

Efeito da umidade nos fatores de forma dos grãos de café

Effect of moisture on coffee bean shape factors

DOI:10.34117/bjdv7n1-066

Recebimento dos originais: 06/12/2020

Aceitação para publicação: 06/01/2021

Víctor Justiniano Huamaní Meléndez

Doutor

Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos
Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas (Ibilce), Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus São José do Rio Preto, R. Cristovão Colombo, 2265 – Jardim Nazareth, São José do Rio Preto, SP, 15054-000 Brasil.
E-mail: victor.melendez@unesp.br

Melquiades Barragán Condori

Doutor

Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional Intercultural de Quillabamba – UNIQ, El Arenal S/N, Quillabamba Cusco, 08741, Peru
E-mail: melquim100@hotmail.com

Róger Darros Barbosa

Doutor

Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos
Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas (Ibilce)
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus São José do Rio Preto, R. Cristovão Colombo, 2265 – Jardim Nazareth, São José do Rio Preto, SP, 15054-000 Brasil.
E-mail: roger.darros@unesp.br

RESUMO

O conhecimento dos fatores de forma dos grãos de café apresenta importância nos processos que envolvem transferência de calor e/ou massa como o torrado, a umidificação ou descafeinado, além de outras operações unitárias como a fluidização ou transporte pneumático. A modelação destes processos envolve o conhecimento do grau de aproximação dos grãos para uma forma geométrica regular, sendo a esfericidade a ferramenta mais usada para este propósito, modelando grande parte dos processos sob a consideração que o material pode-se modelar como uma esfera. No entanto, a dificuldade de calcular a superfície do grão de café, faz com que os pesquisadores adotem a esfericidade operacional para obter um valor de aproximação à esfera. Isto motivou para deduzir uma expressão para a esfericidade do grão de café baseado em que a sua forma aparenta ser um semi-elipsoide triaxial. Observou-se que as dimensões do grão de café e a sua esfericidade aumentam conforme aumenta a umidade dos grãos correlacionando-se ao modelo da Lei da Potência.

Palavras-chave: Esfericidade, umidificação, fatores de forma, semi-elipsoide.

ABSTRACT

Knowledge of the shape factors of coffee beans is important in processes that involve heat and/or mass transfer such as roasted, humidified or decaffeinated, in addition to other unit operations such as fluidization or pneumatic transport. The modeling of these processes involves the knowledge of the degree of approximation of the coffee bean to a regular geometric shape, with sphericity being the most used tool for this purpose, being used in most processes under the consideration that the material can be modeled as a sphere. However, the difficulty of calculating the surface of the coffee bean, makes the researchers adopt the operational sphericity as an approximation value to the sphere. This fact motivated to deduce an equation for the sphericity of the coffee bean based on that its shape approaches a triaxial semi-ellipsoid. It was observed that the dimensions of the coffee bean and its sphericity increase as the humidity of the beans increases, correlating to the Power Law model.

Keywords: Sphericity, humidification, shape factors, semi-ellipsoid.

1. INTRODUÇÃO

Nos processos de transferência de calor e massa, a maioria dos pesquisadores assume o grão de café como esfera ou um elipsoide triaxial (AFONSO JÚNIOR et al., 2007; SÁNCHEZ RAMÍREZ et al., 2003, 2007).

A forma de uma partícula individual é geralmente expressa em termos de esfericidade (ϕ) apresentando importância nos processos envolvendo fenômenos de transferência de calor e massa, representando importância também nos grãos e as sementes nas operações de processamento e culturais (SANTOS et al., 2020). A esfericidade de uma partícula é definida como a relação entre a área superficial da esfera do mesmo volume que a partícula e a área superficial real da partícula (GEANKOPLIS, 2003; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005; RICHARDSON et al., 2002). A partir desta relação, a esfericidade de uma partícula pode ser expressa pela Equação 1.

$$\phi = \frac{6 V_p}{\phi D_p S_p} \quad (1)$$

Pela dificuldade em determinar com exatidão a área superficial da partícula por apresentar irregularidades na sua estrutura, Wadell (1933) introduz um conceito de esfericidade operacional (Equação 2) que é amplamente usada para definir a esfericidade dos grãos de café e outras partículas. Consiste na relação entre o volume do sólido e o volume de uma esfera que possui diâmetro igual ao diâmetro principal da partícula de modo que possa circunscrever a partícula (BELAY et al., 2014; MOHSENIN, 1986;

