang, Q., Linforth, R., Fisk, I.D., Yang, N. Modifying Robusta coffee aroma by green bean chemical pre-treatment. **Food Chemistry**, v.272, p.251-257, 2019.
- Manimehalai, N., Viswanathan, R. Physical properties of fuzzy cottonseeds. **Biosystems Engineering**, v.95, p.207-217, 2006.
- Mansouri, A., Mirzabe, A.H., Ráufi, A. Physical properties and mathematical modeling of melon (Cucumis melo L.) seeds and kernels. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.16, p.218-226, 2017.

- Marathe, M.N., Jaybhaye, R.V., More, P.G. Aerodynamic properties of sesame (cv. N-8) as affected by moisture content of seed. **Food Science Research Journal**, v.8, p.105-111, 2017.
- Martinez, S.J., Bressani, A.P.P., Miguel, M.G.C.P., Dias, D.R., Schwan, R.F. Different inoculation methods for semi-dry processed coffee using yeasts as starter cultures. **Food Research International**, v.102, p.333-340, 2017.
- Matouk, A.M., Abd El-Latif, S.M., Tharwat, A. Aerodynamics and mechanical properties of some oil producing crops. **Journal of Agricultural Science**. v.33, p.4195-4211, 2008.
- Mendonça, J. C. F., Franca, A. S., Oliveira, L. S. Physical characterization of non-defective and defective Arabica and Robusta coffees before and after roasting. **Journal of Food Engineering**, v.92, p.474-479, 2009.
- Mendonça, L.M.V.L. Pereira, R.G.F.A., Mendes, A.N.G. Marques, E.R. Composição química de grãos crus de cultivares de Coffea arábica L. suscetíveis e resistentes à Hemileia vastatrix Berg et Br. **Ciência e Agrotecnologia**, v.31, p.413-419, 2007.
- Mendonça, L.M.V.L. Pereira, R.G.F.A., Mendes, A.N.G. Parâmetros bromatológicos de grãos de café crus e torrados de cultivares de café (Coffea arábica L.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, p.239-243, 2005.
- Mohapatra, D., Rao, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v.66, p.513-518, 2005.
- Mohsenin, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- Montavon, P., Mauron, A.F., Duruz, E. Changes in green coffee protein profiles during roasting. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.51, p.2335-2343, 2003.

- Moreira, S.M., Chaves, M., Oliveira, L. Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.9, p.22-24, 1985.
- Morgano, M.A., Faria, C.G., Ferrão, M.F., Bragagnolo, N., Ferreira, M.M.C. Determinação de proteína em café cru por espectroscopia NIR e regressão PLS. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, p.25-31, 2005.
- Morgano, M.A., Faria, C.G., Ferrão, M.F., Bragagnolo, N., Ferreira, M.M.C. Determinação de açúcar total em café cru por espectroscopia no infravermelho próximo e regressão por mínimos quadrados parciais. **Química Nova**, v.30, p.346-350, 2007.
- Munder, S., Argyropoulos, D., Muller, J. Class-based physical properties of air-classified sunflower seeds and kernels. **Biosystems Engineering**, v.164, p.124-134, 2017.
- Muschler, R.G. Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. **Agroforestry Systems**, v.51, p.131-139, 2001.
- Mussatto, S.I., Machado, E.M.S., Martins, S., Teixeira, J.A. Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. **Food and Bioprocess Technology**, v.4, p.661-672, 2011.
- Nalbandi, H., Seiedlou, S., Ghassemzadeh, H.R. Aerodynamic properties of *Turgenia latifolia* seeds and wheat kernels. **International Agrophysics**, v.24, p.57-61, 2010.
- Narita, Y., Inouye, K. Review on utilization and composition of coffee silverskin. **Food Research International**, v.61, p.16-22, 2014.
- O'keefe, J.H., Dinicolantonio, J.J., Lavie, C.J. Coffee for Cardioprotection and Longevity. **Progress in Cardiovascular Diseases**, v.60, p.1-9, 2018.
- Ochoa, M.R., Kessler, A.G., Pirone, B.N., Márquez, C.A., Michelis, A. Analysis of shrinkage phenomenon of whole sweet cherry fruits (*Prunus avium*) during convective

