

## Distribuição da pressão estática em uma coluna de grãos de café: análise por elementos finitos

### Static Pressure Drop across a Bed of Coffee Beans: Finite Element Analysis



<http://opn.to/a/CbobL>

Filipe de Oliveira da Silva<sup>1\*</sup>, Ednilton Andrade Tavares<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Lavras. Departamento de Engenharia, Lavras, MG, Brasil.

**RESUMO:** Vários são os processos de pós-colheita de produtos agrícolas em que um fluido escoar através de um leito fixo de partículas. Partindo deste análise objetivou-se modelar a queda da pressão estática pela técnica de elementos finitos, em um leito recheado de grãos de café (*Coffea arabica* L.) com diferentes teores de água, submetido a diferentes fluxos de ar. Os resultados de queda de pressão empregando a técnica de elementos finitos se ajustaram de forma satisfatória aos dados obtidos pelo método clássico. A queda de pressão ao longo da altura da coluna de café variou linearmente entre 50,6 e 433,1 Pa para as profundidades na coluna de 0,15 e 0,95 m respectivamente. O erro relativo se manteve abaixo de 7 % para todas as amostras e a resistência distribuída média foi de  $7,2 \times 10^7 \text{ m}^{-2}$ , com erro relativo médio de 0,3 % para a média entre os tratamentos de resistência distribuída.

**Palavras-chave:** queda de pressão, resistência distribuída, fluxo de ar.

**ABSTRACT:** Several are the post-harvest processes of agricultural products in which a fluid flows through a fixed bed of particles. Therefore, the objective of this work was to model the static pressure drop in a bed filled with coffee beans (*Coffea arabica* L.) with different water contents, submitted to different airflows. The pressure drop results using the finite element technique were satisfactorily adjusted to the data obtained by a classical method, where the pressure drop along the elevation of the coffee column varied linearly between 158.8 and 455.6 Pa, for the column depths of 0.45 and 0.95 m, respectively. The relative error, by this technique remained below 5 %, for all samples. The distributed resistance had an average of  $7,2 \times 10^7 \text{ m}^{-2}$ , with an average relative error of 0.3 %, for all treatments considered.

**Keywords:** pressure drop, distributed resistance, airflow.

\*Correspondência para autor: Filipe da Silva de Oliveira. e-mail: [filipe.oliveira@posgrad.ufla.br](mailto:filipe.oliveira@posgrad.ufla.br)

14/01/2018

11/09/2018

## INTRODUÇÃO

Para a obtenção de um armazenamento eficiente de grãos agrícolas a granel, o produto deve ser submetido a operações de secagem e de aeração. A execução destes processos prolonga o período de armazenamento e evita a deterioração do produto, resultante da sua atividade biológica. Sendo assim, uma massa de ar é geralmente forçada a passar pelo produto agrícola; o ar, encontrando resistência do produto granular a sua passagem, escoam pelos espaços intergranulares. A determinação da resistência ao fluxo de ar para produtos agrícolas pode ser medida pela queda de pressão, sendo fundamental em projetos de sistemas de secagem e aeração (Brandão *et al.*, 2016; Korese *et al.*, 2016; Olatunde *et al.*, 2016; Gao *et al.*, 2018).

A resistência ao fluxo de ar em sistemas de secagem e aeração depende de diversos fatores como intensidade do fluxo de ar, altura da camada de grãos, presença de impurezas no produto, tamanho, forma, teor de umidade, distribuição dos grãos na massa granular e rugosidade do produto (Brooker *et al.*, 1992).

O método de enchimento da coluna de grãos, a sua compactação e a direção do fluxo de ar, também influenciam na resistência de um produto à passagem de um fluxo de ar. Nesses sistemas, as chapas perfuradas, os dutos perfurados e as tubulações, são responsáveis pelo aumento da queda de pressão (Gratão *et al.*, 2013; Teixeira *et al.*, 2015).

