

PROPRIEDADES FÍSICAS DE FRUTOS DE CAFÉ ROBUSTA DURANTE A SECAGEM: DETERMINAÇÃO E MODELAGEM

Fernando Mendes Botelho¹, Paulo Cesar Correa², Sílvia de Carvalho Campos Botelho³,
Guillermo Asdrubal Vargas-Elías⁴, Mayra Darliane Silva Diniz Almeida⁵,
Gabriel Henrique Horta de Oliveira⁶

(Recebido: 26 de março de 2015; aceito: 03 de agosto de 2015)

RESUMO: Objetivou-se, com este trabalho, avaliar a influência do teor de água nas propriedades físicas dos frutos de café da variedade robusta (*Coffea canephora*), durante a secagem. Foram utilizados frutos de café no estágio de maturação cereja com teor de água inicial de, aproximadamente 1,7 (b.s.), secos numa estufa com circulação forçada de ar à 40 °C, até um teor de água final de, aproximadamente 0,13 (b.s.). Durante o processo de secagem foram avaliados o ângulo de repouso, a massa específica aparente, a massa específica unitária, a porosidade e a forma do produto (dimensões características principais, diâmetro equivalente, esfericidade, circularidade e a relação superfície-volume), analisados em função do teor de água. Verificou-se que a variação do teor de água, durante a secagem, influencia as propriedades físicas dos frutos de café analisadas. Com exceção da relação superfície-volume, todas as propriedades analisadas reduziram com a redução do teor de água. Observou-se ainda que os fatores tenderam à estabilidade para teores de água entre 0,42 e 0,68 (b.s.).

Termos para indexação: Forma, café, teor de água.

PHYSICAL PROPERTIES OF ROBUSTA COFFEE BERRIES DURING DRYING: DETERMINATION AND MODELLING

ABSTRACT: The objective of this work was to evaluate the influence of moisture content in physical properties of coffee berries (*Coffea canephora*) during drying. Ripe coffee berries with initial moisture content of 1.7 (d.b.) were used, dried in an oven with forced air circulation at 40 °C, until final moisture content of around 0.13 (d.b.) was reached. During the drying process were evaluated angle of repose, bulk and true density, porosity and shape factors (main characteristic dimensions, equivalent diameter, sphericity, roundness and the surface-area-to-volume ratio) and analyzed by function of moisture content. It was found that moisture content greatly influences the physical properties of the analyzed coffee berries. With the exception of the surface-area-to-volume ratio, all of these properties decreased by reducing the moisture content. It was also observed that the factors tended to stabilize for the moisture content between 0.42 and 0.68 (d.b.).

Index terms: Shape factors, coffee, moisture content.

1 INTRODUÇÃO

A secagem é uma das principais operações pós-colheita para a maioria dos produtos agrícolas, quando se visa à qualidade. Objetivou-se, nesta operação, reduzir a atividade de água até níveis seguros, para que o produto possa ser armazenado sem riscos de deterioração (GAZOR; MOHSENIMANESH, 2010; PEREA-FLORES et al., 2012). Todavia, a redução do teor de água pela secagem, normalmente, provoca alteração das características físicas do produto, principalmente, para o café, que é colhido com teor de água elevado, quando comparado a outros produtos agrícolas, como grãos.

Uma das mais importantes mudanças físicas que ocorrem nos produtos agrícolas, durante a secagem, é a redução do seu volume. A perda de água causa danos à estrutura celular do produto, proporcionando alterações em suas dimensões, na forma e nas demais características físicas (ARAÚJO et al., 2014; GONELI et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2012).

As propriedades físicas dos grãos e sementes são fundamentais para o dimensionamento e cálculo de capacidade estática de estruturas de armazenamento e para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados no transporte, na limpeza e na separação (GONELI et al., 2011; SHARMA et al., 2011).

¹Universidade Federal de Mato Grosso/UFMT - Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais/ICAA - 78.557-267- Sinop - MT fernando.eaa@gmail.com

²Universidade Federal de Viçosa/UFV - Departamento de Engenharia Agrícola/DEA - 36.570-000 - Viçosa - MG - copace@ufv.br

³Embrapa Agrossilvipastoral - CPAMT - Cx. P. 343 - 78.550-970 - Sinop - MT - silvia.campos@embrapa.br

⁴Universidad de Costa Rica - Contiguo Facultad Ciencias Agroalimentarias/ Centro para Investigaciones en Granos y Semillas 115012060 - San Pedro, Costa Rica - gvargase@gmail.com

⁵Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano/IFBaiano - 46430-000 - Guanambi - BA - mayra_darliane@hotmail.com

⁶Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais/IFSudesteMG - Campus Manhuaçu - 36905-000 - Manhuaçu-MG gabriel.oliveira@ifsudestemg.edu.br

Além disso, o conhecimento das propriedades físicas e dos fatores que as influenciam é indispensável para o entendimento dos fenômenos físicos relacionados à transferência de calor e massa que, frequentemente, ocorrem nas operações de secagem, aeração, resfriamento e armazenamento.

