



PROJETO DE UM SISTEMA DE ELUTRIAÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA SEPARAÇÃO DE GRÃOS CRUS DE CAFÉ CONILON DE DIFERENTES DIÂMETROS

DESIGN OF A LOW-COST ELUTRITION SYSTEM FOR SEPARATION OF RAW CONILON COFFEE BEANS OF DIFFERENT DIAMETERS

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ELUTRIACIÓN DE BAJO COSTO PARA LA SEPARACIÓN DE GRANOS DE CAFÉ CONILON CRUDO DE DIFERENTES DIÁMETROS

Thales Freire Amaral¹, Nícolas Alexandre Berger Bento², Vinícius Barroso Soares³, & Paulo Sérgio da Silva Porto⁴

^{1,3} Departamento de Engenharia e Tecnologia (DET), Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

^{2,4} Programa de Pós-Graduação em Energia, Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

¹ thales.freires@edu.ufes.br ² nicholas.berger@hotmail.com ^{3*} vinicius.b.soares@ufes.br ⁴ pssporto@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 18.11.2024

Aprovado: 07.02.2025

Disponibilizado: 28.04.2025

PALAVRAS-CHAVE: Elutriador; Café conilon; Modelagem.

KEYWORDS: Elutriator; Conilon coffee; Modeling.

PALABRAS CLAVE: Elutriador; Café conilon; Modelado.

*Autor Correspondente: Soares, V. B.

RESUMO

O beneficiamento do café busca obter lotes mais homogêneos, adequados aos padrões de comercialização e industrialização. Considerando as limitações dos pequenos produtores, foi projetado um elutriador multiestágio de baixo custo. Para compor cada estágio, utilizaram-se tubos plásticos de 50, 75 e 100 mm de diâmetro, conectados em série, do menor para o maior. Avaliou-se a separação de grãos crus de café conilon, utilizando ar como fluido de transporte. A caracterização inicial indicou diâmetros entre 0,60 e 0,93 cm. Não foram observadas correlações entre diâmetro e massa específica, nem entre massa específica e velocidade terminal. Esse comportamento pode estar relacionado à variação na esfericidade dos grãos. A velocidade terminal apresentou relação linear inversa com o diâmetro das partículas. A elutrição a 713,13 cm·s⁻¹ recuperou mais de 87% dos grãos de menor diâmetro. O material arrastado para os demais estágios do sistema foi considerado como defeituoso.

ABSTRACT

Coffee processing aims to produce more homogeneous batches that meet commercialization and industrial standards. Considering the limitations of small producers, a low-cost multistage elutriator was designed. Each stage was composed of plastic tubes with diameters of 50, 75, and 100 mm, connected in series from the smallest to the largest. The separation of raw conilon coffee beans was evaluated using air as the transport fluid. Initial characterization indicated particle diameters between 0.60 and 0.93 cm. No correlation was observed between diameter and specific mass, nor between specific mass and terminal velocity. This behavior may be associated with variations in sphericity. Terminal velocity showed an inverse linear relationship with particle diameter. At an elutriation velocity of 713.13 cm·s⁻¹, more than 87% of the smaller beans were recovered. Material transported to the remaining stages of the system was considered defective.

RESUMEN

El beneficio del café busca obtener lotes más homogéneos, adecuados a los estándares de comercialización e industrialización. Considerando las limitaciones de los pequeños productores, se diseñó un elutriador multietapa de bajo costo. Cada etapa fue compuesta por tubos plásticos de 50, 75 y 100 mm de diámetro, conectados en serie, del menor al mayor. Se evaluó la separación de granos crudos de café conilon, utilizando aire como fluido de transporte. La caracterización inicial indicó diámetros entre 0,60 y 0,93 cm. No se observaron correlaciones entre el diámetro y la masa específica, ni entre la masa específica y la velocidad terminal. Este comportamiento puede estar relacionado con la variación en la esfericidad de los granos. La velocidad terminal mostró una relación lineal inversa con el diámetro de las partículas. A una velocidad de elutriación de 713,13 cm·s⁻¹, se recuperó más del 87% de los granos de menor diámetro. El material arrastrado a las etapas restantes del sistema fue considerado defectuoso.



INTRODUÇÃO

O Espírito Santo destaca-se como o maior produtor de café conilon (*Coffea canephora*) no Brasil, sendo responsável por 70% da produção nacional (Conab, 2024). A cafeicultura é uma atividade de grande relevância socioeconômica, especialmente para pequenos produtores rurais, que buscam formas de agregar valor ao seu produto e ampliar sua competitividade no mercado. Os grãos crus de café constituem a matéria-prima essencial para a torrefação, processo termoquímico responsável por definir as principais características sensoriais do café, como sabor, aroma e cor (Gloess et al. 2013).

A torrefação é sensível à forma e à densidade dos grãos. Grãos com formatos irregulares ou baixa esfericidade podem apresentar distribuição desigual de calor durante o processo, afetando diretamente a qualidade final do produto. Grãos mais alongados tendem a sofrer variações no perfil de torra, resultando em um produto não uniforme (Fabbri et al. 2011). A massa específica dos grãos influencia diretamente o tempo e a temperatura necessários para uma torrefação homogênea; grãos mais densos demandam maior aporte de energia térmica para atingir o mesmo grau de torra que grãos menos densos (Baggenstoss et al. 2008). Esse parâmetro está fortemente relacionado à fase de maturação dos frutos, sendo que grãos maduros geralmente apresentam maior massa específica e melhor desempenho sensorial após a torra. Por outro lado, grãos com densidade menor, como os “chochos”, tendem a sofrer supertorra, resultando em sabores amargos e queimados (Mayer et al., 2000).