Vários autores como Corrêa *et al.* (2001) estudaram os efeitos da densidade do fluxo de ar, do tamanho e da quantidade de impurezas, na queda de pressão estática em massas granulares de feijão; além de ajustar os modelos matemáticos empíricos básicos de acordo com os dados obtidos. Outros pesquisadores estudaram a variação da pressão estática ao longo de uma

coluna de café, em função da densidade do fluxo de ar, do teor de umidade, da massa específica aparente e da profundidade da camada do produto (Afonso, 1994).

Teoricamente, o problema de escoamento de fluidos é definido pelas leis de conservação de massas, de momentum e de energia. Quando se consideram as seguintes restrições: (a) o fluido é Newtoniano, (b) o fluido é incompressível, (c) não ocorre mudança de fase, (d) o escoamento é isotérmico e permanente, (e) o domínio espacial do problema não muda com o tempo e; (f) a viscosidade do fluido é constante, a equação de Navier-Stokes é dada pela [Equação 01](#).

Assim, a [Equação 01](#) pode ser reescrita em função das componentes x, y e z ([Equação 02](#)).

Vários pesquisadores têm determinado experimentalmente a queda de pressão em colunas de produtos agrícolas Iqbal *et al.* (2015); Dilmac *et al.* (2016); Du *et al.* (2016) e Horabik *et al.* (2016). Enquanto outro tem estudado a expressão do gradiente de pressão em função do fluxo de ar, imposto a uma coluna de grãos (Shedd, 1953; Hukill y Ives, 1955; Haque *et al.*, 1978; Hunter, 1983; Giner y Denisienia, 1996).

Diversas técnicas numéricas têm sido amplamente aproveitadas na resolução de problemas de escoamento de fluidos, dentre as quais a técnica de elementos finitos vem sendo empregada com sucesso pelos pesquisadores para a resolução de diferentes problemas, envolvendo escoamento de ar em produtos agrícolas como por exemplo para a secagem Beigi (2017); Chiang *et al.* (2017); Lemus-Mondaca *et al.* (2017) e para a resistência distribuída De Andrade *et al.* (2001); Khatchatourian e Savicki (2004); Devilla *et al.* (2005); Yue e Zhang (2014); Moses *et al.* (2015). Por estas razões, os objetivos gerais do presente trabalho foram primeiramente analisar, através da técnica de elementos finitos, a queda de pressão estática em

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V^p) + \nabla \cdot (\rho V^p V^p) = -\nabla P + \mu \nabla^2 V^p + \rho g^p \quad (\text{Eq. 01})$$

$$\rho \left( \frac{\partial(V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(V_z V_x)}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + \mu_e \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Eq. 02.a})$$

$$\rho \left( \frac{\partial(V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(V_z V_y)}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + R_y + \mu_e \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Eq. 02.b})$$

$$\rho \left( \frac{\partial(V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial(V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial(V_z V_z)}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + R_z + \mu_e \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Eq. 02.c})$$

um leito recheado de café, submetido a diferentes fluxos de ar e teores de água; assim como determinar a permeabilidade do leito aos diferentes fluxos de ar e teores de água.

## MÉTODOS

*Leito de partículas e fluxos de ar:* Nas simulações das quedas de pressão no interior de um leito de partículas, utilizou-se a geometria de um duto de seção transversal circular (0,1525 m de raio) com 1,00 m de comprimento, posicionado na vertical. O duto foi recheado com café despulpado (*Coffea arabica* L.) variedade Catuaí, a teores de água de 12,7 e 23,5% b.u. e os fluxos de ar impostos na entrada do leito foram de 0,165; 0,253 e 0,263 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>.

*Análise por elementos finitos:* A determinação do perfil de pressão e da velocidade em problemas de escoamento de fluidos em dutos sem partículas foi obtida através da técnica de elementos finitos, assessorada por “softwares” interativos para análise de sistemas, o ANSYS® disponível comercialmente.

Os parâmetros de entrada para os programas computacionais desenvolvidos nesta área foram, basicamente: as propriedades do fluido, as condições de contorno em todas as superfícies abertas ou fechadas do sistema e o tipo de análise a ser desenvolvida. Neste sentido, as condições de contorno nas superfícies abertas podem ser velocidades, pressões ou combinações destes parâmetros. Como resultado, têm-se as distribuições de velocidade e de pressão nos nós, provenientes da discretização do sistema.