A avaliação das propriedades físicas está, ainda, estreitamente relacionada com a avaliação de qualidade por meio do processo de classificação. No caso do café, em particular o *Coffea canephora*, os critérios utilizados para avaliar a qualidade do grão cru são aqueles que dependem do seu aspecto físico, como uniformidade de tamanho, cor e forma, visto que, para este produto, a avaliação pelo teste de xícara ainda não é uma prática comum, como acontece para o *Coffea arabica*.

Diante do apresentado e ressaltando a importância de conhecer as propriedades físicas dos produtos agrícolas e os fatores que as influenciam, buscou-se avaliar a influência do teor de água sobre as propriedades físicas dos frutos de café da variedade robusta.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados frutos de *C. canephora* da variedade robusta advindos de uma plantação comercial do município de Nova Santa Helena (MT), colhidos manualmente com teor de água de, aproximadamente, 1,7 (b.s.). Dos frutos colhidos, foram retirados os verdes, verdeongos e boias, além das matérias estranhas e impurezas, de modo que os frutos utilizados neste trabalho fossem apenas os maduros (cerejas), que foram secados até um teor de água de, aproximadamente, 0,13 (b.s.).

Os teores de água do produto foram determinados pelo método gravimétrico, utilizando-se uma estufa com volume interno de, aproximadamente, 30 L e circulação forçada de ar numa temperatura de 105 ± 1 °C, durante 24 h, em três amostras de 40 g (BRASIL, 2009), com adaptações.

As amostras de café utilizadas para determinação das propriedades físicas foram submetidas à secagem em estufa cujo volume interno é de, aproximadamente, 80 L e com circulação forçada de ar, estabilizada à temperatura de 40 ± 1 °C. As amostras foram secadas em bandejas de chapa galvanizadas com medidas de $320 \times 260 \times 50$ mm e com 10% de sua área perfurada, sendo os furos de diâmetro médio de 2,5 mm cada. O acompanhamento da secagem foi feito por diferença de massa, conhecendo-se o teor de água inicial do produto. Após o início da secagem, a massa das amostras era determinada periodicamente, utilizando-se uma balança analítica com resolução de 0,01 g. Em seguida, as amostras eram retiradas e encaminhadas para determinação de suas propriedades físicas, quando o produto atingia valores preestabelecidos de teor de água.

Para determinação do ângulo de repouso foi utilizado um dispositivo feito de fibra de média densidade (MDF), com capacidade para, aproximadamente, 20 L de produto, sendo uma de suas laterais feita de vidro para possibilitar a visualização dos frutos (Figura 1). O dispositivo possui um alçapão que, quando desarmado, possibilita o escoamento e a formação do talude, devido à acomodação natural do produto. As medições da altura e da base do talude foram medidas por meio de um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm.

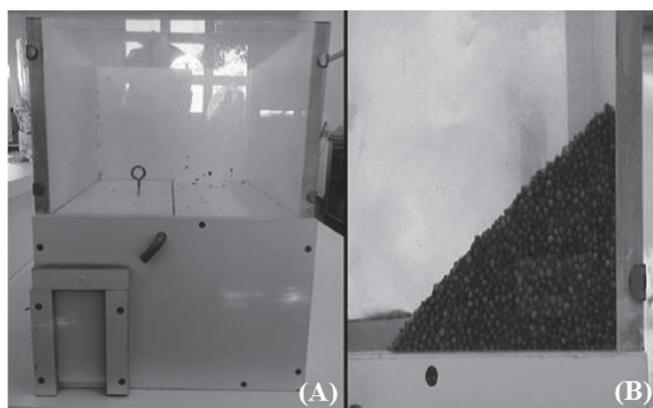


FIGURA 1 - Dispositivo utilizado para determinação experimental do ângulo de repouso, (A) vazio e (B) detalhe do talude formado por frutos de café.

Feitas as medições do talude, o ângulo de repouso foi então calculado por meio da Equação 1.

$$AR = \arctg\left(\frac{h}{t}\right) \quad 1$$

em que:

AR : ângulo de repouso, °;
h: altura do talude, mm; e,
t: base do talude, mm.

A massa específica aparente foi mensurada, utilizando-se um recipiente cuja relação entre o diâmetro e a altura é igual a um e cujo volume é de 1 L. Um funil com registro de descarga acoplado a uma haste fez com que o recipiente fosse preenchido completamente, sempre nas mesmas condições. Para medição da massa de grãos contida no recipiente foi usada uma balança analítica, com resolução de 0,01 g, sendo realizadas cinco repetições para cada teor de água.

Para determinar a massa específica real ou unitária, vinte frutos foram secados em recipientes individuais devidamente identificados, sendo suas massas acompanhadas por meio de uma balança analítica com resolução de 0,001 g, nas mesmas condições do ar de secagem das demais amostras. Durante o processo de secagem também foram realizadas medidas das dimensões características (maior, intermediária e menor) de cada fruto, como ilustrado na Figura 2, com um paquímetro digital cuja resolução é de 0,01 mm.

