

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS
UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
MESTRADO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PERDA DE PRESSÃO ESTÁTICA EM UMA COLUNA DE GRÃOS DE
QUINOA (*Chenopodium quinoa* Willdenow) E ANÁLISE POR
ELEMENTOS FINITOS

Poliana Tatiana da Silva Gratão

ANÁPOLIS - GO
Abril de 2012

PERDA DE PRESSÃO ESTÁTICA EM UMA COLUNA DE GRÃOS DE QUINOA
(*Chenopodium quinoa* Willd) E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

POLIANA TATIANA DA SILVA GRATÃO

Orientador: PROF. D.S. IVANO ALESSANDRO DEVILLA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás - UEG, Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas de Anápolis como parte das exigências do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Agrícola – Engenharia de Sistemas Agroindustriais, para obtenção do título de MESTRE.

Anápolis
Goiás
2012

PERDA DE PRESSÃO ESTÁTICA EM UMA COLUNA DE GRÃOS DE QUINOA
(*Chenopodium quinoa* Willdenow) E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Por
Poliana Tatiana da Silva Gratão

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Aprovada em: ___/___/___

Prof. D.S. Ivano Alessandro Devilla
(Orientador)
Universidade de Brasília

Prof. D.S. Itamar Rosa Teixeira
Universidade Estadual de Goiás

Prof. D.S. João Batista Soares
Universidade de Brasília

Ao meu esposo, Eduardo,
com todo o meu amor, carinho, respeito, admiração e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que me deu saúde, coragem, sabedoria e me ajudou a superar todas as dificuldades para concluir mais essa etapa de vida.

Ao eterno incentivador de minhas conquistas, meu esposo, amigo, companheiro e amor, eu só tenho a agradecer por tudo.

Ao Professor e orientador DS. Ivano Alessandro Devilla, pela confiança, pelos conhecimentos transmitidos, pela orientação, incentivo e apoio durante a realização deste trabalho.

Obrigada ao seu Waldeir, não somente pela paciência e prontidão, em fazer, consertar e refazer o equipamento utilizado nesse trabalho, mas também por sua amizade.

Não poderia deixar de agradecer também ao Higor, ao seu Waldomiro e a Eliete por toda colaboração.

A minha estagiaria e amiga Ana Claudia, pelo auxílio na condução do experimento e por não me deixar desistir.

Muito obrigada a Pâmela por conseguir a quinoa para realização deste trabalho e a Flívia por separar para mim as impurezas provenientes da limpeza de sua quinoa.

Obrigada a Tia Aída e a Rejane por acolher, a mim e a Ana Claudia, em suas casas, com tanto carinho, durante nossa estadia em Anápolis para a realização do experimento.

Mais uma vez agradeço a minha amiga Daiane pela amizade, colaboração e disposição em sempre ajudar.

A todos os amigos e familiares que acreditaram em mim e em meu sucesso e torceram para que tudo desse certo.

À Universidade Estadual de Goiás e, em especial, ao Programa de Mestrado *Strict Sensu* em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do mestrado e a CAPES pela bolsa de estudos fornecida.

Aos membros da banca examinadora pela disponibilidade em corrigir a dissertação e pelas sugestões apresentadas.

A todos que de uma forma ou de outra contribuíram na conquista desse trabalho e estiveram ao meu lado nessa jornada.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
RESUMO.....	X
INTRODUÇÃO	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
1.1. Quinoa.....	4
1.1.1. <i>Origem, histórico e importância.....</i>	4
1.1.2. <i>Qualidade nutricional.....</i>	5
1.1.3. <i>Usos da quinoa</i>	5
1.1.4. <i>Restrições ao uso de quinoa devido à presença de saponina.....</i>	6
1.1.5. <i>Produção de quinoa no mundo e no Brasil</i>	7
1.1.6. <i>Descrição botânica e agrônômica.....</i>	8
1.1.7. <i>Colheita.....</i>	8
1.1.8. <i>Pós-colheita.....</i>	9
1.2. Processos de pós-colheita de grãos.....	10
1.2.1. <i>Resistência ao fluxo de ar e fatores que influenciam</i>	12
1.2.2. <i>Modelos empregados para expressar a perda de carga</i>	12
1.2.3. <i>Pesquisas sobre a resistência dos grãos à passagem do fluxo de ar</i>	15
1.3. Modelagem usando elementos finitos.....	18
MATERIAL E MÉTODOS	22
2.1. Material.....	22
2.2. Métodos.....	22
2.2.1. <i>Determinação do teor de água</i>	22
2.2.2. <i>Caracterização granulométrica da amostra e impureza.....</i>	22
2.2.3. <i>Obtenção de lotes com diferentes níveis de impureza.....</i>	22
2.2.4. <i>Tamanho e forma.....</i>	23
2.2.5. <i>Massa específica aparente.....</i>	24
2.2.6. <i>Porosidade.....</i>	24
2.2.7. <i>Determinação da perda de carga em uma coluna de quinoa.....</i>	24
2.2.8. <i>Procedimentos para determinação de pressão estática</i>	28