Neste trabalho, o sistema ANSYS versão 15.0 foi utilizado para o desenvolvimento de um programa-fonte, para realizar uma análise tridimensional do escoamento de ar em uma coluna fixa de grãos de café. O produto no interior da coluna foi considerado equivalente a uma resistência distribuída no interior do duto, ou seja, correspondente aos termos Rx, Ry e Rz, nas Equações (2a-b-c).

Portanto, foi desconsiderada a geometria do meio poroso e modelada como uma resistência distribuída. Como se observa na [Equação \(03\)](#), tal resistência pode ser devido a um, ou a uma combinação dos seguintes fatores: uma perda localizada de pressão (F); um fator de fricção (f) ou um fator (C) relacionado à permeabilidade (K)

do meio, tal que (C=1/K). Assim, o gradiente de pressão total, na direção x, pode ser expresso por [ANSYS \(2013\)](#):

$$\frac{\partial P}{\partial x_{\text{resistência}}} = - \left\{ F \rho V_x |V| + \frac{f}{D_h} \rho V_x |V| + C_x \mu V \right\} \quad (\text{Eq. 03})$$

O duto foi dividido em 1440 elementos do tipo FLUID142, com oito nós, resultando em 1927 nós ao final da discretização, como é mostrado na [Figura 1](#). As entradas do programa-fonte foram as propriedades do ar (assumidas constantes), o valor de C: mencionado no texto como RD1 (resistência distribuída) e as condições de contorno, que pela estrutura do programa computacional, foram impostas para todas as superfícies abertas ou fechadas que delimitaram o meio sendo investigado.

Foram usadas como condições de contorno: (1) velocidades nulas (V1), segundo os três eixos coordenados na parede lateral interna do duto; (2) velocidade constante e uniformemente distribuída (V2) na base do duto e; (3) pressão (P3) igual a zero (referência) em todos os nós da extremidade superior do duto.

*Comparação dos modelos:* Os resultados da queda de pressão do ar escoando através de uma coluna de grãos de café, determinados pela técnica de elementos finitos, foram comparados com aqueles provenientes dos coeficientes das equações quadráticas ajustadas para descrever o comportamento da pressão estática em função do teor de água, profundidade na coluna e densidade do fluxo para o café despulpado sem impurezas ([da Silva et al., 2006](#)). Os valores da massa específica real, da massa específica aparente e da porosidade para o café despulpado com teor de água de 12,7 % foram de 0,7929 g cm<sup>-3</sup>, 0,3879 g cm<sup>-3</sup> e 51,59 % respectivamente. Enquanto que as mesmas propriedades físicas para as amostras com 23,5 % foram de 0,8685 g cm<sup>-3</sup>, 0,4635 g cm<sup>-3</sup> e 48,35 % respectivamente ([Tabela 1](#)). A validade do modelo proposto pelos autores são para as profundidades que variam entre 0,00 e 0,95 m e para fluxos entre 0,16 e 0,26 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na [Figura 2](#) é apresentado o “contour plot” das pressões estáticas simuladas pelo ANSYS da amostra de café com 12,7 % de teor de água, sem impureza e com fluxo de ar de 0,165 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>.