A indústria de torrefação demanda lotes de café beneficiado com homogeneidade, a fim de garantir uniformidade sensorial após a torra (Silva et al., 2015). Para isso, os frutos secos “em coco” ou “em pergaminho” devem ser classificados com base em parâmetros de qualidade como números de defeitos, dimensões e formato, massa específica, velocidade terminal e coloração (Matiello et al., 2020; Rezende et al., 2007; Silva & Berbert, 1999). No Brasil, a classificação dos grãos crus de café segue as diretrizes estabelecidas pela Instrução Normativa nº 8, de 11 de junho de 2003 (Mapa, 2003).

A qualidade do café depende, em grande parte, da eficiência de remoção de impurezas e de sementes defeituosas (Nascimento et al., 2020). Para a limpeza e classificação de sementes e grãos, podem ser utilizadas máquinas de pré-limpeza e limpeza, catadores de pedras, mesas densimétricas, classificadoras por peneiras e por imagem eletrônica (Giomo et al., 2008; Silva et al., 2015). Esses sistemas de beneficiamento são dispendiosos, tornando-se economicamente inviáveis para os pequenos produtores rurais. Como alternativa, algumas cooperativas utilizam colunas com sopradores de ar.

Para que uma partícula seja suspensa em um fluxo de ar ascendente, sua velocidade terminal deve ser inferior à velocidade média do fluido de arraste (Cremasco, 2021). Na separação por fluxo de ar, o conhecimento da velocidade terminal do produto e das impurezas é fundamental. No caso do café, verificou-se que a época de colheita e a variedade dos frutos não influenciam significativamente na velocidade terminal. Em contrapartida, o teor de umidade, o estágio de maturação dos frutos e o tamanho das amostras utilizadas nas determinações demonstraram exercer influência relevante (Couto et al., 2003).

Os sistemas atuais de beneficiamento não atendem de forma satisfatória às necessidades dos pequenos produtores, que carecem de alternativas de baixo custo e alta eficiência. Além disso, os fatores que influenciam a separação dos grãos por velocidade terminal, como forma e massa específica, são pouco explorados, especialmente quanto à aplicação prática em sistemas de classificação adaptados a pequenas propriedades.

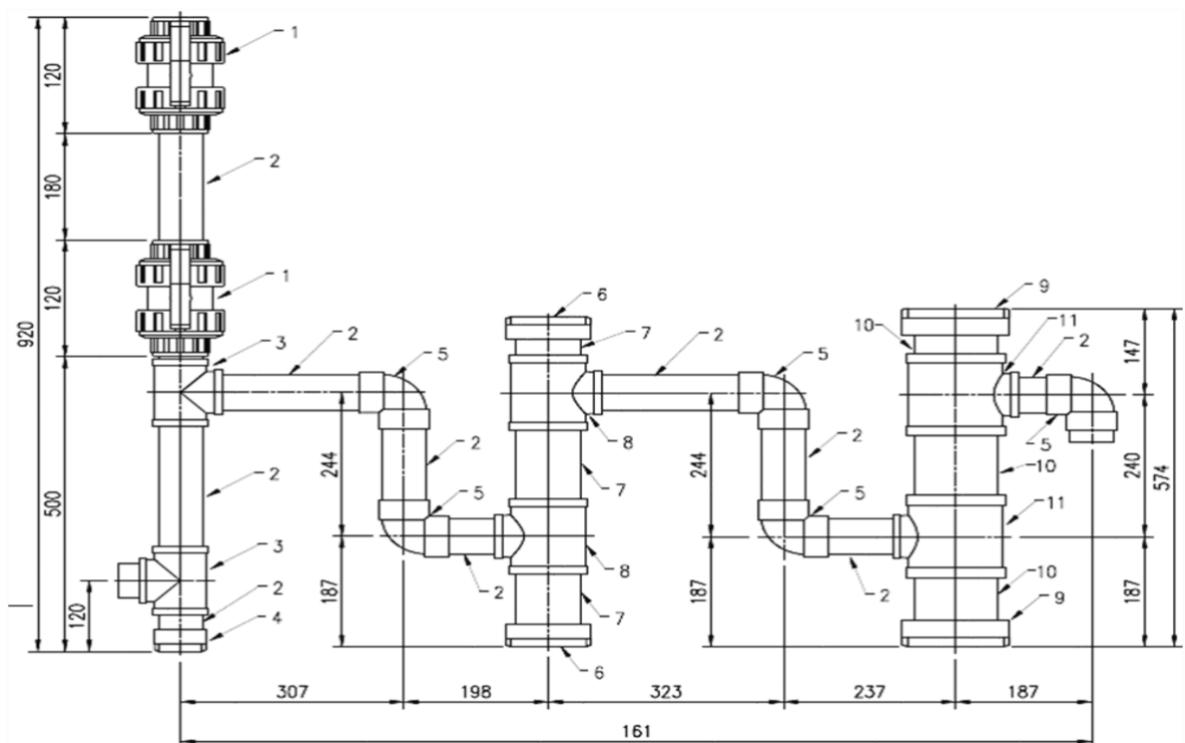
Este estudo tem como objetivo projetar e avaliar a viabilidade de um sistema de elutriação de baixo custo, voltado à separação de grãos de café conilon com diferentes diâmetros. O sistema proposto busca oferecer uma alternativa acessível aos pequenos produtores, viabilizando uma classificação mais precisa dos grãos. Os fatores que afetam a velocidade terminal, como a forma e a massa específica dos grãos, ainda não são plenamente compreendidos. Assim, os dados apresentados neste trabalho podem contribuir para o avanço de novas pesquisas e para o aperfeiçoamento do aparato experimental visando sua aplicação em maior escala.

