



Perda de pressão estática em uma coluna de grãos de quinoa

Poliana T. da S. Gratão¹, Ivano A. Devilla², Ana Claudia O. Servulo³,
Flívia F. de Jesus⁴ & Daiane de A. Ferreira⁵

RESUMO

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar os efeitos do fluxo de ar sobre a queda da pressão estática em massa granular de quinoa, cultivar Real, com diferentes teores de impurezas; ajustar os modelos matemáticos aos dados experimentais obtidos e selecionar o modelo que melhor represente o fenômeno. Inicialmente, o produto estava isento de impurezas e com teor de água de 17% base seco. Foram feitas adições de impurezas nos percentuais de 1, 2, 3, 4 e 5. Utilizando-se um equipamento devidamente projetado e construído e fluxos de ar variando de 0,1 a 0,4 m³ s⁻¹ m⁻², foram determinadas as pressões estáticas da quinoa limpa e com impurezas. Os dados experimentais de perda de carga foram ajustados às equações comumente utilizadas para descrever o fenômeno. Os resultados permitiram concluir que: a) a pressão estática em uma coluna com grãos de quinoa aumenta com o incremento de fluxo de ar; b) O aumento do nível de impureza provocou redução da queda de pressão estática; c) As equações que melhor representam os dados experimentais da queda de pressão no interior do leito com grãos de quinoa, sem e com impurezas, foram as equações de Shedd e de Guimarães, respectivamente.

Palavras-chave: *Chenopodium quinoa* Willdenow, fluxo de ar, impurezas, resistência ao fluxo de ar

Loss of static pressure in a column of quinoa grains

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the effects of air flow on the drop in static pressure in granular masses of the quinoa cultivar Real, with different levels of impurity and adjust the mathematical models to the obtained experimental data selecting those that best represent the phenomenon. The product was initially free of impurities and with moisture content of 17% on dry weight basis. To check the influence of impurities on resistance to air flow, additions of these impurities were made at 1, 2, 3, 4, and 5%. Using a piece of equipment duly designed and built and air flows ranging from 0.1 to 0.4 m³ s⁻¹ m⁻², the static pressures of clean quinoa and quinoa with impurities were determined. The equations commonly used to describe the phenomenon were adjusted to the experimental data of pressure drop. The results permit to conclude that: a) static pressure in a column with quinoa grains increases with the increase in air flow; b) increase in the level of impurity lead to a reduction in the static pressure drop; c) the equations that best represent the experimental data of pressure drop inside the bed with quinoa grains, with and without impurities, were the Shedd and Guimarães equations, respectively.

Key words: *Chenopodium quinoa* Willdenow, air flow, impurities, resistance to air flow

¹ Universidade Estadual de Goiás. Fone: (62) 8228-4334. E-mail: polianagratao@yahoo.com.br

² Universidade de Brasília. Fone: (62) 8161-7686. E-mail: ivano.devilla@gmail.com

³ Universidade Estadual de Goiás. Fone: (62) 8405-6760. E-mail: anaclaudiaoservulo@hotmail.com

⁴ Universidade Estadual de Goiás. Fone: (62) 3328-1156. E-mail: fliviafernandes@hotmail.com

⁵ Universidade Federal de Lavras. Fone: (64) 3674-5837. E-mail: daianesinha@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) declarou 2013 como o Ano Internacional da Quinoa. Esta foi uma proposta da Bolívia que tem, por objetivo, ajudar a erradicar a pobreza e a fome e, conseqüentemente, contribuir para maior produção e consumo do grão. Considerada pela Food and Agriculture Organization (FAO) como o "grão do futuro" esta cultura, nativa dos Andes, está sendo priorizada para mitigar difíceis condições agrícolas e fornecê-la aos agricultores e governos como alternativa viável para garantir alimento de alta qualidade nutricional.

A quinoa possui proteínas consideradas de boa qualidade para o reino vegetal, por possuir um balanço ideal dos aminoácidos essenciais à alimentação humana. O grão contém os ácidos graxos, ômega 3, 6 e 9 de forma equilibrada e, ainda, vitaminas e minerais, como cálcio e ferro (Mujica & Jacobsen, 2006).

A quinoa tem sido muito estudada porém as investigações não atingem todo o processo da cadeia de produção e as áreas da colheita, secagem, armazenamento e tecnologias de pré-processamento, recebem pouca atenção. É imprescindível uma abordagem multidisciplinar envolvendo setor público e privado haja vista que se torna importante para tornar a cultura da quinoa atrativa no processo produtivo aumentando sua competitividade no mercado.

A conservação das características fisiológicas dos produtos agrícolas por longo período de tempo exige o controle racional de seu teor de água. Dentre as técnicas de pré-processamento de grãos a mais utilizada é a secagem, na qual o ar é forçado a atravessar a massa granular, promovendo um processo de transferência de calor e massa entre o ar e os grãos (Goneli, 2008). Já a aeração é utilizada com objetivos de homogeneizar e reduzir a temperatura da massa granular durante o armazenamento evitando oscilações de temperatura ocasionadas pelo desenvolvimento de insetos e micro-organismos (Devilla et al., 2005).