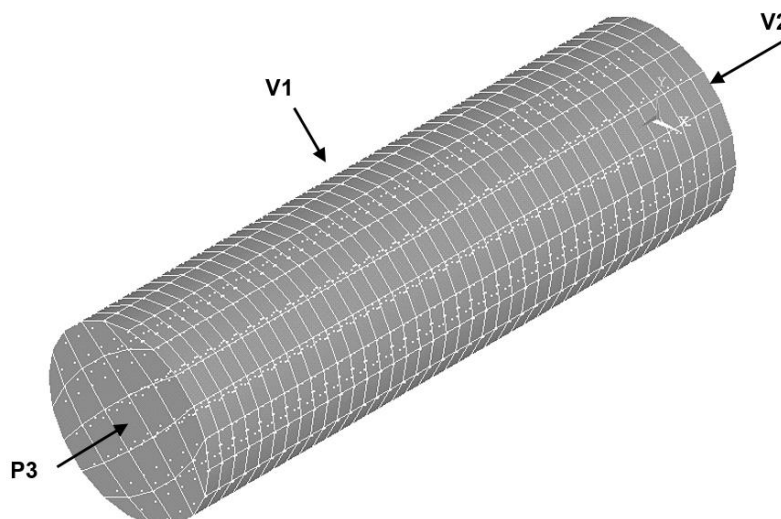


FIGURA 1. Malha e condições de contorno para análise por elementos finitos.

TABELA 1. Coeficientes das equações quadráticas ( $aU + bU^2 + cP + dP^2 + eF + fF^2 + gUF + hFP + iUP + j$ ) ajustadas para descrever o comportamento da pressão estática em função do teor de umidade (U), profundidade na coluna (P) e densidade do fluxo (F) para o café despulpado (Da Silva et al., 2006)

Coeficientes	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
	-1,31	0	95,71	27,63	-651,14	1.202,38	6,62	1.355,89	-1,26	83,23

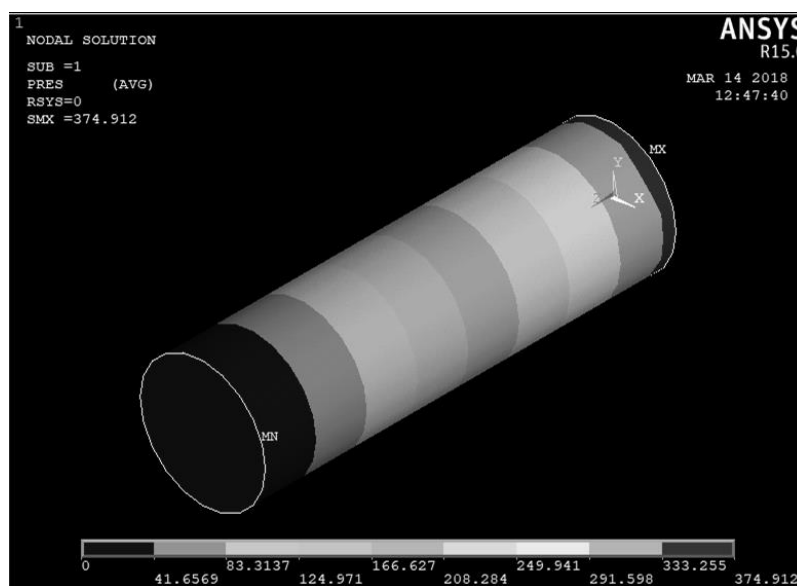


FIGURA 2. Solução nodal do café despulpado com teor de água em 12,7 % b.u. e fluxo de ar em  $0,165 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

Pode-se observar que ao longo da coluna, a partir do eixo das coordenadas (X, Y, Z), os valores obtidos decrescem. De acordo com dados simulados, a pressão máxima e mínima na coluna se localizam respectivamente no eixo das coordenadas e no topo da coluna, sendo de 374,9 Pa e 0 Pa.

Os resultados das simulações das variações de pressão em diferentes profundidades de uma

coluna de café despulpado com teor de água em 12,7 % b.u. para diferentes fluxos de ar são apresentados na Figura 3(a), e para amostras com teor de água em 23,5 % b.u. na Figura 3(b).

Pôde-se observar que a densidade do fluxo de ar possui relação direta com a resistência do escoamento do ar, bem como com a profundidade na coluna de café. Como esperado, os valores de pressão estática crescem com o aumento da

densidade do fluxo de ar aplicada na massa. Por outro lado, não se observa diferença de pressão estática entre os tratamentos com diferentes teores de água do café despulpado analisados.