METODOLOGIA

Projeto e construção do sistema de elutrião

Foi projetado um elutriador multiestágio, para avaliar a separabilidade de grãos crus de café conilon com diferentes formas e massas específicas. O sistema é composto por três tubos elutriadores confeccionados em policloreto de vinila (PVC), com diâmetros de 50 mm, 75 mm e 100 mm, respectivamente. Cada tubo atua na separação progressiva das partículas, desde as menores até as maiores. A seleção dos materiais considerou critérios de resistência mecânica e compatibilidade com o fluxo de ar ascendente. A Figura 1 ilustra o desenho esquemático do projeto, desenvolvido no programa Solidworks (2005), incluindo todas as suas dimensões. Já o Quadro 1 contém a lista completa dos materiais utilizados para construção do sistema.

Figura 1. Projeto detalhado do sistema de elutrião elaborado no programa solidworks



Fonte: Autores (2025).

Quadro 1. Lista de materiais utilizados no projeto do sistema de elutriação

Posição	Quantidade	Descrição do material
1	2	Registro esfera – 50 mm.
2	1	Tubo PVC – 50 mm.
3	1	Tê reto PVC – 50 mm.
4	1	Capa PVC – 50 mm.
5	5	Joelho PVC – 50 mm.
6	2	Capa PCV – 75 mm.
7	1	Tubo PVC – 75 mm.
8	2	Tê 75 x 50 mm – PVC.
9	2	Capa PVC – 100 mm.
10	1	Tubo PVC – 100 mm.
11	2	Tê 100 x 50 mm – PVC.

Fonte: Autores (2025).

Obtenção da amostra

As amostras de grãos crus de café conilon foram obtidas na Fazenda Experimental da Universidade Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus. Em cada experimento, cerca de 200 g de grãos foram utilizados, sendo a massa determinada em balança analítica (modelo ATY224, Shimadzu).

Montagem e operação do sistema

Na parte superior do primeiro elutriador, foi instalado um sistema de moega para recepção das partículas. Na base do sistema foi acoplado um soprador de ar, cuja velocidade foi monitorada por um termo-anemômetro (modelo TAD 500, Instruterm). O processo de elutriação foi conduzido em bateladas, com os experimentos realizados em triplicata. A temperatura do ar foi mantida em aproximadamente 25° C, com controle da umidade relativa para garantir a reproduzibilidade dos resultados.

Análise dimensional das partículas

Para caracterização das dimensões das partículas, foram selecionados aleatoriamente 60 grãos, os quais foram dispostos sobre uma folha branca de papel A4 e fotografados. As imagens obtidas foram processadas no programa ImageJ 1,40 g (Rasband, 2008), possibilitando a determinação dos diâmetros circunscrito (d_{pI}) e inscrito (d_{pII}) a partir da projeção da sombra de cada partícula em posição de repouso. Com base nesses dados, foi utilizada a Equação 1 (Cremasco 2021) para estimar o grau de alongamento (A_L).

$$A_L = \frac{d_{pI}}{d_{pII}} \quad (1)$$

As Equações 2 e 3 (Cremasco 2021) foram aplicadas para o cálculo da esfericidade (ϕ) e da massa específica (ρ_p) de cada partícula, sendo m a massa individual da partícula.

$$\phi = \frac{1}{A_L} \quad (2)$$

$$\rho_p = \frac{m}{\phi \left[\frac{4\pi}{3} \left(\frac{d_{pII}}{2} \right)^3 \right]} \quad (3)$$

CC BY 4.0
DEED
Attribuição 4.0
Internacional

As medidas obtidas por análise de imagem foram calibradas com dados coletados por meio de um paquímetro digital (modelo Mitutoyo), assegurando a precisão das análises. A partir dessas informações iniciais, foi possível calcular a velocidade terminal média das partículas por meio das Equações 4 a 8, nas quais:

$$C_D Re^2 = \frac{4}{3} \frac{[\rho(\rho_p - \rho)]gd_{pII}^3}{\mu^2} \quad (4)$$

$$Re = \left[\left(\frac{K_1 C_D Re^2}{24} \right)^{-n} + \left(\frac{C_D Re^2}{K_2} \right)^{-n/2} \right]^{-1/n} \quad (5)$$

$$K_1 = 0,843 \log_{10} \left(\frac{\phi}{0,065} \right) \quad (6)$$

$$K_2 = 5,31 - 4,88\phi \quad (7)$$

$$v_t = \left(\frac{\mu Re}{\rho d_{pII}} \right) \quad (8)$$

em que, C_D coeficiente de arraste [adimensional]; Re número de Reynolds [adimensional]; ρ massa específica do fluido [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]; g aceleração gravitacional [$\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$]; d_{pII} diâmetro da partícula [cm]; μ viscosidade dinâmica [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$]; K_1 , K_2 e n são parâmetros empíricos [adimensionais]; v_t velocidade terminal da partícula [$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$].

Peneiramento granulométrico

A padronização dos grãos foi realizada utilizando o sistema Tyler, reconhecido pela capacidade de classificar partículas em diferentes faixas granulométricas (Foust, 1982). Cerca de 200 g de grãos foram submetidos ao peneiramento com agitação mecânica, utilizando peneiras da série Tyler. Esse procedimento possibilitou: 1) A análise da distribuição do tamanho das partículas retidas em cada peneira; 2) O cálculo do diâmetro Sauter, que considera a relação entre a superfície e o volume das partículas, essencial para prever seu comportamento em fluxos de ar ascendente.

Para a caracterização granulométrica, foram utilizadas as peneiras # 2, # 2½, ..., # 5, sendo o símbolo “#” indicativo da malha (*mesh* correspondente). A distribuição de frequência foi representada por xis minúsculo, enquanto a distribuição cumulativa foi indicada por Xis (letra maiúscula). O símbolo (+) indica a fração mássica i retida na peneira “# i ”, ao passo que o símbolo (-) representa a massa que atravessa essa mesma peneira.