SEVERA; BUCAR; NEDOMOVÁ, 2012; YUWANA; SILVIA; SIDEBANG, 2015), considerando o grão de café como um elipsoide triaxial pode ser representada pela Equação 3.

$$\Phi_{op} = \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$\Phi_{op} = \frac{(abc)^{\frac{1}{3}}}{a} \quad (3)$$

Considerando que é aceitável adotar como diâmetro equivalente à dimensão média de uma partícula, Bayram (2005) propõe a Equação 1 para quantificar a esfericidade de materiais alimentares granulares, que está baseada no grau de dispersão das diferentes dimensões características em relação ao diâmetro médio.

$$\phi = \frac{\sum(D_i - \bar{D})^2}{(\bar{D}N)^2} \quad (4)$$

Se o valor calculado com a Equação 4 é próximo de zero, pode ser considerado esférico, diminuindo essa aproximação à esfera conforme aumenta o valor. Severa *et al.* (2012) calculou a esfericidade de acordo com o procedimento descrito por Bayram (2005), encontrando valores variaram de 0,006536 até 0,009452.

No processamento de produtos a partir dos grãos de café, é preciso aproximar a forma do grão para uma geometria euclidiana regular, geralmente para uma esfera considerando que grande parte dos modelos fenomenológicos estão deduzidos para a forma esférica, motivando o interesse de encontrar uma expressão para a esfericidade atribuível aos grãos de café e o comportamento da esfericidade em função do conteúdo de umidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATÉRIA PRIMA

Foi utilizada grãos de café verde variedade arábica, safra 2011/2012, (sítio Fartura – Bálsamo – SP), sem a pele prateada e com umidade de 11% (base úmida).

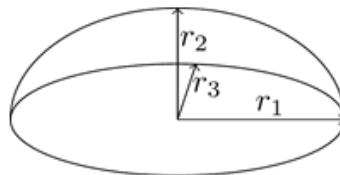
2.2 DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO

Os grãos de café foram submetidos à classificação por tamanho em peneiras da série Tyler (3,5, 4,0 e 5) utilizando-se um sistema vibratório (GRANUTEST).

2.3 FATORES DE FORMA DO GRÃO DE CAFÉ

Baseado na definição de esfericidade (relação entre a área superficial da esfera equivalente ao volume do sólido e a área superficial real do sólido), Aschenbrenner (1956) deduziu a equação de esfericidade para um elipsoide triaxial. Partindo desta expressão e, considerando que o grão de café aparenta ser um semielipsoide triaxial (Figura 1) deduzimos a Equação 5 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para a determinação de esfericidade do grão de café.

Figura 1: Esquema das dimensões principais do grão de café.



$$\Phi = \frac{\left(\frac{4p}{q}\right)^{\frac{2}{3}}}{p^2 + \frac{1}{q \sin \gamma} [A+B] + \frac{p}{q}} \quad (5)$$

ou

$$\Phi = \frac{4\left(\frac{r}{q}\right)^{\frac{2}{3}}}{p^2 + \frac{1}{q \sin \gamma} [A+B] + \frac{p}{q}} \quad (6)$$

onde:

$$A = \sin^2 \gamma E(\gamma, K) \text{ e,}$$

$$B = \cos^2 \gamma F(\gamma, K)$$

$E(\gamma, K)$ e $F(\gamma, K)$ são as integrais elípticas de primeira e segunda espécie,

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{r_3}{r_1} \right), \quad K = \frac{r_1}{r_2} \sqrt{\frac{r_2^2 - r_3^2}{r_1^2 - r_3^2}}$$

$$p = \frac{r_3}{r_2} \text{ e } q = \frac{r_2}{r_1}$$

As integrais elípticas de primeira e segunda espécie foram calculadas pelos comandos “EllipticE” e “EllipticF” do software Mathematica v.7.0.

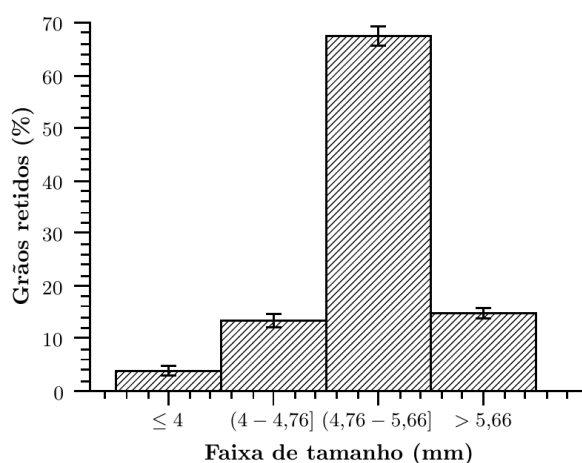
2.4 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DOS GRÃOS DE CAFÉ

Foi determinado por picnometria, colocando no interior do picnômetro 10 grãos de café verde com massa conhecida, e o volume completado com tolueno.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A classificação por tamanho dos grãos de café é mostrada na Figura 2, apresentando distribuição normal. Foram descartados os grãos que passaram pela peneira de 4 mm, representando o 3,89%.