Os erros relativos percentuais correspondentes às quedas de pressões obtidas pela simulação são apresentados na [Figura 4\(a\)](#) para amostras com teor de água de 12,7 % e na [Figura 4\(b\)](#) para amostras com teor de água de 23,5 %. Nesta figura observa-se que os valores dos erros relativos diminuem a medida em que se aumenta a camada do produto, o que está em concordância com os dados obtidos por [Moses et al. \(2014a, 2014b, 2014c\)](#).

Para cada fluxo de ar, os erros representam os valores obtidos pelo modelo que

satisfatoriamente descreve os dados de [Da Silva et al. \(2006\)](#). Aliás, observa-se que o modelo implementado usando o programa ANSYS® proporciona estimativas confiáveis, onde todos os fluxos de ar testados apresentam erros relativos inferiores a 7 %.

Os valores das resistências distribuídas (RD1) representativas do leito de café despulpado, para cada valor de fluxo de ar provenientes do processo de otimização e acompanhados dos erros relativos envolvidos na otimização, são apresentados na [Tabela 2](#). Para tais valores de resistência distribuída, obteve-se a média de  $7,2 \times 10^7 \text{ m}^{-2}$ , considerando-se todos os fluxos de ar empregados.

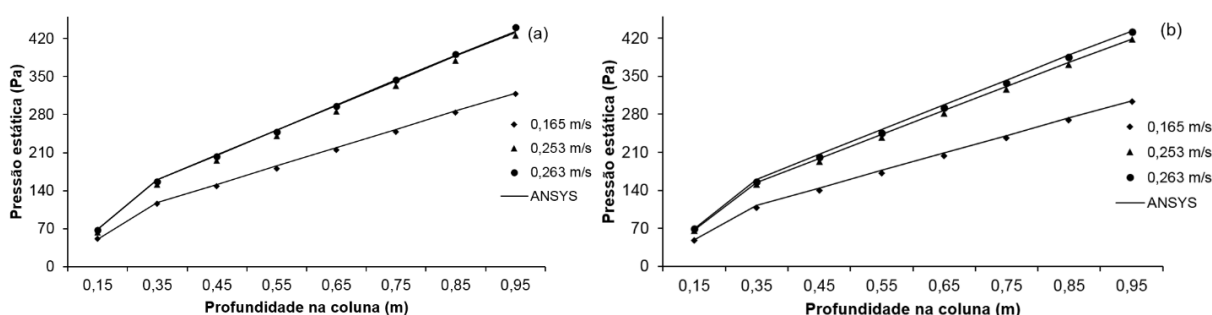


FIGURA 3. Queda de pressão em função da profundidade em uma coluna de café despulpado com teores de água de (a) 12,7 % b.u.e (b) 23,5 % b.u., para fluxos de ar ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).

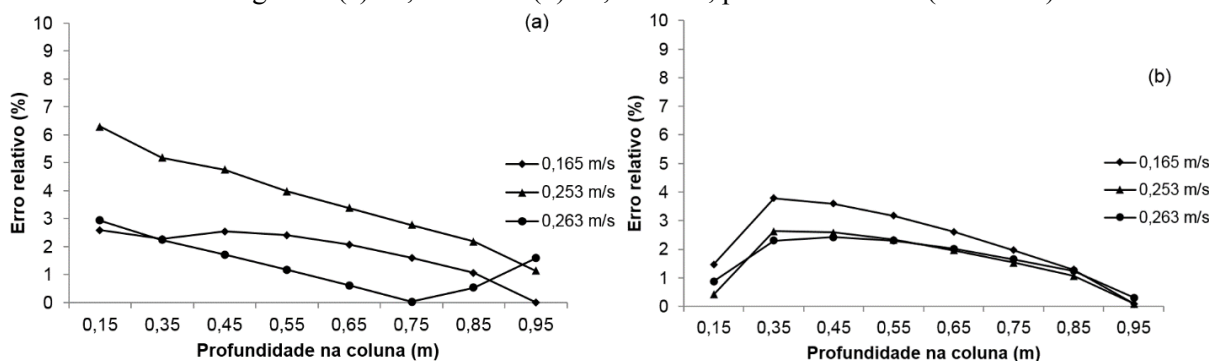


FIGURA 4. Erros relativos envolvidos nos valores simulados para a queda de pressão nas profundidades da coluna de café despulpado com teores de água de (a) 12,7 % b.u. e (b) 23,5 % b.u., para fluxos de ar ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).