- dehydration with very simple models. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.657-661, 2007.
- Oliveira, G.H.H, Corrêa, P.C., Santos, F.L., Vasconcelos, W.L., Calil Júnior, C., Baptestini, F.M., Vargas-Elías, G.A. Physical characterization of coffee after roasting and grinding. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, p.1813-1828, 2014.
- Oliveira, G.H.H., Corrêa, P.C., Botelho, F.M., Goneli, A.L.D., Afonso Júnior, P.C., Campos, S.C. Modeling of the shrinkage kinetics of coffee berries during drying. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v.33, p.423-428, 2011.
- Otero, J., Arguello, R., Oviedo, J.D., Ramírez, M. Explaining coffee price differentials in terms of chemical markers: Evidence from a pairwise approach. **Economic Modelling**, v.72, p.190-201, 2018.
- Pereira, G.V.M., Carvalho Neto, D.P., Magalhães Junior, A.I., Vásquez, Z.S., Medeiros, A.B.P., Vandenberghe, L.P.S., Soccol, C.R. Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans – A review. **Food Chemistry**, v.272, p.441-452, 2019.
- Pereira, G.V.M., Soccol, V.T., Brar, S.K., Ensei Neto, Soccol, C.R. Microbial ecology and starter culture technology in coffee processing. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.57, p.2775-2788, 2017.
- Peshev, D., Mitev, D., Peeva, L., Peev, G. Valorization of spent coffee grounds – A new approach. **Separation and Purification Technology**, v.192, p.271-277, 2018.
- Pettyjohn, E.S., Christiansesn, E.B. Effect of particle shape on free-settling rates of isometric particles. **Chemical Engineering Progress**, v.44, p.157-172, 1948.
- Pradhan, R.C., Naik, S.N., Bhatnagar, N., Swain, S.K. Moisture-dependent physical properties of Karanja (*Pongamia pinnata*) kernel. **Industrial Crops and Products**, v.28, p.155-161, 2008.

- Pradhan, R.C., Naik, S.N., Bhatnagar, N., Vijay, V.K. Moisture-dependent physical properties of jatropha fruit. **Industrial Crops and Products**, v.29, p.341-347, 2009.
- Pujol, D., Liu, C., Gominho, J., Olivella, M.À., Fiol, N. Villaescusa, I., Pereira, H. The chemical composition of exhausted coffee waste. **Industrial Crops and Products**, v.50, p.423-429, 2013.
- Rahman, S. **Food properties handbook**. Boca Ratón: CRC Press LLC, 1995. 500p.
- Ramashia, S.E., Gwata, E.T., Meddows-Taylor, S., Anyasi, T.A., Jideani, A.I.O. Some physical and functional properties of finger millet (*Eleusine coracana*) obtained in sub-Saharan Africa. **Food Research International**, v.104, p.110-118, 2018.
- Ramos, I. N., Brandão, T. R. S., Silva, C. L. M. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. **Food Science and Technology International**, v.9, p.201-206, 2003.
- Ramos, I.N., Brandão, T.R.S., Silva, C.L.M. Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes. **Journal of Food Engineering**, v.67, p.195-203, 2005.
- Ramos, I.N., Brandão, T.R.S., Silva, C.L.M. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. **Food Science and Technology International**, v.9, p.201-206, 2003.
- Ratti, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, v.23, p.91-105, 1994.
- Razavi, S.M.A., Rafe, A., Moghaddam, T.M., Amini, A.M. The physical properties of pistachio nut and kernel as a function of moisture content and variety: Part II. Gravimetric properties. **Journal of Food Engineering**, v.81, p.218-225, 2007.
- Resende, O., Corrêa, P.C., Goneli, A.L.D., Cecon, P.R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. **Revista brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.7, p.15-24, 2005.