O diâmetro de Sauter (d_{ps}), representativo da distribuição granulométrica da amostra, foi calculado com base na Equação 9 (Cremasco 2021), sendo D_i o diâmetro médio associado à peneira de malha “# i ”.

$$d_{ps} = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{D_i} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

O mesmo procedimento foi repetido com as amostras retidas em cada estágio do elutriador, após o processo de separação.

Modelagem da distribuição granulométrica

Para descrever a distribuição dos tamanhos das partículas foi utilizado o modelo proposto por Rosin, Rammller e Bennet (RRB), na forma da Equação 10 (Massarani, 2001). Os parâmetros $D_{63,2}$ e n foram estimados com o auxílio do programa Matlab (MathWorks, 2005). A raiz do erro quadrático médio (*Root Mean-Square Error - RMSE*) e o coeficiente de determinação (R^2) foram empregados para avaliar a qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais.

$$X_i = 1 - \exp \left[- \left(\frac{D_i}{D_{63,2}} \right)^n \right] \quad (10)$$

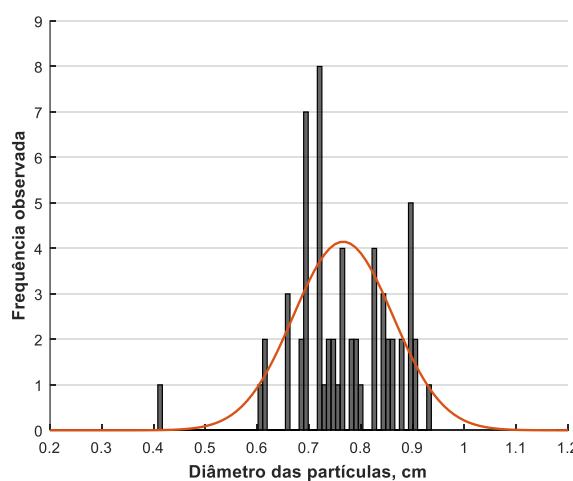
O uso da Equação 10 requer o conhecimento do diâmetro da partícula de diâmetro i (D_i) e a fração cumulativa mássica relativa à partícula de diâmetro i (X_i).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios do grau de alongamento (A_L) e da esfericidade (ϕ) dos 60 grãos crus de café conilon analisados foram, respectivamente, 2,504 ($\pm 0,9$) e 0,443 ($\pm 0,2$). Em estudos de caracterização de partículas, a esfericidade normalmente varia entre 0,45 (indicando partículas mais alongadas) e 0,97 (indicando partículas mais esféricas). Valores de alongamento superiores a 1,0 são características de partículas alongadas (Cremasco, 2021).

As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, a distribuição de frequência dos diâmetros inscritos (d_{pII}) e das massas específicas (ρ_p) dos 60 grãos crus de café conilon avaliados. Os valores médios obtidos foram 0,766 ($\pm 0,1$) cm para o diâmetro e 1,065 ($\pm 0,3$) g·cm⁻³ para a massa específica. Esses resultados estão de acordo com os valores reportados na literatura, considerando que a massa específica unitária de grãos crus de café varia na faixa de 0,7 a 1,3 g·cm⁻³ (Silva et al., 2015). Ao comparar os histogramas, nota-se maior heterogeneidade nas massas específicas, possivelmente devido à presença de grãos em diferentes estágios de maturação, bem como a ocorrência de grãos danificados ou com defeitos.

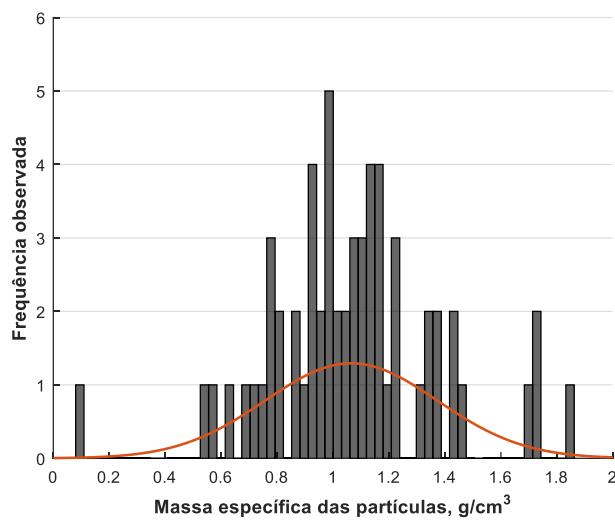
Figura 2. Frequência observada dos diâmetros de 60 grãos crus de café conilon



Fonte: Autores (2025).

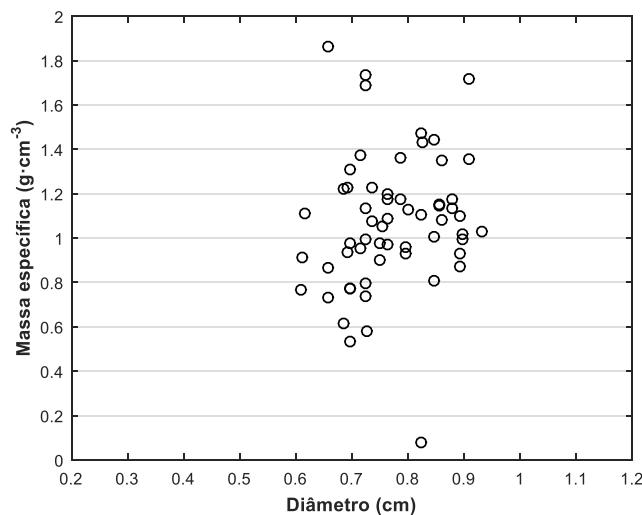


CC BY-NC-ND
Attribution 4.0
International

Figura 3. Frequência observada das massas específicas de 60 grãos crus de café conilon

Fonte: Autores (2025).