Figura 2: Distribuição de tamanho dos grãos de café variedade arábica.



A distribuição de tamanhos dos grãos de café apresenta ajuste à função Gaussiana como advertido por Belay et al. (2014) para grãos de café cultivados em diferentes regiões da Etiópia.

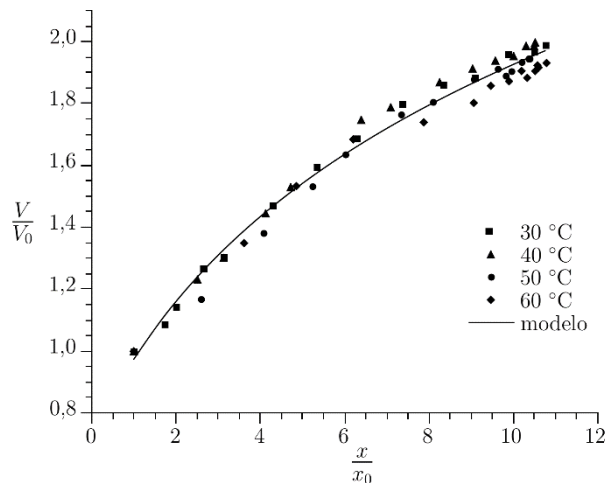
Os grãos de café submetidos a hidratação em temperaturas entre 30 e 60 °C apresentam aumento no seu volume por efeito da transferência de água ao interior do grão. Este processo pode ser modelado pela Equação 5 ($R^2 = 0,987$) para todo o conjunto de dados. Como apresentado na Figura 3 pode-se advertir que não se observou diferenças significativas na relação de adimensionais de volume e umidade obtidos nesta faixa de temperaturas. Para produtos similares, Shepherd e Bhardwaj (1986) encontraram correlação polinomial de segundo grau para a ervilha e Leopold (1983) obteve correlação linear para 15 tipos de sementes.

A falta de linearidade na correlação para umidades baixas ($x/x_0 \approx 5$) pode ser devida à variação do grau de relaxação da matriz sólida. Segundo Billmeyer (1984), a tensão produzida pela entrada de água produz deformações na matriz sólida, aumentando a energia livre com uma diminuição da entropia do sistema, isto como consequência da

movimentação das cadeias poliméricas da estrutura do grão para uma configuração mais estável.

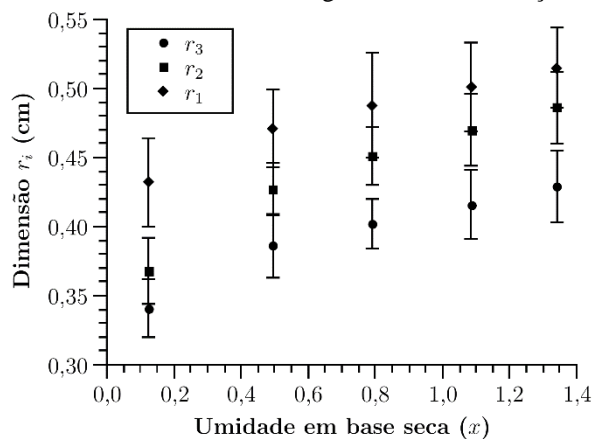
$$\frac{V}{V_0} = 0,7602 \ln\left(\frac{x}{x_0} + 2,6\right) \quad (5)$$

Figura 3: Adimensional do volume em função do adimensional de umidade para temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C



A variação das dimensões do grão de café em relação ao seu conteúdo de umidade, é apresentado na Figura 4, observando-se aumento à medida que a umidade do grão aumenta.