Nos projetos de sistemas de secagem e aeração de grãos torna-se indispensável a determinação da resistência ao fluxo de ar na camada de grãos, que pode ser avaliada pela queda de pressão ao longo da massa granular (Haque et al., 1982). O gasto energético nesses sistemas depende do fluxo de ar estabelecido e da pressão necessária para se obter este fluxo.

A resistência ao escoamento de ar oferecida por uma massa de grãos depende do teor de água do produto, das propriedades físicas da cultivar, do teor e do tamanho das impurezas presentes na massa granular, do processo de carregamento da coluna de grãos, da direção do fluxo de ar, da distribuição das impurezas e da espessura da camada de grãos.

A resistência ao escoamento de ar varia quando impurezas são adicionadas ao produto, ressaltando-se que esta resistência é inversamente proporcional ao tamanho das impurezas. Quando materiais estranhos estão presentes em uma massa de grãos e se são menores que estes, proporcionam aumento da resistência ao escoamento de ar e, se forem maiores que os grãos, diminuem a resistência (Shedd, 1951).

Na seleção de equipamentos de secagem e aeração é importante que os princípios básicos de movimentação de ar

sejam considerados a fim de que toda a massa granular seja uniformemente atravessada pelo ar. Para tanto, os ventiladores são selecionados para fornecer a vazão de ar requerida para promover secagem ou aeração em determinada condição de armazenamento. Por esta razão o dimensionamento inadequado do sistema de movimentação do ar pode tornar-se oneroso seja causando a deterioração dos grãos, seja em gasto de material ou em energia elétrica (Silva et al., 2008).

Quando atravessada por um fluxo de ar, a queda de pressão estática de uma camada de grãos quando é comumente estimada por meio de curvas empíricas relacionando fluxo de ar e pressão estática. A literatura reporta o desenvolvimento de diversos modelos para simular a variação da pressão numa massa armazenada (Biaggioni et al., 2005).

Diversos pesquisadores têm investigado a resistência ao fluxo de ar de vários tipos de produtos agrícolas, bem como o efeito de fatores como o teor de água, teor e tamanho das impurezas presentes na massa de grãos e massa específica sobre a perda de carga, como Giner & Denisienia (1996), para sementes de trigo; Agullo & Marenia (2005), para café Arábica; Łukaszuk et al. (2006), para trigo; Kashaninejad et al. (2010), para pistache; Shahbazi (2011), para grão de bico e Figueiredo Neto et al. (2012) para vagens de amendoim.

Diante do exposto objetivou-se avaliar efeitos do fluxo de ar sobre a queda da pressão estática em massas granulares de quinoa, cultivar Real, com diferentes teores de impurezas e ajustar os modelos matemáticos aos dados experimentais obtidos selecionando-se aquele que melhor represente o fenômeno.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Secagem e Armazenagem de Produtos Vegetais do Curso de Engenharia Agrícola da Unidade Universitária de Ciência e Tecnologia (UnUCET) da Universidade Estadual de Goiás, em Anápolis, GO.

Os grãos de quinoa, cultivar Real, foram adquiridos no comércio de Goiânia, GO, provenientes da Bolívia. O produto foi mantido na sua embalagem hermética até a realização dos testes.

Na obtenção de lotes do produto com diferentes percentuais de impureza utilizaram-se os resíduos resultantes do processo de limpeza dos grãos de quinoa cultivados na safra 2011, na área experimental da Agência Rural de Anápolis, GO.

Determinou-se o teor de água pelo método padrão da estufa, na temperatura de 105 ± 3 °C, durante 24 h, em três repetições, de acordo com a Regra para Análise de Sementes (Brasil, 2009). Este procedimento foi realizado antes e após a determinação da pressão estática.

A caracterização granulométrica, tanto dos grãos de quinoa quanto de suas impurezas, foi determinada no Laboratório Oficial de Análise de Sementes (LASO) em Goiânia, GO. O processo consistiu em peneiramento por meio da vibração uniforme de uma sequência de peneiras (crivo quadrado de 2, 1 e 0,5 mm de lado).

Para obtenção dos diferentes percentuais de impurezas foram adicionadas, à quinoa limpa, 1, 2, 3, 4 e 5% em peso

total para cada amostra de 6 kg. Para garantir a homogeneização dos grãos aos resíduos provenientes da limpeza da quinoa, foi utilizado um homogeneizador de grãos, tipo Boerner de 32 canais; o produto limpo foi considerado com 0% de impureza.

Determinou-se a massa específica aparente utilizando-se um recipiente de volume conhecido e uma balança de precisão de 0,001 g. Para enchimento do recipiente foi fixada uma altura de queda e em seguida o recipiente com os grãos foi pesado, a massa específica aparente foi determinada fazendo-se, então, a relação de massa dos grãos de quinoa (kg) pelo volume do recipiente (m^3).

A porosidade foi determinada pelo método direto, conforme Mohsenin (1978). Fixou-se uma altura de queda, 0,3 m, para o enchimento de um Becker de 30 mL com grãos de quinoa. Com o auxílio de uma bureta de 50 mL, foi feita a complementação dos espaços vazios da massa granular com óleo de soja.