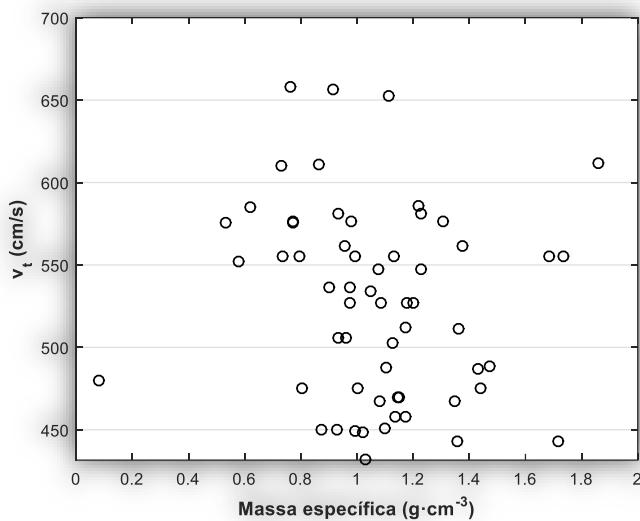
Em uma esfera perfeita ($\phi = 1,0$), existe uma relação cúbica inversa entre a sua massa específica (ρ_p) e o seu diâmetro inscrito (d_{pII}), conforme apresentado na Equação 3. No entanto, a Figura 4 retrata que não foi observada nenhuma relação entre a massa específica e o diâmetro inscrito dos grãos crus de café conilon analisados. Tal comportamento pode estar relacionado aos diferentes valores de esfericidade observados na amostra.

Figura 4. Relação entre a massa específica e o diâmetro de 60 grãos crus de café conilon

Fonte: Autores (2025).

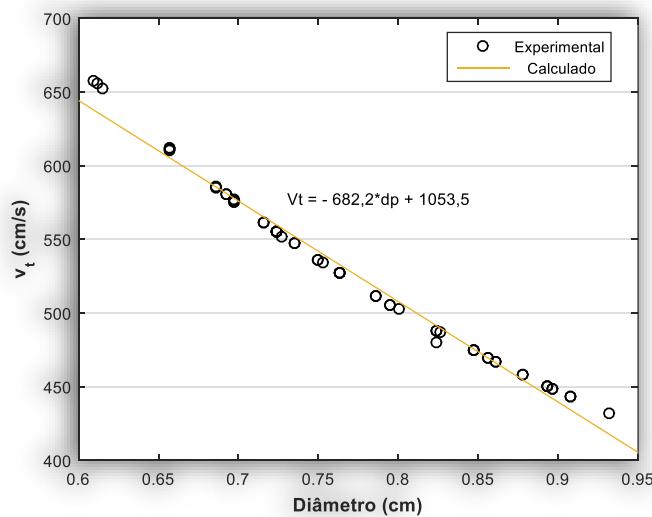
Na Figura 5 observa-se que não há relação entre a velocidade terminal (v_t) e a massa específica (ρ_p). Este resultado pode estar atribuído à variação nos valores de esfericidade (ϕ), uma vez que a forma do grão influencia diretamente a dinâmica do escoamento. Grãos com menor esfericidade, e consequente mais alongado, tendem a modificar o padrão do fluxo de ar ao seu redor, o que pode afetar significativamente a velocidade terminal.

Outros fatores, como a rugosidade superficial e a distribuição interna de densidade dos grãos, também podem interferir no comportamento das partículas no fluxo de ar. Combinadas as possíveis variações no teor de umidade, essas características podem explicar a ausência de correlação entre a massa específica e velocidade terminal.

Figura 5. Relação entre a velocidade terminal e a massa específica de 60 grãos crus de café conilon

Fonte: Autores (2025).

Por outro lado, a Figura 6 revela uma relação linear inversa entre a velocidade terminal (v_t) e o diâmetro das partícululas (d_{pII}): o aumento do diâmetro resulta em uma redução da velocidade terminal. Isso implica que as partículas maiores exigem uma menor velocidade de elutriação. Essa informação é crucial para o projeto de elutriadores, pois permite, a partir da distribuição granulométrica a aplicação de modelos matemáticos para estimar o diâmetro médio volumétrico (diâmetro de Sauter), conforme sugerido por Câmara et al. (2008) e Massarani (2001).

Figura 6. Relação entre a velocidade terminal e o diâmetro de 60 grãos crus de café conilon

Fonte: Autores (2025).

Na elutriação, a separação das partículas ocorre devido à diferença entre a velocidade média do fluido de arraste e a velocidade terminal das partícululas. A despeito disso, três situações podem ocorrer: (i) se a velocidade média do fluido for maior que a velocidade terminal as partículas serão elutriadas; (ii) se as velocidades forem iguais, as partículas permanecerão em equilíbrio; (iii) se a velocidade média for menor que a velocidade terminal, as partículas permanecerão retidas no equipamento (Peçanha, 2014).

O processo de elutrição é influenciado pelas características da fase fluida (viscosidade dinâmica e massa específica), da fase particulada (distribuição granulométrica, tamanho médio das partículas, forma e massa específica) e por condições operacionais, como temperatura, vazão, altura e diâmetro das colunas (Cremasco 2021).

Cerca de 200 g de grãos crus de café conilon foram submetidos a peneiramento granulométrico sob agitação mecânica constante. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1, na qual se vê que nenhuma massa ficou retida na peneira #2; 0,44% ficaram retidas na peneira #2½; 7,18% na peneira #3, e assim por diante. Consequentemente, 100% da massa total atravessou a peneira #2; 99,56% a peneira #2½, até que 1,17% atravessaram a peneira #5, sendo depositadas na peneira de fundo. O diâmetro médio de Sauter calculado com a Equação 9 foi de 0,59 cm.