TABELA 2. Valores da resistência distribuída (RD1) da coluna de café despulpado, acompanhados dos erros relativos médios, para diferentes fluxos de ar e teores de água

Teor de água (%)	Fluxo de ar ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ )	RD1 ( $\text{m}^{-2}$ )	Erro Relativo Médio
12,7	1,650E-01	7,964E+07	1,496E-05
	2,530E-01	7,027E+07	1,144E-02
	2,630E-01	6,785E+07	3,190E-03
23,5	1,650E-01	7,590E+07	1,009E-03
	2,530E-01	6,807E+07	9,167E-04
	2,630E-01	6,785E+07	3,190E-03

A pesquisa desenvolvida por [Ergun \(1952\)](#), fornece uma expressão para a determinação da permeabilidade a qual é considerada constante em um leito recheado de partículas com esferas homogêneas. Assim, no presente trabalho foi verificado que a permeabilidade pela equação de Ergun é de  $4,94 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ , para um diâmetro de 5,8 mm e porosidade de 42,5 %. Sobre as considerações analisadas, a permeabilidade do leito obteve uma média de  $1,39 \times 10^{-8} \text{ m}$ , onde a permeabilidade é inversamente proporcional a resistência distribuída.

## CONCLUSÕES

Ao variar a profundidade na coluna, os valores de pressão estática se tornaram maiores a medida em que se empregou maior teor de água ou maior densidade de fluxo de ar.

Com as densidades de fluxo utilizadas e com as profundidades na coluna, os valores obtidos pelo software ANSYS 15.0.1 descreveram de maneira confiável os valores obtidos pelo modelo de [Da Silva et al. \(2006\)](#).

Os valores de resistência distribuída do leito de café, determinada a partir de simulações e utilizando-se a técnica de elementos finitos, teve uma média entre todos os fluxos e teores de água estudados de  $7,16 \times 10^7 \text{ m}^{-2}$ , com erro relativo médio de  $3,29 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , apresentando tendência de diminuir com o aumento da densidade do fluxo de ar.

A equação de Ergun, usada para estimar a resistência oferecida ao fluxo de ar por uma coluna de partículas esféricas e homogêneas, não foi razoável para predizer a resistência dos leitos de café submetidos a diferentes densidades de fluxo e com diferentes teores de água.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

AFONSO, A.D.L.: Gradiente de pressão estática em camadas de fruto de café (*Coffea arabica* L.) com diferentes teores de umidade. Dissertação de Mestrado, [en línea], Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, 68 p., 1994, Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/>

[123456789/67](#) , [Consulta: 12 de enero de 2018].

ANSYS: Ansys/Multiphysics Product (Program and Program Documentation), (Versión ANSYS Inc, 2013), Ed. ANSYS, Houston, Texas, USA, 2013.

BEIGI, M.: “Numerical simulation of potato slices drying using a two-dimensional finite element model”, *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 23(3): 431-440, 2017, ISSN: 2217-7434, DOI: 10.2298/CICEQ160530057B.

BRANDÃO, F.J.B.; DA SILVA, M.A.P.; SPEROTTO, F.C.S.; JASPER, S.P.; BEZERRA, P.H.S.; BIAGGIONI, M.A.M.: “Variation of static pressure in a crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) grains column”, *African Journal of Agricultural Research*, 11(1): 16-22, 2016, ISSN: 1991-637X, DOI: 10.5897/AJAR2015.10489.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W.: *Drying and storage of grains and oilseeds*, Ed. Springer Science & Business Media, New York, 450 p., 1992, ISBN: 978-0-442-20515-7.

CHIANG, C.-C.; WU, D.-Y.; KANG, D.-Y.: “Detailed Simulation of Fluid Dynamics and Heat Transfer in Coffee Bean Roaster”, *Journal of food process engineering*, 40(2): 1-7, 2017, ISSN: 1745-4530, DOI: 10.1111/jfpe.12398.