Visando à coleta dos dados de pressão estática, foi projetado e construído um dispositivo de testes cujos constituintes são:

Compressor: utilizado para insuflar ar na coluna de grãos, potência de 5 Cv, reservatório de 225 L e pressão de operação de até 1,2 MPa.

Duto de transição: construído em PVC, tendo 1 m de comprimento e 0,1 m de diâmetro; neste tubo, a 0,85 m da entrada do plenum foi colocado um homogeneizador de fluxo tipo colmeia e a 0,15 m da entrada do plenum foram feitos os orifícios para determinação do perfil de velocidade do ar. Visando determinar a pressão estática para o fluxo de ar até $0,4 m^3 s^{-1} m^{-2}$, foram colocadas, na entrada do tubo de transição que conduz o ar até o plenum, quatro conexões em curva de 90° , objetivando-se, com isto, perder parte da energia fornecida pelo compressor, antes de atingir a coluna com grãos.

Plenum: construído em chapa de aço #16 e, para eliminar possíveis vazamentos, aplicou-se massa plástica em toda a extensão da união de chapas, reforçando as soldas. Na parte superior do plenum foi feita uma abertura de 0,25 m de diâmetro e, para garantir a vedação inseriu-se, em volta da abertura, borracha macia de 0,018 m de altura e 0,030 m de largura. Quatro parafusos foram fixados no plenum para que a base da coluna de grãos pudesse ser encaixada e fixada.

Base da coluna de grãos: confeccionada em madeira; quatro chapas metálicas foram usadas para fazer o encaixe e fixação nos parafusos do plenum. O ponto de tomada de pressão estática do plenum foi feito na base da coluna, próximo à mesma.

Coluna de grãos: construída com tubo de PVC com diâmetro interno de 0,1 m e altura de 1 m. O diâmetro da coluna foi calculado de modo que o efeito do contato entre o grão e a parede da mesma pudesse ser desprezado; para isto, o diâmetro deve ser no mínimo 16 vezes maior que o diâmetro do produto (Yang & Willians, 1990).

Piso perfurado: No fundo da coluna de grãos foi fixada uma tela de crivo quadrado de 1 mm.

Tubos para medição de pressão estática: foram distribuídas, radialmente, em torno da coluna, 9 conexões, em aço com porca e anilha para uso em sistemas hidráulicos com 5 mm de diâmetro interno, para determinação de pressão estática; cada tubo era distanciado entre si 0,1 m na vertical e 0,035 m na horizontal. Visando efetuar a vedação desses tubos utilizou-se mangueira de borracha tipo garrote vedada em uma das extremidades.

Devido ao reduzido tamanho dos grãos de quinoa nos pontos de tomada de pressão estática foi necessário colocar, rente à parede da coluna de grãos, uma tela de malha quadrada de 1 mm para que a quinoa não escoasse no momento da leitura de dados. Um manômetro tipo "U" com escala 800-0-800 mm com divisão de 1 mm, foi utilizado para medição da pressão estática em cada tubo.

Foram impostos, na entrada do leito, os fluxos de ar: 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 $m^3 s^{-1} m^2$, para simular os fluxos de ar utilizados nos processos de secagem e aeração dos grãos; objetivando conseguir os diferentes fluxos foi controlada a abertura da válvula do compressor.

Esses fluxos foram determinados utilizando-se um anemômetro de fio quente com faixa de medição de 0,1 a 20 $m s^{-1}$ e precisão de 0,1 $m s^{-1}$.

Para cada combinação de percentual de impureza e fluxo de ar, fez-se a leitura da pressão estática em 9 pontos da coluna de grãos; esses pontos correspondem à altura da camada de grãos que variou de 0,1 a 0,9 m. Este procedimento foi feito em 3 repetições.

Após a determinação de pressão estática separou-se 1 kg de cada lote de quinoa com diferentes percentuais de impurezas para investigação das propriedades físicas, massa específica aparente e porosidade, além do teor de água.

Ao relacionar a queda de pressão estática por unidade de espessura da coluna granular com o fluxo de ar os dados experimentais do produto isento de impurezas e com diferentes percentuais de impurezas, foram ajustados aos modelos matemáticos (Eqs. 1 a 9) apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos matemáticos ajustados à perda de carga em grãos de quinoa da cultivar Real

| Referência | Modelo matemático | Equação |
|---------------------------|--------------------------------------|---------|
| Shedd (1951) | $\Delta PL = aQb$ | (1) |
| Hukill & Ives (1955) | $\Delta PL = (aQ^2) / (\ln(1 + bQ))$ | (2) |
| Hunter (1983) | $\Delta PL = aQ + bQ^2$ | (3) |
| Linear | $\Delta PL = a + bQ$ | (4) |
| Logaritmo | $\Delta PL = a \ln(Q) + b$ | (5) |
| Haque et al. (1978) | $\Delta PL = aQ + bQ^2 + cQI$ | (6) |
| Giner & Deinisenia (1996) | $\Delta PL = (a + bI)Q(1 + 3Q)$ | (7) |
| Guimarães (1998) | $\Delta PL = aQb + cl$ | (8) |
| ASABE (2007) | $\Delta PL = aQ^b(1 + (a - bQ)I)$ | (9) |