A massa específica unitária dos frutos de café foi determinada pela Equação 2, sendo que, para a determinação do volume, os frutos foram considerados esferoides triaxiais escalenos (MOHSEIN, 1986).

$$\rho_u = \frac{m_f}{V_f} = \frac{m_f}{\frac{\pi}{6}(abc)} = \frac{6}{\pi} \frac{m_f}{(abc)} \quad 2$$

em que:

ρ_u : massa específica unitária, kg m⁻³;
 m_f : massa do fruto, kg;
 V_f : volume do fruto, mm³;
a: maior dimensão característica do produto, mm;

b: dimensão característica intermediária do produto, mm; e
c: menor dimensão característica do produto, mm.

A porosidade da massa de frutos de café foi determinada indiretamente de acordo com a Equação 3 (MOHSEIN, 1986):

$$\varepsilon = 100 \left[1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u} \right] \quad 3$$

em que:

ε : porosidade, adimensional; e
 ρ_{ap} : massa específica aparente, kg m⁻³.

A forma dos frutos de café cereja foi caracterizada pela esfericidade, circularidades, relação superfície-volume e pela avaliação das dimensões características do produto, sempre em função do teor de água. A esfericidade foi calculada utilizando a Equação 4, proposta por Mohsenin (1986).

$$\phi = \frac{D_e}{a} = \frac{(abc)^{1/3}}{a} \quad 4$$

em que:

ϕ : esfericidade, adimensional; e
 D_e : diâmetro equivalente (ou diâmetro geométrico), mm.

As circularidades dos frutos de café foram calculadas para as três posições de projeção do fruto em relação a um plano, ou seja, segundo a maior (C_1), a intermediária (C_2) e a menor (C_3) dimensão característica (Figura 3), de acordo com a Equação 5.

$$C_x = \frac{D_i}{D_c} \quad 5$$

em que:

- C_x : circularidade para a projeção sobre a dimensão característica “x”, adimensional;
 D_i : diâmetro do maior círculo inscrito no produto, mm; e
 D_c : diâmetro do menor círculo circunscrito ao produto, mm.

$$A = 4\pi \left[\frac{\left(\frac{a}{2}\right)^z \left(\frac{b}{2}\right)^z + \left(\frac{a}{2}\right)^z \left(\frac{c}{2}\right)^z + \left(\frac{c}{2}\right)^z \left(\frac{b}{2}\right)^z}{3} \right]^{\frac{1}{z}} \quad 6$$

em que:

- A: área superficial, mm²; e
 z: constante de aproximação equivalente a 1,6075.

Para a determinação da relação superfície-volume, assumiu-se que os frutos do café têm forma aproximada de um esferoide triaxial escaleno, ou seja, possui as três dimensões características principais diferentes ($a \neq b \neq c$), sendo sua área superficial calculada de acordo com a Equação 6, conhecida como Equação de Knud Thomsen's (ERSOY, 2010; MELE et al., 2011). A Equação de Knud Thomsen's, utilizada com a constante “z” igual a 1,6075, resulta em um erro máximo de 1,061% na estimativa da área superficial do esferoide. O volume foi calculado conforme apresentado anteriormente, utilizando-se a Equação 2.

A avaliação das propriedades físicas dos frutos de café foi feita em função do teor de água, por meio de regressão, priorizando-se a descrição da dependência entre essas variáveis por meio de equações polinomiais. A análise da regressão foi feita pelo teste “F” e a avaliação dos parâmetros dos modelos selecionados foi feita pelo teste “t”, considerando-se uma significância de 1% de probabilidade.

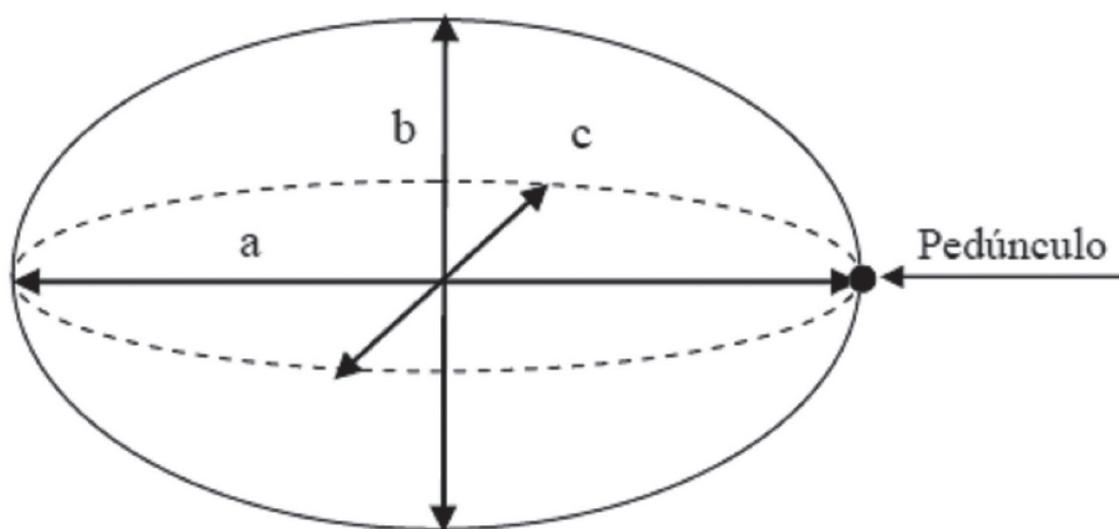


FIGURA 2 - Desenho esquemático de um fruto de café, em que: a , b e c são a maior, a intermediária e a menor dimensão característica do produto, respectivamente.