- Resende, O., Corrêa, P.C., Jarén, C., Moure, A.J. Bean moisture diffusivity and drying kinetics: a comparison of the liquid diffusion model when taking into account and neglecting grain shrinkage. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.5, p.51-58, 2007.
- Restuccia, D., Spizzirri, U.G., Parisim O.I., Cirillo, G., Picci, N. Brewing effect on levels of biogenic amines in different coffee samples as determined by LC-UV. **Food Chemistry**, v.175, p.143-150, 2015.
- Ribeiro, D.M., Corrêa, P.C., Rodrigues, D.H., Goneli, A.L.D. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, p.611-617, 2005.
- Rosendahl, L. Using a multi-parameter particle shape description to predict the motion of non-spherical particle shapes in swirling flour. **Applied Mathematical Modeling**, v.24, p.11-25, 2000.
- Rubayiza, A.B., Meurens, M. Chemical discrimination of arabica and robusta coffees by Fourier transform Raman spectroscopy. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.53, p.4654-4659, 2005.
- Santos Neto, A.L., Carvalho, M.L.M., Oliveira, J.A., Fraga, A.C., Souza, A.A. Use of densimetric table to improve the quality of commercial castor bean seeds. **Revista Brasileira de Sementes**, v.34, p.549-555, 2012.
- Santos, K.M., Moura, M.F.V., Azevedo, F.G., Lima, K.M.G., Raimundo Junior, I.M., Pasquini, C. Classification of Brazilian Coffee Using Near-Infrared Spectroscopy and Multivariate Calibration. **Analytical Letters**, v.45, p.774-781, 2012.
- Santos, M.A., Chalfoun, S.M., Pimenta, C.J. Influence of the wet processing and drying types on chemical and physicochemical composition of coffee (*Coffea arabica* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, p.213-218, 2009.

- Semen, S., Mercan, S., Yayla, M., Açikkol, M. Elemental composition of green coffee and its contribution to dietary intake. **Food Chemistry**, v.215, p.92-100, 2017.
- Shafaei, S.M., Kamgar, S. A comprehensive investigation on static and dynamic friction coefficients of wheat grain with the adoption of statistical analysis. **Journal of Advanced Research**, v.8, p.351-361, 2017.
- Shahbazi, F. Evaluation and modeling of aerodynamic properties of mung bean seeds. **International Agrophysics**, v.29, p.121-126, 2015.
- Shahbazi, F., Valizadeh, S., Dowlatshah, A. Aerodynamic properties of Makhobeli, triticale and wheat seeds. **International Agrophysics**, v.28, p.389-394, 2014.
- Sharanagat, V.S., Goswami, T.K. Effect of moisture content on physiomechanical properties of coriander seeds (*Coriandrum sativum*). **Agricultural Engineering International**, v.16, p.166-172, 2014.
- Sharma, V., Pradhan, R.C., Naik, S.N., Bhatnagar, N., Kureel, R.S. Physical properties of tung seed: An industrial oil yielding crop. **Industrial Crops and Products**, v.33, p.440-444, 2011.
- Sherpherd, H., Bhardwaj, R.K. Moisture dependent physical properties of pigeon pea. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.35, p.227-234, 1986.
- Silva, F.S., Corrêa, P.C., Calil Júnior, C., Gomes, F.C. Análise dos coeficientes de atrito estático e dinâmico de grãos de café com pergaminho, determinados em diferentes equipamentos, teores de água e materiais de parede. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, p.143-156, 2011.
- Simplício, M., Braga, M. Parâmetros aerodinâmicos que influenciam na separação de amendoim. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.1, p.66-72, 1999.
- Singh, K. P., Mishra, H. N., Saha, S. Moisture-dependent properties of barnyard millet grain and kernel. **Journal of Food Engineering**, v.96, p.598-606, 2010.