ΔPL - perda de carga, Pa m^{-1} ; Q - fluxo de ar, $m^3 s^{-1} m^{-2}$; a, b e c são parâmetros de regressão que dependem do produto; e I é o teor de impurezas, decimal

Para o ajuste dos modelos matemáticos foram realizadas análises de regressão linear e não linear pelo método Gauss-Newton utilizando-se um software de análises estatísticas. Os modelos foram selecionados com base na magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e da magnitude do erro médio relativo (P). Considerou-se o valor do erro médio relativo inferior a 10% como um dos critérios para seleção dos modelos. O erro médio relativo para cada um dos modelos foi calculado conforme a Eq. 10.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (10)$$

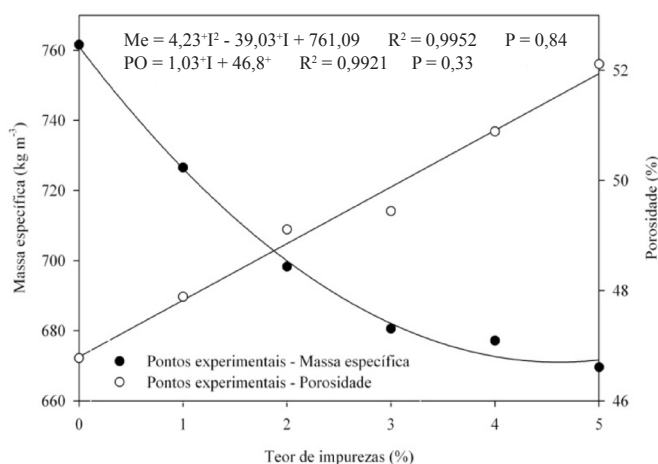
em que:

- P - erro médio relativo, em %
 n - número de observações experimentais
 Y - valor observado experimentalmente
 Y - valor estimado pelo modelo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, os grãos de quinoa apresentavam teor de água de 17% b.s.; após a realização dos testes de perda de carga as amostras sofreram uma secagem que atingiu, em média, 15,9% b.s.

A composição granulométrica dos grãos de quinoa e das impurezas mostrou que aproximadamente 20% das impurezas são maiores que os grãos de quinoa e 3,5% menores que estes indicando uma mistura de impurezas grossas e finas. Na Figura 1 são mostrados os valores da massa específica aparente e da porosidade da massa de grãos de quinoa em função do teor de impurezas tal como os modelos ajustados aos dados experimentais da massa específica aparente e da porosidade e seus respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2) e a magnitude do erro médio relativo (P).



+ Significativo a 0,05 de probabilidade, pelo teste t

Figura 1. Valores da massa específica aparente e da porosidade dos grãos de quinoa, cultivar Real, em função de diferentes percentuais de impurezas, bem como seus respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2) e a magnitude do erro médio relativo (P)

Verifica-se que os teores de impurezas presentes na massa de grãos influenciaram a massa específica aparente e a porosidade. O incremento do percentual de impurezas provoca redução da massa específica aparente e o aumento da porosidade na massa de grãos de quinoa, concordando com os resultados obtidos por Corrêa et al. (2001a) para grãos de feijão, Agullo & Marenya (2005) que trabalharam com café em pergaminho e Gonelli (2008) que estudou grãos de mamona. Os elevados valores de coeficiente de determinação (R^2), os baixos valores da magnitude do erro médio relativo (P) e a significância da regressão, indicam que os modelos se ajustaram bem aos dados experimentais.

A variação da pressão estática em função da profundidade da camada e do fluxo de ar para a quinoa com diferentes percentagens de impurezas, está apresentada na Figura 2.

Na Figura 2A, para a quinoa isenta de impurezas pode-se notar, para um mesmo fluxo de ar, que a pressão estática aumenta linearmente com o aumento da profundidade da camada de grãos de quinoa. Verifica-se também, para uma mesma profundidade da camada, que a pressão estática aumenta com o incremento de fluxo de ar. A pressão estática na coluna de quinoa com 0% de impurezas variou de 340 a 6300 Pa e o acréscimo do fluxo de ar de 0,1 para 0,4 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$, aumentou a pressão estática, em média em 150%.

Na Figura 2B, 2C, 2D, 2E e 2F estão os resultados da pressão estática para os grãos de quinoa com percentuais de impurezas de 1, 2, 3, 4 e 5%, respectivamente. Pode-se notar a mesma tendência apresentada para a massa de quinoa isenta de impurezas, ou seja, para um mesmo fluxo de ar a pressão estática aumenta linearmente com o aumento da profundidade da camada de grãos de quinoa e para uma mesma profundidade da camada a pressão estática aumenta com o incremento de fluxo de ar porém os valores de pressão estática são menores quando comparados com os valores observados para a quinoa com 0% de impurezas e reduzem com o aumento do teor de impurezas.

Portanto, considerando o incremento de impurezas da massa de grãos, a pressão estática tende a reduzir à medida que há um aumento no seu teor na massa de grãos, sendo que para os fluxos de ar estudados, 0,1 a 0,4 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$, a pressão estática variou de 242 a 6198 Pa com 1% de impurezas, 242 a 6080 Pa com 2% de impurezas, 219 a 5361 Pa com 3% de impurezas, 163 a 5021 Pa com 4% de impurezas e 150 a 4786 Pa com 5% de impurezas.