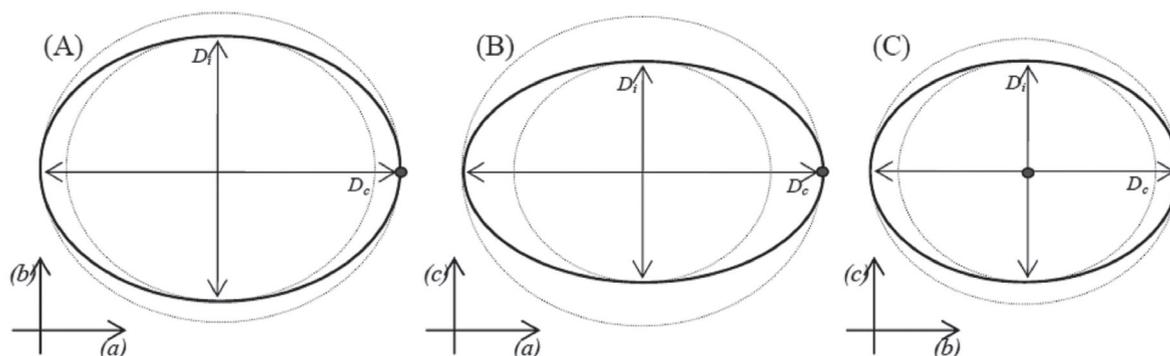


FIGURA 3 - Representação esquemática das projeções, sendo perpendicular à menor (A), intermediária (B) e maior (C) dimensão característica dos frutos de café.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 estão apresentados os valores experimentais e estimados do ângulo de repouso dos frutos de café, para diferentes teores de água.

Observa-se que o ângulo de repouso dos frutos de café diminuiu linearmente com a redução do teor de água, variando de 33,8 a 31,4°, para uma faixa de teor de água de 1,73 a 0,139 (b.s.). Os valores experimentais desse trabalho são inferiores aos relatados por Magalhães et al. (2000) que observaram valores entre 53,9 a 36,7°, para diferentes variedades de frutos de café arábica maduros, para uma faixa de teor de água de 11,0 a 70,4% (b.u.). A dependência do ângulo de repouso com o teor de água pode ser explicada de forma significativa ($p\text{-valor} < 0,001$), por meio de uma equação polinomial simples, que apresentou um ajuste satisfatório aos dados experimentais ($R^2 > 95\%$).

As menores magnitudes do ângulo de repouso com a redução do teor de água é a tendência normalmente verificada para a maioria dos produtos agrícolas, sendo a dependência linear entre essas variáveis também observada para sementes de moringa (AVIARA; POWER; ABBA, 2013), sementes de pinhão-mansão (GARNAYAK et al., 2008) e para grãos de *C. arabica* e *C. canephora* em pergaminho (SILVA et al., 2006). Maiores magnitudes do ângulo de repouso para teores de água mais elevados podem estar associadas ao aumento da adesão entre as superfícies desses produtos, o que dificulta o seu escoamento e, conseqüentemente, favorece a formação de maiores taludes durante sua acomodação natural.

Os valores experimentais e estimados das massas específicas aparente e unitária dos frutos de café para a faixa de teor de água avaliada estão apresentados na Figura 5.

Pela Figura 5 (A e B), percebe-se que, no início do processo de secagem, as massas específicas unitária e aparente dos frutos de café apresentaram tendência semelhante ao observado para a maioria dos produtos agrícolas, ou seja, houve um aumento dessa propriedade à medida que a água foi sendo removida do produto. Todavia, ao atingir o teor de água de 1,126 (b.s.) para o caso da massa específica unitária é de 0,8013 (b.s.) para a massa específica aparente, inverteu-se a tendência inicial, de modo que as massas específicas começaram a diminuir com a redução do teor de água, seguindo a tendência normalmente observada para alguns produtos agrícolas, que têm parte ou todo o tegumento enrijecido, como o girassol (FIGUEIREDO et al., 2011), arroz em casca (ZAREIFOROUGH; KOMARIZADEH; ALIZADEH, 2009) e café (RIBEIRO et al., 2001), entre outros.