CORRÊA, P.C.; GUIMARÃES, W.T.; ANDRADE, E.T.: “Resistência ao fluxo de ar em camadas de grãos de feijão afetada pelo teor de impureza”, *Revista Brasileira de Armazenamento*, 26: 53-59, 2001, ISSN: 0100-3518.

DA SILVA, D.J.; COUTO, S.M.; PEIXOTO, A.B.; DOS SANTOS, A.E.; VIEIRA, S.M.: “Resistência de café em coco e despulpado ao fluxo de ar”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2006, ISSN: 1415-4366, DOI: 10.1590/S1415-43662002000300025.

DE ANDRADE, E.T.; COUTO, S.M.; DE QUEIROZ, D.M.: “Distribuição da pressão estática em uma coluna de canola: análise por elementos finitos”, *Revista Brasileira de*

- Engenharia Agrícola e Ambiental , 5(2): 288-295, 2001, ISSN: 1807-1929.
- DEVILLA, I.A.; COUTO, S.M.; DE QUEIROZ, D.M.: “Distribuição do fluxo de ar em silos com sistema de aeração&58; análise por elementos finitos Airflow distribution in aerated silos&58; finite element analysis”, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental -Agriambi, 9(2): 256-262, 2005, ISSN: 1415-4366, DOI: 10.1590/S1415-43662005000200017.
- DILMAC, M.; TARHAN, S.; POLATCI, H.: “Aerodynamic properties of Faba bean (*Vicia faba* L.) Seeds”, Legume Research-An International Journal, 39(3): 379-384, 2016, ISSN: 0976-0571, DOI: 10.18805/Ir.v39i3.10751.
- DU, W.; QUAN, N.; LU, P.; XU, J.; WEI, W.; ZHANG, L.: “Experimental and statistical analysis of the void size distribution and pressure drop validations in packed beds”, Chemical Engineering Research and Design, 106: 115-125, 2016, ISSN: 0263-8762, DOI: 10.1016/j.cherd.2015.11.023.
- ERGUN, S.: “Fluid flow through packed columns”, Chem. Eng. Prog., 48: 89-94, 1952, ISSN: 0360-7275.
- GAO, M.; CHENG, X.; DU, X.: “Simulation of bulk density distribution of wheat in silos by finite element analysis”, Journal of Stored Products Research, 77: 1-8, 2018, ISSN: 0022-474X, DOI: 10.1016/j.jspr.2018.02.003.
- GINER, S.A.; DENISIENIA, E.: “Pressure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines”, Journal of Agricultural Engineering Research, 63(1): 73-85, 1996, ISSN: 0021-8634, DOI: 10.1006/jaer.1996.0009.
- GRATÃO, P.T. da S.; DEVILLA, I.A.; SERVULO, A.C.O.; JESUS, F.F. de; FERREIRA, D. de A.: “Loss of static pressure in a column of quinoa grains”, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental , 17(8): 848-854, 2013, ISSN: 1415-4366, DOI: 10.1590/S1415-43662013000800008.
- HAQUE, E.; FOSTER, G.H.; CHUNG, D.S.: “Static pressure drop across a bed of corn mixed with fines”, Transactions of the ASAE, 21(5): 997-1000, 1978, ISSN: 2151-0032, DOI: 10.13031/2013.35430.
- HORABIK, J.; PARAFINIUK, P.; MOLEND, M.: “Experiments and discrete element method simulations of distribution of static load of grain bedding at bottom of shallow model silo”, Biosystems Engineering, 149: 60-71, 2016, ISSN: 1537-5110, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.06.012.
- HUKILL, W.V.; IVES, N.C.: “Radial airflow resistance of grain”, Agricultural Engineering, 36(5): 332-335, 1955, ISSN: 2406-1123.
- HUNTER, A.J.: “Pressure difference across an aerated seed bulk for some common duct and store cross-sections”, Journal of Agricultural Engineering Research , 28(5): 437-450, 1983, ISSN: 0021-8634, DOI: 10.1016/0021-8634(83)90135-X.
- IQBAL, T.; ECKHOFF, S.R.; SYED, A.F.; NIZAMI, A.-S.; SADEF, Y.: “Airflow resistance of chopped miscanthus on drying platform”, Transactions of the ASABE, 58(2): 487-492, 2015, ISSN: 2151-0032, DOI: 10.13031/trans.58.10827.
- KHATCHATOURIAN, O.A.; SAVICKI, D.L.: “Mathematical modelling of airflow in an aerated soya bean store under non-uniform conditions”, Biosystems Engineering , 88(2): 201-211, 2004, ISSN: 1537-5110, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2004.03.001.
- KORESE, J.K.; RICHTER, U.; HENSEL, O.: “Airflow Resistance through Bulk Sweet Potato Roots”, Transactions of the ASABE , 59(4): 961-968, 2016, ISSN: 0001-2351, DOI: 10.13031/trans.59.11283.
- LEMUS-MONDACA, R.A.; VEGA-GÁLVEZ, A.; ZAMBRA, C.E.; MORAGA, N.O.: “Modeling 3D conjugate heat and mass transfer for turbulent air drying of Chilean papaya in a direct contact dryer”, Heat and Mass Transfer, 53(1): 11-24, 2017, ISSN: 1432-1181, DOI: 10.1007/s00231-016-1799-0.
- MOSES, J.A.; CHELLADURAI, V.; JAYAS, D.S.; ALAGUSUNDARAM, K.: “Simulation and Validation of Airflow Pressure Patterns in Hopper-Bottom Bins Filled with Wheat”, Applied engineering in agriculture, 31(2):