Resultados semelhantes aos apresentados na Figura 2 foram encontrados por Masoumi & Tabil (2003), trabalhando com grão de bico, Biaggioni et al. (2005) para noz macadâmia, Silva et al. (2006) café despulpado, Łukaszuk et al. (2008) para trigo, Kashaninejad & Tabil (2009) para pistache e Kenghe et al. (2011) para chícara (*Lathyrus sativus* L.).

Os parâmetros dos modelos ajustados aos dados observados da perda de carga (Pa m^{-1}) dos grãos de quinoa isentos de impurezas, em função do fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$) estão apresentados na Tabela 2, juntamente com os respectivos valores de erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 2. Parâmetros dos modelos estimados para grãos de quinoa isentos de impurezas e seus respectivos valores de coeficiente de determinação (R^2) e erro médio relativo (P)

| Modelos | Parâmetros | | R^2 | P (%) |
|----------------------|------------|-----------|--------|-------|
| | a | B | | |
| Hukill & Ives (1955) | 1,03E+06 | 5,32 | 0,9495 | 10,86 |
| Hunter (1983) | 3,16E+04 | -3,23E+04 | 0,9956 | 2,84 |
| Linear | 1764,26 | 1,49E+04 | 0,9918 | 4,33 |
| Logaritmo | 3221,59 | 1,04E+04 | 0,9967 | 2,42 |
| Shedd (1951) | 1,37E+04 | 0,64 | 0,9980 | 2,10 |

Os resultados do ajuste dos dados experimentais de perda de carga aos modelos testados mostram elevados valores do coeficiente de determinação em que apenas Hukill & Ives apresentou valor inferior a 99%; além disto, tal modelo também apresentou o erro médio relativo maior que 10%.