Chandrasekar e Viswanathan (1999) também observaram essa tendência estudando o efeito do teor de água sobre a massa específica do *C. arabica* e *C. canephora* com pergaminho. Esses autores verificaram ainda que o *C. canephora* apresentou maiores valores de massa específica aparente e real, em relação ao *C. arabica*, independentemente do teor de água. Oliveira et al. (2009) também observaram que a massa específica do café em pergaminho reduziu com a diminuição do teor de água e, assim como Couto et al. (1999) e Ribeiro et al. (2001), atribuíram ao fato da casca e do pergaminho do café se contraírem de modo diferenciado do grão, visto que esse sofre mudanças volumétricas mais acentuadas que as estruturas que os envolvem.

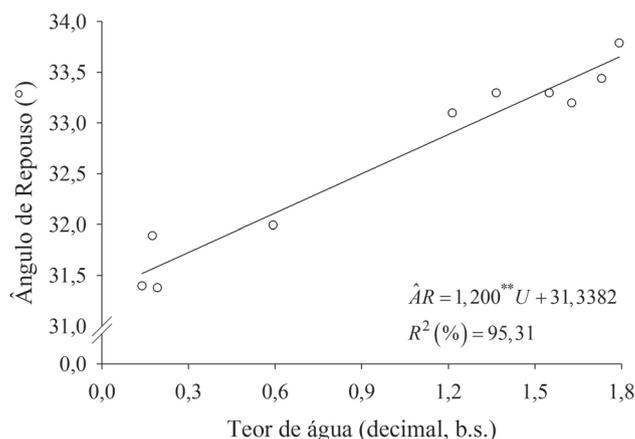
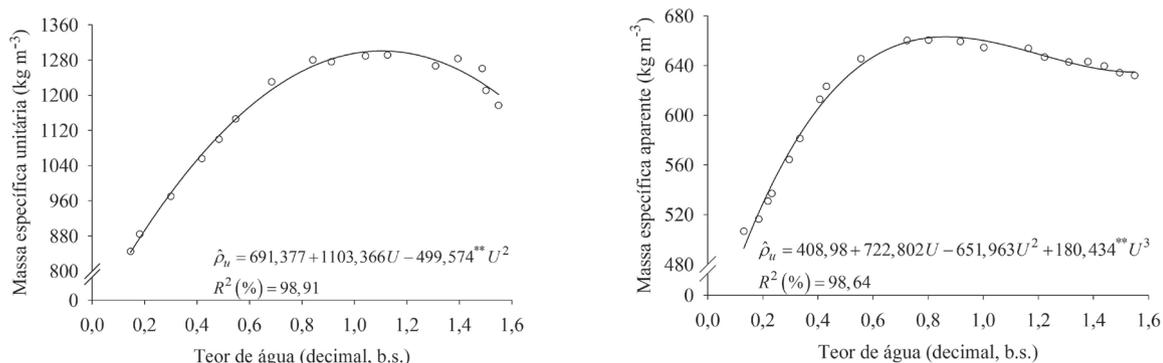


FIGURA 4 - Valores experimentais e estimados do ângulo de repouso dos frutos de café robusta, em função do teor de água.



(**) Significativo pelo teste “t”, *p*-valor < 0,0001

FIGURA 5 - Valores experimentais e estimados das massas específicas unitária (A) e aparente (B) dos frutos de café robusta, em função do teor de água.

Os valores experimentais da massa específica unitária apresentaram uma variação quadrática em relação ao teor de água, variando de 1.176,85 a 844,69 kg m⁻³, para teores de água entre 1,55 a 0,1468 (b.s.) e apresentando o valor máximo de 1.291,4 kg m⁻³ para o teor de água de 1,126 (b.s.) Já para a massa específica aparente, os valores variaram de 632,00 a 506,61 kg m⁻³ para uma faixa de teor de água de 1,55 a 0,131 (b.s.), alcançando um valor máximo de 660,55 kg m⁻³ para o teor de água de 0,8013 (b.s.).

A dependência da massa específica unitária e aparente com o teor de água pode ser descrita, significativamente (*p*-valor < 0,001), por modelos polinomiais de segundo e terceiro grau, respectivamente, que explicaram bem a variação total dos dados (R² > 98,5 %).

A Figura 6 apresenta os valores da porosidade determinada indiretamente pela Equação 3 e a estimada em função do teor de água.

Observa-se que a porosidade dos frutos de café aumentou com a elevação do teor de água, atingindo um valor máximo e reduzindo sua magnitude a partir dele. Os valores experimentais da porosidade da massa de frutos de café variaram de 40,62 % a 46,05 % para teores de água, variando de 0,13 a 1,55 (b.s.), atingindo seu maior valor, 50,24 %, quando o teor de água atingiu 1,2 (b.s.). Essa tendência pode ser explicada (*p*-valor < 0,0001 e R² > 96,7%) por um modelo polinomial de segundo grau.