- Singh, P. C., Singh, R. K., Bhamidipati, S., Singh, S. N., Barone, P. Thermophysical properties of fresh and roasted coffee powders. **Journal of Food Process Engineering**, v.20, p.31-50, 1997.
- Sirisomboon, P., Kitchaiya, P., Pholpho, T., Mahuttanyavanitch, W. Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. **Biosystems Engineering**, v.97, p.201-207, 2007.
- Sokhansanj, S., Lang, W. Prediction of kernel and bulk volume of wheat and canola during adsorption and desorption. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.63, p.129-136, 1996.
- Sologubik, C.A., Campañone, L.A., Pagano, A.M., Gely, M.C. Effect of moisture content on some physical properties of barley. **Industrial Crops and Products**, v.43, p.762-767, 2013.
- Solomon, W.K., Zewdu, A.D. Moisture-dependent physical properties of niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) seed. **Industrial Crops and Products**, v.29, p.165-170, 2009.
- Speer, K., Kolling-Speer, I. The lipid fraction of the coffee bean. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18, p.201-2016, 2006.
- Stalmach, A., Mullen, W., Nagai, C., Crozier, A. On-line HPLC analysis of the antioxidant activity of phenolic compounds in brewed, paper-filtered coffee. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18, p.253-262, 2006.
- Suárez-Quiroz, M.L., Campos, A.A., Alfaro, G.V., González-Ríos, O., Villeneuve, P., Figueroa-Espinoza, M.C. Isolation of green coffee chlorogenic acids using activated carbon. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.33, p.55-58, 2014.
- Sunarharum, W.B., Williams, D.J., Smyth, H.E. Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. **Food Research International**, v.62, p.315-325, 2014.