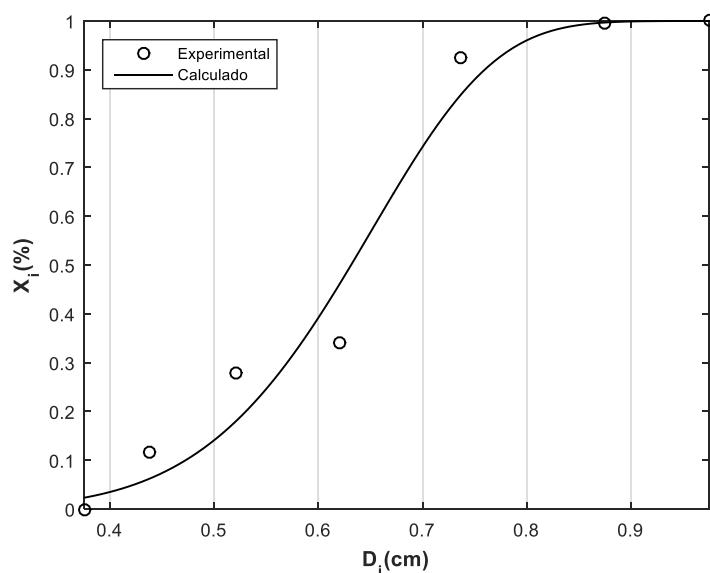
Tabela 1. Análise granulométrica referente ao peneiramento dos grãos crus de café conilon com diferentes peneiras da série Tyler

Mesh	x_i (%)	X_i (%)	$-D_i$ (cm)	$+D_i$ (cm)	D_i (cm)
+2	0,00	100,00	1,000	0,950	0,975
-2 + 2½	0,44	99,56	0,950	0,800	0,875
-2½ + 3	7,18	92,39	0,800	0,673	0,737
-3 + 3½	58,37	34,02	0,673	0,566	0,620
-3½ + 4	31,24	2,78	0,566	0,476	0,521
-4 + 5	1,62	1,17	0,476	0,400	0,438
Fundo	1,17	0,00	0,400	0,350	0,375

Fonte: Autores (2025).

Os valores de $D_{63,2}$ e n estimados a partir do ajuste do modelo Rosin, Rammler e Bennet (RRB), foram 0,67 ($\pm 0,1$) cm e 11,05 ($\pm 1,8$), respectivamente, com um intervalo de confiança de 95%. O ajuste do modelo aos dados experimentais está apresentado na Figura 7. O baixo valor do erro quadrático médio (RMSE = 0,0146) e o elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9992$) evidenciam a boa capacidade preditiva do modelo.

Figura 7. Ajuste do modelo RRB aos dados apresentados na Tabela 1



Fonte: Autores (2025).

A Equação 11 foi utilizada para estimar o diâmetro médio de Sauter a partir do modelo RRB, sendo $\Gamma(r)$ a função gama expressa na Equação 12 (Cremasco 2021).

$$d_{ps} = \frac{D_{63,2}}{\Gamma(1 - 1/n)} \quad (11)$$

$$\Gamma(r) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{r-1} dx \quad (12)$$

Para $n = 11,05$, obtém-se $\Gamma(0,9095) \approx 1,061$. Substituindo esse valor de n e o valor de $D_{63,2} = 0,67$ cm na Equação 11, obtém-se um diâmetro médio de Sauter de 0,63 cm, que representa uma diferença de 0,04 cm em relação ao valor obtido pela Equação 9 (0,59 cm).

Para o cálculo da velocidade de elutrição, é necessário definir a fração de corte das partículas a serem separadas (Massarani, 2001). Neste trabalho, foi utilizado o valor de $D_{63,2} = 0,67$ cm, com o objetivo de recuperar, no primeiro estágio do elutriador, uma fração mássica mínima de 63,2%.

Os cálculos da velocidade de arraste encontram-se no Quadro 2. Vale ressaltar que o regime de Stokes ($Re < 1,0$) não se aplica, o que significa que o escoamento não é governado por forças viscosas.

Quadro 2. Resultados obtidos para o cálculo da velocidade terminal para a partícula $D_{63,2}$

Parâmetro	Valor	Unidade	Equação
K_1	0,90	[·]	(6)
K_2	1,63	[·]	(7)
$C_D Re^2$	1,22E+07	[·]	(4)
Re	2 736,08	[·]	(5)
v_t	713,13	$cm \cdot s^{-1}$	(8)

Fonte: Autores (2025).

De posse da velocidade terminal, foram utilizadas as Equações 13, 14 e 15 (Massarani, 2001) para o cálculo do diâmetro mínimo das partículas carreadas pelo fluido de arraste. Os resultados estão no Quadro 3. O diâmetro estimado foi de 0,68 cm, valor ligeiramente superior ao $D_{63,2}$, sugerindo que uma velocidade de elutrição de $713,13 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ é suficiente para carrear grãos com diâmetros inferiores a esse valor no primeiro tubo elutriador.

$$C_D/Re = \frac{4}{3} \frac{(\rho_p - \rho)g\mu}{\rho^2 v_t^3} \quad (13)$$

$$Re = \left\{ \left[\frac{24}{K_1 (C_D/Re)} \right]^{n/2} + \left(\frac{K_2}{C_D/Re} \right)^n \right\}^{1/n} \quad (14)$$

$$Re = \frac{d_p v_t \rho}{\mu} \quad (15)$$

Quadro 3. Resultados obtidos para o cálculo do diâmetro da maior partícula carreada

Parâmetro	Valor	Unidade	Equação
C_D/Re	6,0E-4	[·]	(13)
Re	2 801,63	[·]	(14)
d_p	0,68	cm	(15)