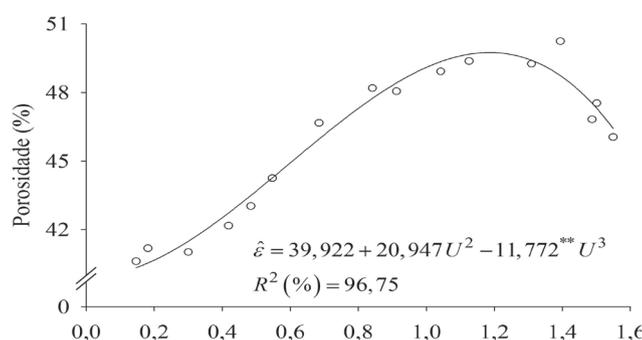
Couto et al. (1999) também observaram resultados e tendência semelhantes ao avaliar o efeito do teor de água sobre a porosidade dos

frutos de café arábica, sugerindo que esta parece ser a tendência típica para a maioria dos produtos agrícolas (curvas ajustadas passam, em geral, por um máximo). Esses autores ressaltam, ainda que, esse fato ocorre apesar de os valores das massas específicas do café apresentarem tendência diferente da maioria dos produtos agrícolas, e a porosidade ser obtida, indiretamente, a partir desses índices.

A variação das dimensões características principais (*a*, *b* e *c*) ao longo do processo de secagem, juntamente com o diâmetro equivalente (ou diâmetro geométrico) dos frutos de café robusta estão apresentados na Figura 7.

Numa análise puramente descritiva da Figura 7, nota-se que, assim como as dimensões características principais, o diâmetro equivalente dos frutos de café diminuiu ao longo da secagem. Todavia, a redução não ocorreu para toda a faixa de teor de água analisada, mas apenas para valores mais elevados.

As dimensões características principais e o diâmetro equivalente variaram, de maneira semelhante, ao longo da secagem, de modo que a variação desses índices foi praticamente nula quando os frutos de café apresentaram teores de água entre 0,42 e 0,68 (b.s.).



(**) Significativo pelo teste "t", *p*-valor < 0,0001

FIGURA 6 - Valores experimentais e estimados da porosidade dos frutos de café robusta, em função do teor de água.

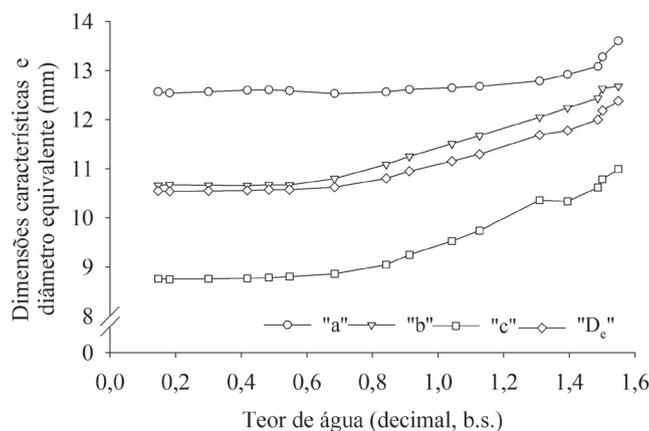


FIGURA 7 - Valores experimentais das dimensões características principais (*a*, *b* e *c*) e do diâmetro equivalente (*D_e*) dos frutos de café robusta, em função do teor de água.

A redução total observada foi maior para as menores dimensões características, sendo de 7,6% para a maior (*a*), 15,92% para a intermediária (*b*), 20,3% para a menor (*c*), além de uma variação de 14,8% para o diâmetro geométrico. A maioria dos produtos agrícolas se contrai irregularmente nas direções longitudinal, tangencial e radial durante a secagem (FORTES; OKOS, 1980), como constataram Oliveira et al. (2011) para frutos de café arábica e Corrêa et al. (2002) para frutos de café conilon e café arábica.

A contração volumétrica é observada durante a secagem da maioria dos produtos agrícolas e, normalmente, se estende até teores de água recomendados para o armazenamento, como observaram Mayor, Moreira e Sereno (2011) para partes de frutos de abóbora. Todavia, no caso do café e de outros produtos agrícolas, que têm parte ou todo o tegumento enrijecido, a contração é parcial ou inexistente durante a secagem. Desta forma, a estagnação das dimensões características indica que o pergaminho, que envolve os grãos passou a exercer grande influência no aspecto físico do produto, evitando variações na sua forma, conforme pode ser observado pelos valores de esfericidade e das circularidades dos frutos de café (Figura 8).

Pela Figura 8, observa-se que, tanto a esfericidade, quanto as circularidades dos frutos de café diminuíram linearmente com a redução do teor de água. Como esses fatores de forma só dependem das dimensões características principais, sua variação também só ocorreu até o teor de água de 0,55 (b.s.).