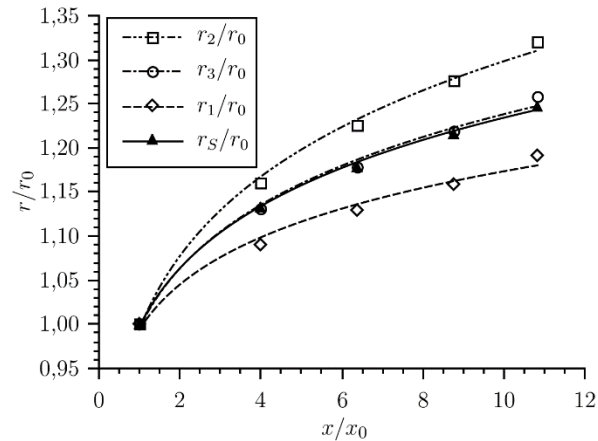
Figura 4: Dimensões características do grão de café em função da umidade.



Relacionando os adimensionais das dimensões características do grão e o adimensional de umidade (Figura 5) pode-se notar que o raio maior apresenta menor incremento em função da umidade e a espessura do grão (r_2) apresenta maior aumento. Este comportamento pode ser explicado pelo princípio da menor energia onde a matéria

tende à forma esférica que assegura um estado de mínima energia, pois esta é a forma geométrica de mesmo volume com a menor área superficial. A variação destas dimensões apresenta comportamento que pode ser descrito pela Lei da Potência (Equações 8, 9 e 10, com R^2 de 0,973, 0,996 e 0,995 respectivamente).

Figura 5: Adimensional das dimensões do grão de café em função do adimensional de umidade.



O aumento do raio equivalente (r_s) por efeito da umidificação, apresenta comportamento similar ao raio menor (r_3) o mesmo que pode se evidenciar na Figura 5 e na Equação 11.

$$\frac{r_1}{r_n} = 0,9942 \left(\frac{x}{x_n}\right)^{0,072} \tag{8}$$

$$\frac{r_2}{r_n} = 0,9944 \left(\frac{x}{x_n}\right)^{0,158} \tag{9}$$

$$\frac{r_3}{r_n} = 0,9959 \left(\frac{x}{x_n}\right)^{0,095} \tag{10}$$

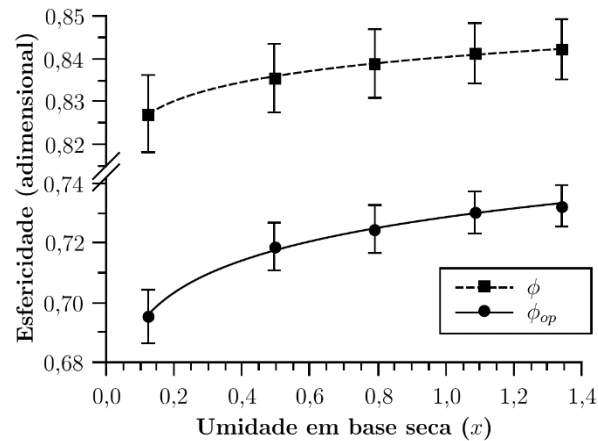
$$\frac{r_s}{r_n} = 0,9959 \left(\frac{x}{x_n}\right)^{0,092} \tag{11}$$

Pelo princípio da menor energia, o grão de café vai tender a uma forma esférica à medida que aumenta a sua umidade (Figura 6), portanto, a esfericidade aumenta conforme a umidade do grão aumenta, apresentando valores entre $0,827 \pm 0,009$ e $0,842 \pm 0,007$. Este comportamento pode ser equacionado pela Lei da Potência (Equação 6, com $R^2 = 0,998$).

A esfericidade operacional segue o mesmo comportamento (Equação 7, com $R^2 = 0,996$) com valores entre $0,695 \pm 0,009$ a $0,732 \pm 0,007$. Resultados aproximados aos obtidos por Yuwana et al. (2015) com esfericidade operacional entre 67,8 a 69,1 para

grãos de café com 12,2% de umidade em base úmida. Belay *et al.* (2014) encontrou valores entre 0,67 a 0,64 para grãos de café com 10,22% de umidade em base úmida.