- 303-311, 2015, ISSN: 0883-8542, DOI: 10.13031/aea.31.10738.
- MOSES, J.A.; JAYAS, D.S.; ALAGUSUNDARAM, K.: “Simulation and validation of airflow distribution patterns in bins filled with canola”, *Journal of Agricultural Engineering*, 51(4): 14-20, 2014a, ISSN: 0976-2418.
- MOSES, J.A.; JAYAS, D.S.; ALAGUSUNDARAM, K.: “Simulation and validation of airflow pressure patterns for horizontal airflow through bulk canola”, *Trends in Biosciences*, 7(17): 2385-2391, 2014b, ISSN: 1881-7823.
- MOSES, J.A.; JAYAS, D.S.; ALAGUSUNDARAM, K.: “Three-dimensional Airflow Pressure Patterns in Flat-Bottom Bins Filled with Barley for Different Duct Configurations”, *Trends in Biosciences*, 7(17): 2392-2396, 2014c, ISSN: 1881-7823.
- OLATUNDE, G.; ATUNGULU, G.G.; SADAKA, S.: “CFD modeling of air flow distribution in rice bin storage system with different grain mass configurations”, *biosystems engineering*, 151: 286-297, 2016, ISSN: 1537-5110, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.09.007.
- SHEDD, C.K.: “Resistance of grains and seeds to air flow”, *Agricultural Engineering*, 34(9): 616-619, 1953, ISSN: 2406-1123.
- TEIXEIRA, D.L.; DE MATOS, A.T.; DE CASTRO MELO, E.: “Resistance to forced airflow through layers of composting organic material”, *Waste management*, 36: 57-62, 2015, ISSN: 0956-053X, DOI: 0.1016/j.wasman.2014.12.003.
- YUE, R.; ZHANG, Q.: “A pore-scale model for predicting resistance of airflow through grain bulks”, En: 2014 Montreal, Quebec Canada July 13-July 16, 2014, Ed. American Society of Agricultural and Biological Engineers, p. 1, 2014, DOI: 10.13031/aim.20141900492, ISBN: 2151-0032.

Filipe da Silva de Oliveira, Mestrando em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia. Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, Brasil, e-mail: [filipe.oliveira@posgrad.ufla.br](mailto:filipe.oliveira@posgrad.ufla.br)  
Ednilton Tavares de Andrade, e-mail: [filipe.oliveira@posgrad.ufla.br](mailto:filipe.oliveira@posgrad.ufla.br)