Devido à variação desproporcional das dimensões características dos frutos de café durante a secagem, a esfericidade diminuiu de 0,92 para o teor de água de 1,55 (b.s.), até o valor constante de 0,84, para teores de água abaixo de 0,55 (b.s.), mantendo, ainda, sua forma predominantemente esférica. Para a mesma faixa de teor de água, as circularidades para as projeções sobre a menor (C_1) e sobre a dimensão intermediária (C_2) variaram de 0,95 e 0,81 até valores constantes de 0,85 e 0,70, sendo esses o maior e o menor valor observado para esse fator de forma. A circularidade para a projeção sobre o maior eixo (C_3) alcançou um valor constante para o teor de água de 0,68 (b.s.), e variou de 0,87 a 0,82. Assim, a variação mais pronunciada da circularidade se deu na menor dimensão (C_1), indicando que os frutos de café se tornaram mais oblongos, vistos dessa projeção. De forma contrária, a menor variação da circularidade ocorreu para a projeção no maior eixo, indicando que as dimensões características “*b*” e “*c*” variaram numa proporção mais aproximada, em relação ao teor de água.

Corrêa et al. (2002) compararam a variação das dimensões características principais e da forma dos frutos de *C. canephora* e *C. arabica* e verificaram que, entre as duas espécies de café, a primeira sofreu menores alterações na sua geometria, ao longo do processo de secagem, e associaram essa observação à menor quantidade de mucilagem nos seus frutos.

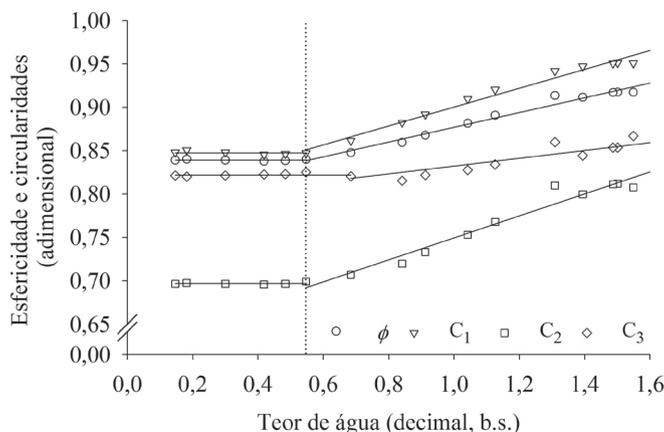


FIGURA 8 - Valores experimentais e estimados da esfericidade (ϕ) e das circularidades (C_1 , C_2 e C_3) dos frutos de café robusta, em função do teor de água.

Para a faixa de teor de água em que se observaram variações da esfericidade e das circularidades, foram ajustadas equações polinomiais de primeiro grau, que descreveram, significativamente (p -valor < 0,0001), a dependência entre essas variáveis apresentando coeficientes de determinação satisfatórios, principalmente para a esfericidade e para as circularidades C_1 e C_2 (Tabela 1). Analisando os coeficientes angulares dos modelos apresentados na Tabela 1, nota-se que as variações dos fatores de forma foram maiores para C_2 , seguida de C_1 , ϕ e de C_3 .

Diferentemente do observado para os demais fatores de forma, a relação superfície-volume aumentou com a redução do teor de água (Figura

9), apresentando o valor mínimo de 0,49 mm⁻¹ para o teor de água de 1,55 (b.s.) e máximo de 0,58 mm⁻¹ para teores de água menores que 0,42 (b.s.). A dependência entre essas variáveis foi satisfatoriamente descrita por um modelo composto por um segmento constante e outro quadrático (p -valor < 0,0001 e R^2 > 99,3%).

Resultados semelhantes foram observados por Oliveira et al. (2011) e Siqueira et al. (2012), avaliando a secagem de frutos de café arábica e sementes de pinhão-manso, respectivamente.

A avaliação dessa propriedade é muito importante para os estudos de secagem. De modo geral, quanto maior a relação superfície-volume de um produto, mais facilitadas são as transferências de calor e massa.

TABELA 1 - Equações ajustadas aos valores experimentais de esfericidade e circularidades dos frutos de café robusta, em função do teor de água.

Fator de forma	Modelo	R ² (%)	
Esfericidade(ϕ)	$\hat{\phi} = 0,0851^{**}U + 0,7919$ ($0,55 \leq U \leq 1,55$) $\phi = 0,84$ ($0,15 \leq U \leq 0,55$)	97,85	(7)
Circularidade (C_1)	$\hat{C}_1 = 0,1088^{**}U + 0,7915$ ($0,55 \leq U \leq 1,55$) $C_1 = 0,85$ ($0,15 \leq U \leq 0,55$)	98,08	(8)
Circularidade (C_2)	$\hat{C}_2 = 0,1268^{**}U + 0,6227$ ($0,55 \leq U \leq 1,55$) $C_2 = 0,70$ ($0,15 \leq U \leq 0,55$)	96,21	(9)
Circularidade (C_3)	$\hat{C}_3 = 0,0551^{**}U + 0,7746$ ($0,68 \leq U \leq 1,55$) $C_3 = 0,82$ ($0,15 \leq U \leq 0,68$)	86,00	(10)