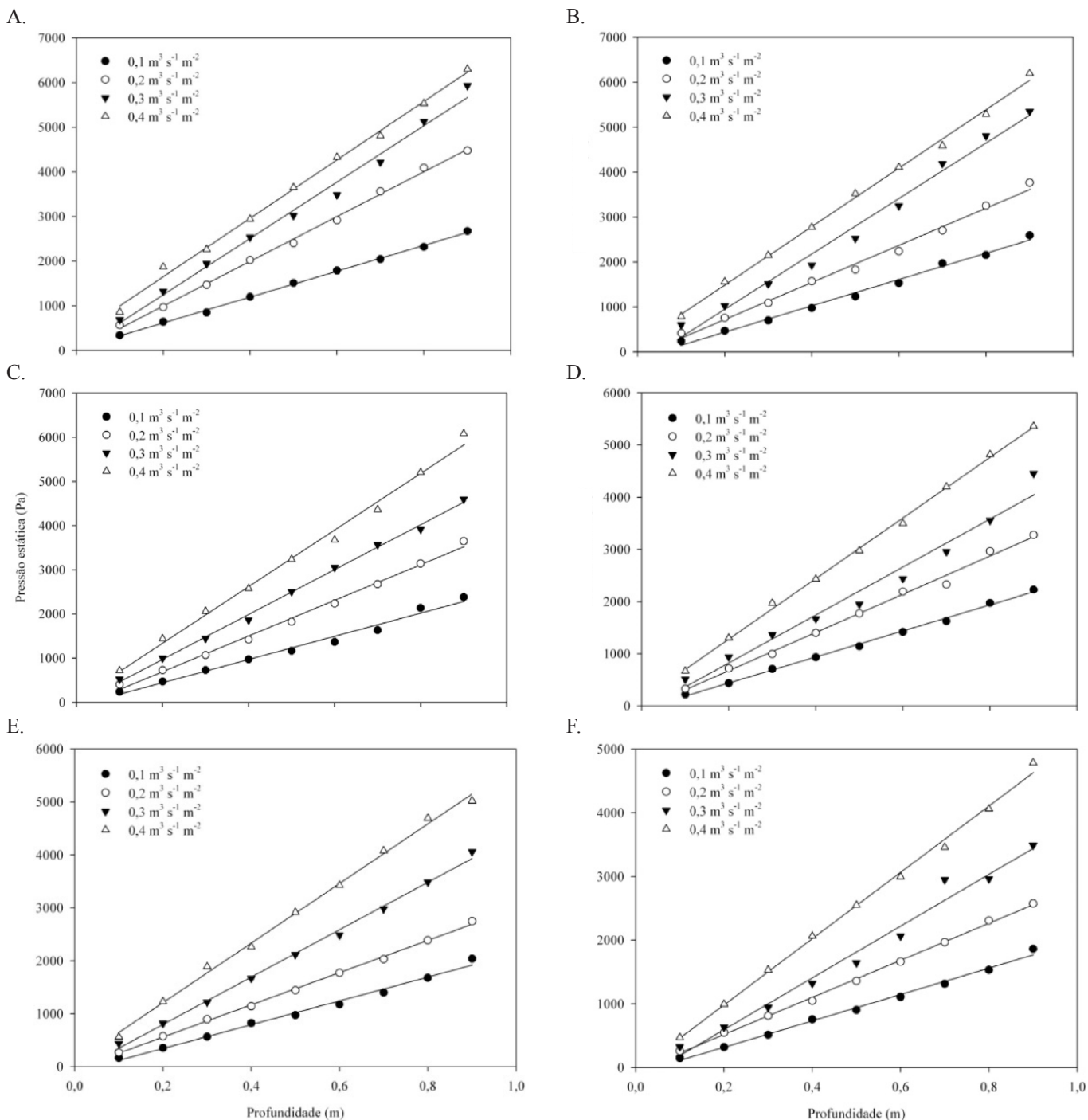


Figura 2. Influência da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa com (A) 0% de impurezas; (B) 1% de impurezas; (C) 2% de impurezas; (D) 3% de impurezas; (E) 4% de impurezas; e (F) 5% de impurezas

O modelo que melhor prediz a perda de carga em uma coluna de quinoa é o modelo de Shedd que apresentou o maior coeficiente de determinação em menor erro médio relativo. O modelo de Shedd já foi selecionado como o melhor modelo para predição da perda de carga de diversos outros produtos, como grão de bico, 14,57% b.s. (Masoumi & Tabil, 2003); sementes de papoula, 14,29% b.s. (Sacilik, 2004) e pistache, 18,52% b.s. (Kashaninejad & Tabil, 2009).

Na Tabela 3 constam os parâmetros dos modelos ajustados aos dados observados da perda de carga (Pa m^{-1}) além dos respectivos

valores de erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2), para a massa granular de quinoa com diferentes percentuais de impurezas, afetados pelo fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$).

Nota-se, na Tabela 3, que houve um bom ajuste dos modelos com coeficiente de determinação maior que 97%, com exceção do modelo de Giner & Denisienia (1996) que apresentou os menores coeficientes de determinação e os maiores erros médio relativo. O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o modelo de Guimarães, com coeficiente de determinação acima de 99%, erro médio relativo inferior a 10%.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos (a, b e c) estimados para grãos de quinoa com diferentes teores de impurezas e seus respectivos valores de coeficiente de determinação (R^2) e erro médio relativo (P)

| Modelos | Teor de impureza (%) | Parâmetros | | | R^2 | P (%) |
|-------------------|----------------------|---------------------|-----------|---------------------|--------|-------|
| | | a ($\times 10^3$) | b | c ($\times 10^3$) | | |
| ASABE | 1 | 1,15 | 0,78 | - | 0,9957 | 3,81 |
| | 2 | 0,78 | 0,76 | - | 0,9937 | 3,77 |
| | 3 | 0,61 | 0,74 | - | 0,9851 | 5,53 |
| | 4 | 0,55 | 0,87 | - | 0,9874 | 6,87 |
| | 5 | 0,44 | 0,79 | - | 0,9795 | 6,66 |
| Giner & Denisenia | 1 | -544,61 | -1,65 | - | 0,8191 | 24,73 |
| | 2 | -205,30 | -2,04 | - | 0,7905 | 24,89 |
| | 3 | -177,51 | -1,45 | - | 0,7694 | 24,44 |
| | 4 | -83,33 | -2,15 | - | 0,8933 | 21,26 |
| | 5 | -519,90 | -0,24 | - | 0,8276 | 23,35 |
| Guimarães | 1 | 16,77 | 1,19 | 146,42 | 0,9990 | 1,31 |
| | 2 | 15,83 | 1,25 | 78,57 | 0,9982 | 1,66 |
| | 3 | 17,27 | 1,53 | 62,61 | 0,9956 | 2,99 |
| | 4 | 18,86 | 1,60 | 36,97 | 0,9969 | 2,87 |
| | 5 | 16,92 | 1,74 | 31,13 | 0,9935 | 3,90 |
| Haque | 1 | -921,76 | -1,43E+04 | 944,91 | 0,9900 | 5,90 |
| | 2 | 10,95 | -1,47E+04 | 556,34 | 0,9854 | 6,32 |
| | 3 | 10,09 | -1,34E+04 | 339,41 | 0,9725 | 8,28 |
| | 4 | 8,19 | -4,86E+03 | 201,26 | 0,9841 | 8,20 |
| | 5 | 7,68 | -7,66E+03 | 150,40 | 0,9703 | 8,99 |

O comportamento da pressão estática da massa granular de quinoa com diferentes percentuais de impurezas, influenciada pelo fluxo de ar, está representado na Figura 3. Verifica-se que, com o aumento do fluxo de ar, houve o aumento na pressão estática da coluna de grãos cerca de 173%, quando comparados o maior e o menor fluxos de ar; nota-se também que o aumento no percentual de impurezas dentro de um mesmo fluxo de ar, promoveu redução na resistência ao escoamento de ar pelo produto, aproximadamente 38% devido, provavelmente, ao aumento da porosidade da massa granular. Esses resultados corroboram com os resultados encontrados por Corrêa et al. (2001b) estudando a influência de impurezas grossas na perda