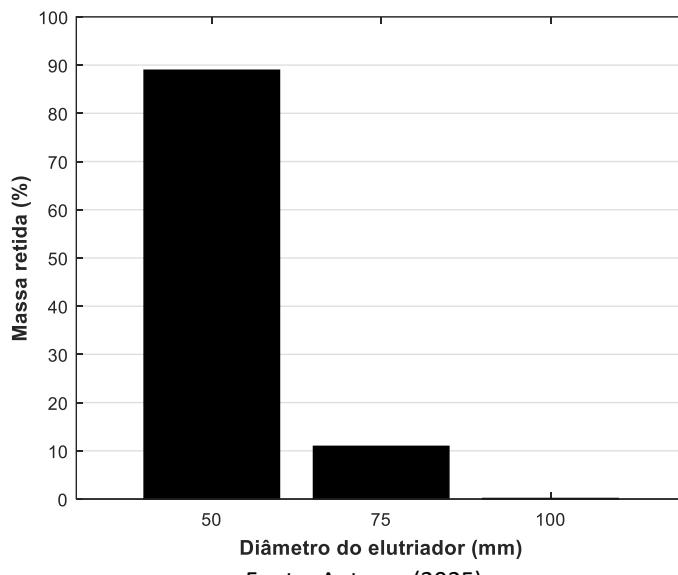
Fonte: Autores (2025).



CC BY 4.0
DEED
Attribution 4.0
International

A velocidade de $713,13 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ do fluido de arraste foi ajustada no sistema de elutrição. A Figura 8 demonstra o percentual de massa retida em cada elutriador: 175,80 g (87,90%) no primeiro, 21,61 g (10,80%) no segundo e 0,25 g (0,13%) no terceiro. Houve perda de massa de 2,35 g (1,17%), provavelmente por incrustações nas tubulações (Figura 8).

Figura 8. Massa de partículas retidas no sistema de elutriação nos tubos de 50, 75 e 100 mm

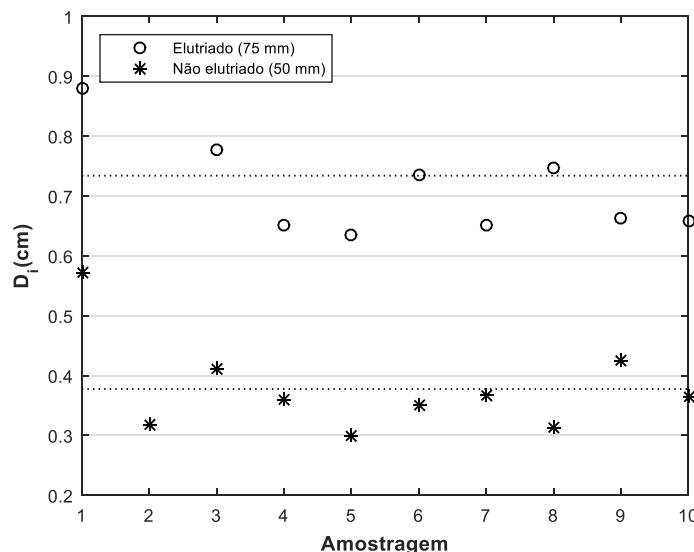


Fonte: Autores (2025).

Para contornar o problema da perda por incrustações nas tubulações recomenda-se a aplicação de revestimentos antiaderentes ou a utilização de sistemas de vibração mecânica. Uma alternativa para prevenir a aderência das partículas, seria controlar temporariamente o fluxo de ar durante o processo, de modo que remova as incrustações, sem causar o arraste das partículas entre estágios.

Após a elutrição foram coletadas 10 partículas (grãos crus de café conilon) dos tubos de 50 e 75 mm, que foram os tubos que mais retiveram matéria, para medição dos diâmetros. A Figura 9 mostra os resultados obtidos e mais uma vez evidenciam que as partículas de menores diâmetros permaneceram retidas no tubo de 50 mm. As linhas tracejadas indicam as médias observadas, que para o tubo de 50 mm foi de 0,38 cm e para o tubo de 75 mm foi de 0,73 cm.

Figura 9. Diâmetros de 10 partículas retiradas dos tubos de 50 mm e 75 mm após a elutrição



Fonte: Autores (2025).

A escolha da velocidade do fluido de arraste é crucial para o bom desempenho do sistema de elutrição. Os resultados demonstram que o sistema proposto atende às necessidades dos pequenos produtores, oferecendo uma solução acessível e eficiente para a classificação dos grãos. A simplicidade do projeto, associada ao uso de materiais de baixo custo, como tubos de PVC, torna o sistema replicável e escalável, contribuindo para obtenção de lotes homogêneos e de maior qualidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com crescimento da demanda por cafés de alta qualidade, a uniformidade e a consistência dos grãos durante o processo de torrefação tornam-se fatores importantes para a obtenção de um produto superior. No entanto, observa-se que muitas pequenas propriedades ainda não adotam práticas adequadas de pré-tratamento dos grãos, o que compromete diretamente a qualidade sensorial do café. Este estudo demostrou a viabilidade de aplicação de um sistema de elutrição de baixo custo para a classificação de grãos crus de café conilon em diferentes faixas de tamanho de partículas. Essa abordagem apresenta-se como uma alternativa promissora para promover maior homogeneidade nos lotes beneficiados, favorecendo o aprimoramento das etapas posteriores, como a torrefação e a moagem. Os valores médios obtidos experimentalmente para o diâmetro de partícula, o grau de alongamento e a esfericidade foram, respectivamente, $0,766 (\pm 0,1)$ cm, $2,504 (\pm 0,9)$ e $0,443 (\pm 0,2)$, caracterizando partículas alongadas. A massa específica foi $1,065 (\pm 0,3)$ g cm⁻³, apresentando maior heterogeneidade em comparação aos diâmetros, possivelmente devido à presença de grãos em diferentes estágios de maturação, grãos danificados ou com defeitos. Não foram observadas correlações entre a massa específica e o diâmetro, nem entre a massa específica e a velocidade terminal, o que pode estar associado às variações de esfericidade dos grãos. Por outro lado, foi identificada uma relação linear inversa entre a velocidade terminal e o diâmetro das partículas, indicando que as partículas de maior diâmetro requerem menor velocidade de elutrição para serem carreadas. O modelo de Rosin, Rammler e Bennet (RRB) apresentou excelente aderência aos dados experimentais, com valores de RMSE igual a 0,0146 e R² de 0,9992, demonstrando sua adequação para previsão de distribuição granulométrica. Para uma velocidade de elutrição de $713,13 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, foi possível reter 87,90% de massa no primeiro estágio elutriador, correspondente aos grãos de menor diâmetro, com faixa média próxima de 0,38 cm.