** significativo pelo teste “t” (p -valor < 0,0001)

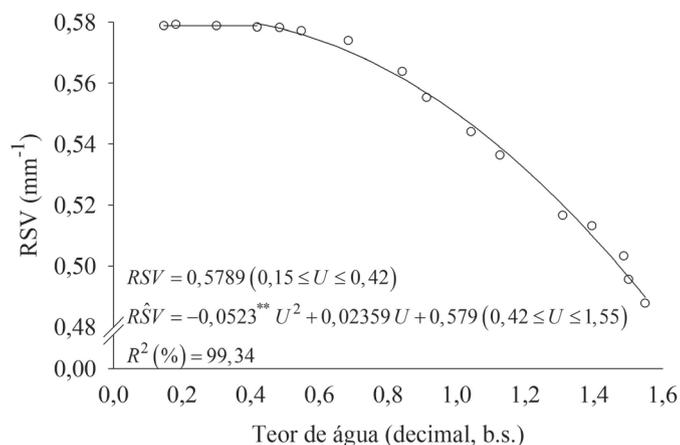


FIGURA 9 - Valores experimentais e estimados da relação superfície-volume (RSV) dos frutos de café robusta, em função do teor de água.

4 CONCLUSÕES

A redução do teor de água, devido à secagem, diminui as magnitudes das massas específicas aparente e unitária e da porosidade intergranular dos frutos de café;

A magnitude das dimensões característica principal e do diâmetro geométrico diminuiu com a redução do teor de água até valores entre 0,42 e 0,68 (b.s.), tendendo à estabilidade, a partir de então. As maiores reduções nas dimensões características principais ocorrem nas menores dimensões;

Com exceção da relação superfície-volume, os índices utilizados para avaliar a forma reduzem com o teor de água. Estes fatores tendem à estabilidade à semelhança do que se observa para as reduções das dimensões características principais.

5 AGRADECIMENTO

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão de bolsas.

6 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, W. D. et al. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 279-286, 2014.

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**, Amsterdam, v. 42, p. 4296-104, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análises de sementes**. Brasília, 2009. 399 p.

CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of coffee. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 73, n. 3, p. 227-234, 1999.

CORRÊA, P. C. et al. Variação das dimensões características e da forma dos frutos de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 466-470, 2002.

COUTO, S. M. et al. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 61-68, 1999.

ERSOY, O. Surface area and volume measurements of volcanic ash particles by SEM stereoscopic imaging. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, Amsterdam, v. 190, p. 290-296, 2010.

FIGUEIREDO, A. K. et al. Moisture-dependent engineering properties of sunflower seeds with different structural characteristics. **Journal of Food Engineering**, London, v. 102, n. 1, p. 58-65, 2011.

- FORTES, M.; OKOS, M. R. Changes physical properties of corn during drying. **Transaction of ASAE**, Saint Joseph, v. 23, n. 4, p. 1004-1008, 1980.
- GARNAYAK, D. K. et al. Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (*Jatropha curcas* L.). **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 27, p. 123-129, 2008.
- GAZOR, H. R.; MOHSENIMANESH, A. Modelling the drying kinetics of canola in fluidized bed dryer. **Czech Journal of Food Science**, Praha, v. 28, n. 6, p. 531-537, 2010.
- GONELI, A. L. D. et al. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 1-8, 2011.
- MAGALHÃES, A. C. et al. Dimensões principais, massa e volume unitários, esfericidade e ângulo de repouso de frutos de café. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 39-56, 2000.
- MAYOR, L.; MOREIRA, R.; SERENO, A. M. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. **Journal of Food Engineering**, London, v. 103, n. 1, p. 29-37, 2011.
- MELE, D. et al. A systematic investigation on the aerodynamics of ash particles. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, Amsterdam, v. 203, p. 1-11, 2011.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach, 1986. 841 p.
- OLIVEIRA, G. H. H. et al. Modeling of the shrinkage kinetics of coffee berries during drying. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 423-428, 2011.
- OLIVEIRA, G. H. H. et al. Physical properties evaluation affected by parchment presence of coffee grain. In: COMMISSION INTERNATIONALE DEL'ORGANISATION SCIENTIFIQUE DU TRAVALEN AGRICULTURE, 33.; COMMISSION INTERNATIONALE DU GENIE RURAL CONFERENCE, 5., 2009, Reggio Calabria. **Proceedings...** Reggio Calabria: DISTAFA-Università Degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, 2009. v. 1, p. 265-269.
- PEREA-FLORES, M. J. et al. Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 38, p. 64-71, 2012.
- RIBEIRO, R. C. M. S. et al. Porosidade e massa específica de cinco variedades de café cereja descascado. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, n. 3, p. 54-61, 2001. Especial Café.
- SHARMA, V. et al. Physical properties of tung seed: an industrial oil yielding crop. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 33, p. 440-444, 2011.
- SILVA, F. S. et al. Ângulo de repouso, atrito interno e efetivo dos grãos de café com pergaminho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 17-23, 2006.
- SIQUEIRA, V. C. et al. Forma e tamanho dos frutos de pinhão-mansão durante a secagem em cinco condições de ar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 864-870, 2012.
- ZAREIFOROUGH, 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**, London, v. 1, n. 3, p. 132-139, 2009.