Figura 6: Comportamento da esfericidade e esfericidade operacional em função da umidade.



$$\phi = 0,8404 x^{0,0077} \quad (6)$$

$$\phi_{op} = 0,7287 x^{0,0220} \quad (7)$$

4 CONCLUSÕES

O aumento de volume dos grãos de café em função do aumento de umidade apresentou correlação de tipo logarítmica, observando-se independência da temperatura de umidificação. Os raios maior, intermediário e menor do grão de café exibiram aumento em diferentes medidas apresentando correlação ao modelo da Lei da Potência. O incremento maior nos raios menor e intermediário contribuíram no aumento da esfericidade, explicado pelo princípio da menor energia. A esfericidade operacional para os grãos de café resultou ser 16±2% menor que a esfericidade calculada usando aproximação a um semi-elipsoide triaxial

NOMENCLATURA

- φ Esfericidade (adimensional)
- φ_{op} Esfericidade operacional (adimensional)
- V_p Volume de partícula (cm³)
- V_S Volume da esfera circunscrita (cm³)
- V₀ Volume inicial (cm³)

- D_p Diâmetro equivalente (cm)
 S_p Área superficial do sólido (cm²)
 $2a$ Diâmetro maior do elipsoide (cm)
 $2b$ Diâmetro intermediário do elipsoide (cm)
 $2c$ Diâmetro menor do elipsoide (cm)
 D_i Dimensão medida do sólido (cm)
 \bar{D} Dimensão média (cm)
 N Número de medidas (adimensional)
 r_1 Raio maior do semielipsoide (cm)
 r_2 Raio intermediário do semielipsoide (cm)
 r_3 Raio menor do semielipsoide (cm)
 r_s Raio equivalente (cm)
 r_0 Valor inicial do raio (cm)
 x Umidade em base seca (g_{água}/g_{massa seca})
 x_0 Umidade b.s. inicial (g_{água}/g_{massa seca})

REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, P. C. et al. Aerodynamic properties of coffee cherries and beans. **Biosystems Engineering**, v. 98, n. 1, p. 39–46, 2007.

ASCHENBRENNER, B. C. A new method of expressing particle sphericity. **Journal of Sedimentary Research**, v. 26, n. 1, p. 15–31, 1956.

BAYRAM, M. Determination of the sphericity of granular food materials. **Journal of Food Engineering**, v. 68, n. 3, p. 385–390, 2005.

BELAY, A. et al. Discrimination of Defective (Full Black, Full Sour and Immature) and Nondefective Coffee Beans by Their Physical Properties. **Journal of Food Process Engineering**, v. 37, n. 5, p. 524–532, 1 out. 2014.

BILLMEYER, F. W. **Textbook of Polymer Science**. 3th. ed. [s.l.] Wiley-Interscience, 1984.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Separation Process Principles: Includes Unit Operations**. 4. ed. [s.l.] Pearson Education, Inc., 2003.

LEOPOLD, A. C. Volumetric components of seed imbibition. **Plant physiology**, v. 73, n. 3, p. 677–680, 1983.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7. ed. [s.l.] McGraw-Hill Education, 2005.

MOHSENIN, N. N. **Physical Properties of Plant and Animal Materials: Structure, Physical Characteristics, and Mechanical Properties**. 2. ed. [s.l.] Gordon and Breach, 1986.

RICHARDSON, J. F. et al. **Coulson and Richardson's chemical engineering. Vol. 2, Particle technology and separation processes**. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2002.

SÁNCHEZ RAMÍREZ, J. et al. Propiedades Físicas e Hidrodinámica de la Fluidización del Café Verde y Tostado (Coffea arábica L . var . typica). **Naturaleza y Desarrollo**, v. 1, n. 1, p. 43 de 41–49, 2003.

SÁNCHEZ RAMÍREZ, J. et al. ESTUDIO DE LA HIDRODINÁMICA DEL CAFÉ TOSTADO (Coffea arabica L.) EN LECHO FLUIDIZADO. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, v. 6, p. 185–192, 2007.

SANTOS, J. DA S. et al. ASPECTOS DIMENSIONAIS DE SEMENTES DE DIMORPHANDRA MOLLIS PARA ESTUDO DA VARIABILIDADE ENTRE POPULAÇÕES DE PLANTAS. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 56035–56052, 2020.

SEVERA, L.; BUCAR, J.; NEDOMOVÁ, Š. Shape and Size Variability of Roasted Arabica Coffee Beans. **International Journal of Food Properties**, v. 15, n. 2, p. 426–437, 2012.

SHEPHERD, H.; BHARDWAJ, R. K. Moisture-dependent physical properties of pigeon pea. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 35, n. 4, p. 227–234, 1986.

WADELL, H. Sphericity and Roundness of Rock Particles. **The Journal of Geology**, v. 41, n. 3, p. 310–331, 1933.

YUWANA, Y.; SILVIA, E.; SIDEBANG, B. Engineering Properties of Coffee Beans from Various Colors of Coffee Cherries. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 3, p. 274–277, 2015.