Este trabalho contribui significativamente para o avanço da área ao propor uma solução prática, de baixo custo e tecnicamente viável para a classificação de grãos de café, com especial atenção às demandas de pequenos produtores que carecem de tecnologias apropriadas. Os resultados obtidos fornecem subsídios relevantes para o desenvolvimento de equipamentos e processos voltados à padronização da matéria-prima, promovendo melhorias na qualidade final do produto e agregação de valor comercial.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

REFERÊNCIAS

- Baggenstoss, J., Poisson, L., Kaegi, R., Perren, R., & Escher, F. (2008). Coffee roasting and aroma formation: application of different time - temperature conditions. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(14), 5836-5846. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf800327j>
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento [MAPA] (2003). Instrução Normativa nº 8, de 11 de junho de 2003. Regulamento Técnico de Identidade e de Qualidade para a Classificação do Café Beneficiado Grão Cru. Recuperado de <https://www.abic.com.br/wp-content/uploads/2021/07/Instrucao-Normativa-08-03.pdf>
- Camara, F. T., Santos, J. L. Silva, E. A., & Ferreira, M. C. (2008). Distribuição volumétrica e espectro de gotas de bicos hidráulicos de jato plano de faixa expandida XR11003. *Engenharia Agrícola*, 28(4), 740-49. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000400014>
- Companhia Nacional de Abastecimento [CONAB] (2024). Acompanhamento da safra brasileira de café. Recuperado de <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>
- Couto, S. M., Magalhães, A. C., de Queiroz, D. M., & Bastos, I. T. (2003). Parâmetros relevantes na determinação da velocidade terminal de frutos de café. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(1), 141-48. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000100023>
- Cremasco, M. A. (2021). *Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos e outros trabalhos*. 3a ed. São Paulo: Editora Blucher.
- Fabbri, A., Cevoli, C., Alessandrini, L., & Romani, S. (2011). Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting process. *Journal of Food Engineering*, 105(2), 264-269. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.02.030>
- Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L., & Andersen, L. B. (1982). *Princípios das operações unitárias*. 2a ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. Giomo, G. S., Nakagawa, J., & Gallo, P. B. (2008). Beneficiamento de sementes de café e efeitos na qualidade física. *Bragantia*, 67(4), 997-1010. <http://hdl.handle.net/11449/5775>
- Gloess, A. N., Schönbächler, B., Klopprogge, B., DAmbrosio, L., Chatelain, K., Bongartz, A., & Yeretzian, C. (2013). Comparison of nine common coffee extraction methods: instrumental and sensory analysis. *European Food Research and Technology*, 236(4), 607-627. <https://doi.org/10.1007/s00217-013-1917-x>
- Massarani, G. (2001). *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. 2a ed. Rio de Janeiro. COPPE-UFRJ. <https://vdoc.pub/documents/fluidodinamica-em-sistemas-particulados-1fv64njrc1v8>
- MathWorks, Inc. (2005). *MATLAB: the language of technical computing. Desktop tools and development environment, version 7*. MathWorks. Recuperado de <http://vdoc.pub/documents/matlab-the-language-of-technical-computing-desktop-tools-and-development-environment-version-7-2uorka53f5gg>
- Matiello, J. B., Almeida, S., Garcia, A. W. R., & Santinato, R. (2020). *Cultura de café no Brasil - Manual de recomendações*. Fundação Procafé, MG.
- Mayer, F., Czerny, M., & Grosch, W. (2000). Sensory study of the character impact aroma compounds of a coffee beverage. *European Food Research and Technology*, 211(4), 272-276. Recuperado de https://link.springer.com/article/10.1007/s0021700_00169
- Nascimento, L. G. do., Assis, G. A., de., Fernandes, M. I. S. do., Pires, P. S., dos., Carvalho, F. J., & Araújo, N. O., de. (2020). *Mulching in coffee growing: effects on productivity, maturation, grain shape and beverage quality*. Research, Society and Development, 9(9), e765997727. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7727>
- Peçanha, R. (2014). *Sistemas Particulados#: Operações unitárias envolvendo partículas e fluidos*. 1a ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Rasband, W. (2008). ImageJ 1.40 g. *National Institutes of Health*, USA. <https://imagej.net/ij/download.html>
- Rezende, A. M., Rosado, P. L., & Gomes, M. F. M. (2007). *Café para todos: a informação na construção de um comércio de café mais justo*. 1a ed. Embrapa, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Belo Horizonte.
- Segges, J. (2001). Focalizando o café e a qualidade. *Universidade Rural. Seropédica*, RJ, 45-47.
- Silva, J. D. S. & Berbert, P. A. (1999). Colheita, secagem e armazenagem de café. Viçosa: Aprenda Fácil Editora.
- Silva, L. S., Morelli, A. P., & Joaquim, T. N. M. (2015). *Café: beneficiamento e industrialização*. Cap. 17, 384-398pp. Rondônia. Recuperado de <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes-/publicacao/1040772/cafe-beneficiamento-e-industrializacao>
- SolidWorks, D. S. (2005). SolidWorks®. Version Solidworks, 1, 1-8. Recuperado de <https://www.solidworks.com/pt-br/domain/design-engineering>



CC BY 4.0
DEED
Attribution 4.0
International