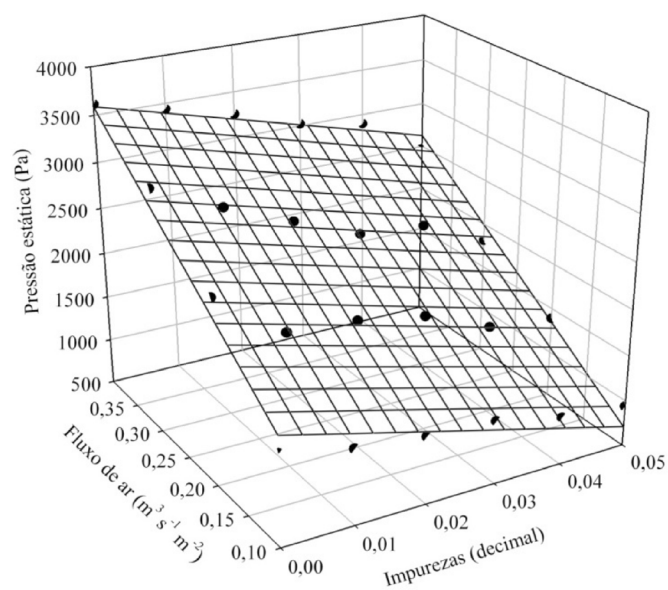


Figura 3. Variação da pressão estática com o fluxo de ar em massas granulares de quinoa isenta de impurezas e com diferentes teores impurezas

de pressão estática de duas variedades de feijão e Gonelli (2008), para grãos de mamona com diferentes percentuais de impureza grossa.

A Figura 3 mostra, ainda, uma acentuada influência do fluxo de ar no aumento da resistência à passagem de ar na massa de grãos de quinoa e a redução dessa resistência à medida que há um acréscimo de impurezas nas amostras.

A Figura 4 mostra a perda de carga dos grãos de quinoa; soja, milho, linho, sorgo, canola (ASABE, 2007); grão de bico (Masoumi & Tabil, 2003); gergelim (Dairo & Ajibola, 1994) e trigo (Giner & Denisenia, 1996).

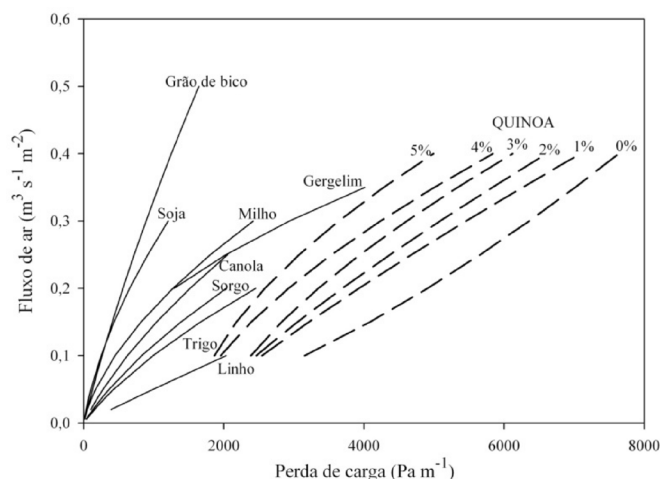


Figura 4. Perda de carga em função do fluxo de ar para grãos de quinoa com diferentes teores de impurezas, comparados com de soja, milho, linho, sorgo, canola (Asabe, 2007), grão de bico (Masoumi & Tabil, 2003), gergelim (Dairo & Ajibola, 1994) e trigo (Giner & Denisenia, 1996)

Na Figura 4 verifica-se que os grãos de quinoa impõem maior resistência à passagem do fluxo de ar sendo em média 2 vezes maior que a resistência imposta pelos grãos de gergelim e aproximadamente 20 vezes maior que a perda de carga dos grãos de soja, para a quinoa isenta de impurezas. Este fenômeno ocorre devido, sem dúvida, ao tamanho e à forma dos grãos de quinoa. Sempre que são acrescentados impurezas à massa de quinoa, a resistência à passagem de ar reduz chegando próximo à resistência oferecida pelos demais produtos.

CONCLUSÕES

1. O aumento do nível de impureza de 0 até 5% provocou redução da queda de pressão estática, para qualquer fluxo de ar estudado.
2. A queda de pressão estática é mais influenciada pelo aumento do fluxo de ar do que pelo aumento do teor de impurezas.
3. A equação de Shedd é a que melhor representa os dados experimentais da queda de pressão no interior do leito com grãos de quinoa isenta de impurezas e submetidas aos fluxos de ar na faixa de 0,1 a 0,4 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$.
4. A equação de Guimarães é a que melhor representa o fenômeno de perda de carga para os grãos de quinoa com

diferentes percentuais de impurezas e submetidas aos fluxos de ar na faixa de 0,1 a 0,4 m³ s⁻¹ m⁻², podendo ser utilizadas nas diversas aplicações da engenharia de pré-processamento e processamento deste produto.