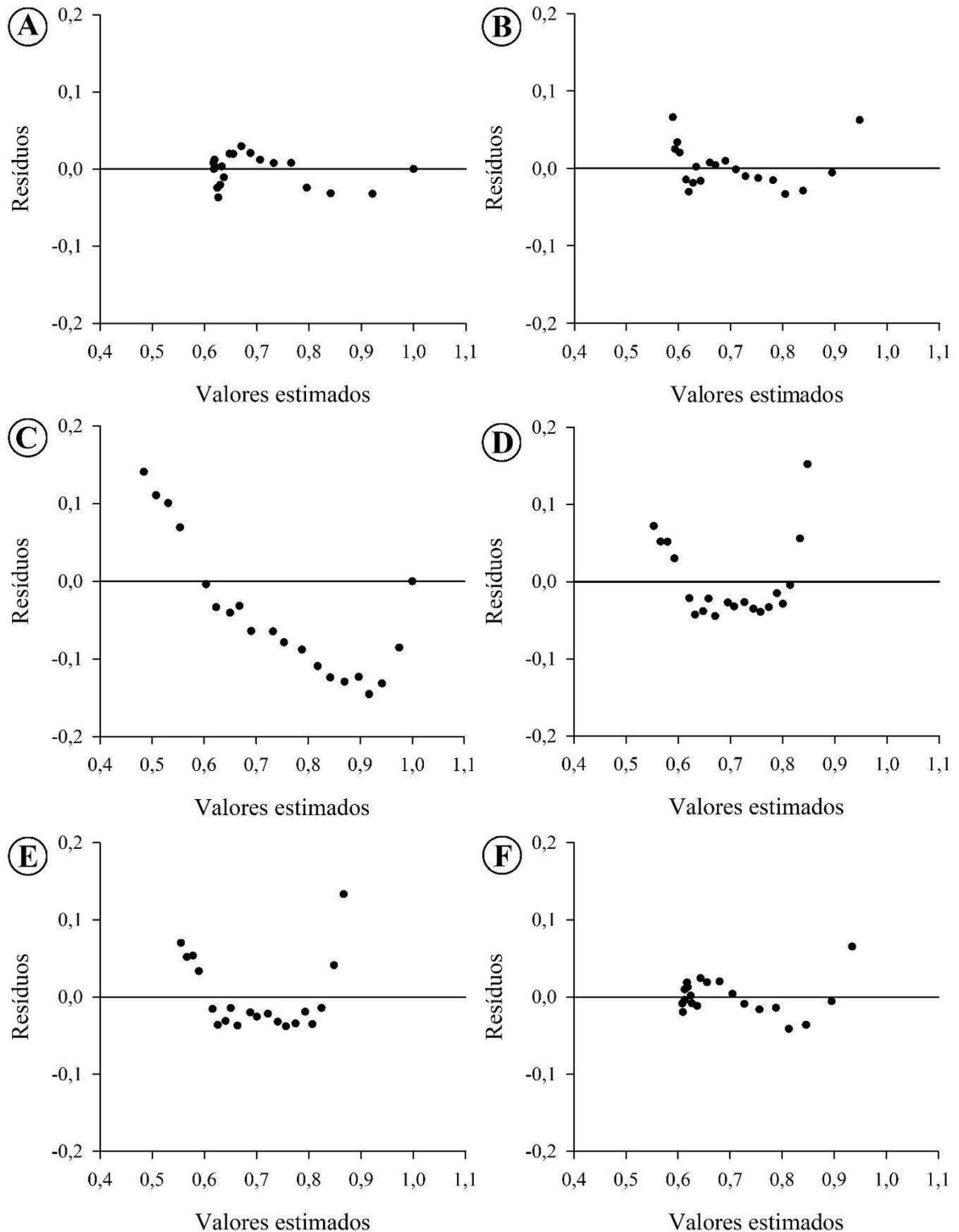
- Tang, P., Chan, H., Raper, J. Prediction of aerodynamic diameter of particles with rough surfaces. **Powder Technology**, v.147, p.64-78, 2004.
- Toci, A.T., Virgilio Neto, J.M.F., Torres, A.G., Farah, A. Changes in triacylglycerols and free fatty acids composition during storage of roasted coffee. **LWT – Food Science and Technology**, v.50, p.581-590, 2013.
- Tolessa, K., Rademaker, M., Baets, B., Boeckx, P. Prediction of specialty coffee cup quality based on near infrared spectra of green coffee beans. **Talanta**, v.150, p.367-374, 2016.
- Torres, I.D.A., Herrera, J.J.C., Tascón, C.E.O. Physical and mechanical properties correlation of coffee fruit (*Coffea arabica*) during its ripening. **Dyna**, v.79, p.148-155, 2012.
- Towner, G.D. The tensile stress generated in clay through drying. **Journal Agricultural Engineering Research**, v.37, p.279-289, 1987.
- Tran-Cong, S. Drag coefficients of irregularly shaped particles. **Powder Technology**, v.139, p.21-32, 2008.
- Wei, F., Tanokura, M. Chemical Changes in the Components of Coffee Beans during Roasting, p.83-91. In: **Coffee in Health and Disease Prevention**. Academic Press. 2014, 1080p.
- Yazdani, M., Sazandehchi, P., Azizi, M., Ghobadi, P. Moisture sorption isotherms and isosteric heat for pistachio. **European Food Research Technology**, v.223, p.577-584, 2006.
- Zanini, H., Duarte, M., Cavalcanti, M.M.E., Pimentel, L. Influência do tamanho e da forma da coluna de queda na velocidade terminal de grãos de milho e feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.10, p.53-61, 2008.

Zareiforush, H., Komarizadeh, M. H., Alizadeh, M. R. Effect of moisture content on some physical properties of paddy grains. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v.1, p.132-139, 2009.

Zielinska, M., Zapotocznu, P., Bialobrzewski, I., Zuk-Golaszewska, K., Markowski, M. Engineering properties of red clover (*Trifolium pratense* L.) seeds. **Industrial Crops and Products**, v.37, p.69-75, 2012.

APÊNDICE A

Distribuição dos resíduos dos valores estimados para contração volumétrica dos frutos de café pelos modelos de Bala e Woods (1984) adaptado (A); Corrêa et al. (2004) (B); Rahman (1995) (C); Linear (D); Exponencial (E) e polinomial (F).



APÊNDICE B

Distribuição dos resíduos dos valores estimados para contração volumétrica dos grãos de café pelos modelos de Bala e Woods (1984) adaptado (A); Corrêa et al. (2004) (B); Rahman (1995) (C); Linear (D); Exponencial (E) e polinomial (F).