LITERATURA CITADA

- Agullo, J. O.; Marenya, M. O. Airflow resistance of parchment arabica coffee. *Biosystems Engineering*, v.91, p.149-156, 2005.
- ASABE - Asabe Standards. ASAE D272.3 MAR1996 (R2007). Resistance to airflow of grains, seeds, other agricultural products, and perforated metal sheets. *American Society of Agricultural Engineers*, v.54, p.544-550, 2007.
- Biaggioni, M. A. M.; Piza, P. L. B. T.; Ferreira, W. A. Queda de pressão estática por meio de uma couca de noz de macadâmia. *Engenharia Agrícola*, v.25, p.499-507, 2005.
- Brasil. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399p.
- Corrêa, P. C.; Guimarães, W. T.; Afonso Júnior, P. C. Efeito do nível e do tamanho de impurezas nas propriedades físicas da massa granular de feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, p.97-100, 2001a.
- 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*, v.26, p.53-59, 2001b.
- Dairo, O. U.; Ajibola, O. O. Resistance to airflow of bulk sesame seed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.58, p.99-105, 1994.
- Devilla, I. A.; Couto, S. M.; Queiroz, D. M. Distribuição do fluxo de ar em silos com sistema de aeração: Análise por elementos finitos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, p.256-262, 2005.
- Figueiredo Neto, A. F.; Dantas, B. F.; Silva, J. C.; Olivier, N. C. Silva, M. F. Resistência ao fluxo de ar das vagens de amendoim com diferentes percentuais de impurezas. *Revista Nucleus*, v.9, p.85-91, 2012.
- Giner, S. A.; Denisienia, E. Pressure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines. *Journal Agricultural Engineering Research*, v.63, p.73-86, 1996.
- Goneli, A. L. D. Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da manona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento. Viçosa: UFV, 2008. 199p. Tese Doutorado
- Guimarães, W. T. Efeito do nível e do tipo de impurezas na resistência ao fluxo de ar em camadas de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Viçosa: UFV, 1998. 47p. Dissertação Mestrado
- Haque, E.; Ahmed, Y. N.; Deyoe, C. W. Static pressure drop in a fixed bed of grain as affected by grain moisture content. *American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASAE*, v.25, p.1095-1098, 1982.
- Haque, E.; Foster, G. H.; Chung, D. S.; Lai, F. S. Static pressure drop across a bed of corn mixed with fines. *American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASAE*, v.21, p.997-1000, 1978.
- Hukill, W. V.; Ives, N. C. Radial airflow resistance of grain. *Agricultural Engineering*, v.36, p.332-335, 1955.
- Hunter, A. J. Pressure difference across an aerated seed bulk for some common duct and store crosssections. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.28, p.437-450, 1983.
- Kashaninejad, M.; Maghsoudlou, Y.; Khomeiri, M.; Tabil, L. G. Resistance to airflow through bulk pistachio nuts (Kalleghochi variety) as affected by moisture content, airflow rate, bed depth and fill method. *Powder Technology*, v.203, p.359-364, 2010.
- Kashaninejad, M.; Tabil, L. G. Resistance of Bulk Pistachio Nuts (Ohadi Variety) to Airflow, *Journal of Food Engineering*, v.90, p.104-109, 2009.
- Kenghe, R.; Nimkar, P.; Shirkole, S. Resistance of bulk lathyrus to airflow. *Acta Agrophysica*, v.18, p.87-99, 2011.
- Lukaszuk J.; Molenda M.; Horabik J. Influence of the method sample formation on airflow resistance in wheat. *Acta Agrophysica*, v.8, p.881-891, 2006.
- Lukaszuk, J.; Molenda, M.; Horabik, J.; Szot, B.; Montross, M. D. Airflow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. *Research in Agricultural Engineering*, v.54, p.50-57, 2008.
- Masoumi, A. A.; Tabil, L. Vertical airflow resistance of chickpea (*C. arietinum*) cultivars as affected by moisture content. *CSAE – The Canadian Society for Engineering in Agricultural, Food and Biological System*, n.3, p.481-494, 2003.
- Mohsenin, N. N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Publishers, 1978. 841p.
- Mujica, A.; Jacobsen, S. La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y sus parientes silvestres. *Botánica Económica de los Andes Centrales*. La Paz: Universidad Mayor de San Andrés, 2006. p.449-457.
- Sacilik, K. Resistance of bulk poppy seeds to airflow. *Biosystems Engineering*, v.89, p.435-443, 2004.
- Shahbazi, F. Resistance of bulk chickpea seeds to airflow. *Journal Agricultural Science Technology*, v.13, p.665-676, 2011.
- Shedd, C. K. Some new data on resistance of grains to airflow. *Agricultural Engineering*, v.32, p.493-495, 1951.
- Silva, D. J. P.; Couto, S. M.; Peixoto, A. B.; Santos, A. E. O.; Vieira, S. M. J. Resistência de café em coco e despulpado ao fluxo de ar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.168-174, 2006.
- Silva, N. C. L.; Matos, A. T.; Sartori, M. A.; Moreira, D. A.; Barros, R. T. P.; Luiz, F. A. R. Variação na pressão estática de ar insuflado em diferentes vazões específicas em colunas de material orgânico com diferentes estádios de degradação bioquímica. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.30, p.165-170, 2008.
- Yang, X.; Williams, D. L. Airflow resistance of grain sorghum as affected by bulk density. *American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASAE*, v.33, p.1966-1970, 1990.