2.2.9. <i>Modelagem matemática</i>	29
2.2.10. <i>Análise por elementos finitos</i>	30
RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
3.1. Caracterização das amostras	32
3.2. Perda de carga em grãos de quinoa	34
3.3. Análise por elementos finitos	42
CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Modelos matemáticos ajustados à perda de carga em grãos de quinoa, cultivar Real, isentos de impurezas.....	29
TABELA 2 – Modelos matemáticos ajustados à perda de carga em grãos de quinoa, cultivar Real, com diferentes teores de impurezas.....	29
TABELA 3 – Médias e desvios do teor de água das amostras de quinoa isenta de impurezas e com 1, 2, 3, 4, e 5% de impurezas.	32
TABELA 4 – Médias e desvios da composição granulométrica dos grãos e impurezas de quinoa.....	32
TABELA 5 – Médias e desvios dos eixos ortogonais (a, b e c), da esfericidade, da circularidade e do diâmetro equivalente dos grãos de quinoa, cultivar Real.	33
TABELA 6 – Modelos estimados aos dados experimentais da massa específica aparente e porosidade dos grãos de quinoa em função do teor de impurezas.	34
TABELA 7 – Parâmetros, dos modelos, estimados para grãos de quinoa isento de impurezas e seus respectivos valores de coeficiente de determinação (R^2) e erro médio relativo (P).	38
TABELA 8 – Parâmetros, dos modelos, estimados para grãos de quinoa com diferentes teores de impurezas e seus respectivos valores de erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2).	39
TABELA 9 – Modelos para estimar a resistência distribuída, em uma coluna de quinoa, em função do fluxo de ar e do teor de impurezas.	44

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Eixos ortogonais dos grãos de quinoa (a: comprimento; b: largura; e c: espessura).....	23
FIGURA 2 – Equipamento experimental utilizado na tomada de pressão estática da coluna de grãos de quinoa.....	25
FIGURA 3 – Componentes do equipamento experimental utilizado na tomada de pressão estática na coluna com grãos de quinoa: (A) Compressor; (B) Conexões utilizadas para reduzir a pressão; (C) Homogeneizador de fluxo; (D) Tela utilizada para evitar escoamento dos grãos nos tubos de medição; (E) Tubo de transição, plenum e coluna para leitura de pressão estática; e (F) Tubos para medição da pressão, vedados.	27
FIGURA 4 – Valores da massa específica aparente (kg m^{-3}) e da porosidade (%) dos grãos de quinoa, cultivar Real, em função de diferentes teores de impurezas (%).	33
FIGURA 5 – Influencia da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa isentos de impurezas.....	34
FIGURA 6 – Influencia da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa com 1% de impurezas.....	35
FIGURA 7 – Influencia da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa com 2% de impurezas.....	36
FIGURA 8 – Influencia da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa com 3% de impurezas.....	36
FIGURA 9 – Influencia da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa com 4% de impurezas.....	37
FIGURA 10 – Influencia da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa com 5% de impurezas.....	37
FIGURA 11 – Variação da pressão estática com o fluxo de ar em massas granulares de quinoa isenta de impurezas e com diferentes teores impurezas.....	41
FIGURA 12 – Perda de carga (Pa m^{-1}) em função do fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$) para grãos de quinoa com diferentes teores de impurezas, comparados com de soja, milho, linho, sorgo, canola (ASABE, 2007), grão de bico (MASOUMI e TABIL, 2003), gergelim (DAIRO e AJIBOLA, 1994) e trigo (GINER e DENISIENIA, 1996).....	42

- FIGURA 13 – Discretização da coluna de grãos de quinoa em 1476 elementos..... 43
- FIGURA 14 – Valores da resistência distribuída com seus respectivos erros da otimização, para a coluna de quinoa submetida a diferentes fluxos de ar e teores de impureza. F1, F2, F3 e F4, fluxos de ar, 0,1, 0,2, 0,3 e 0,4 m³ s⁻¹ m⁻², respectivamente; I0, I1, I2, I3, I4 e I5 teores de impureza, 0, 1, 2, 3, 4 e 5%, respectivamente; 43
- FIGURA 15 – Variação da resistência distribuída com o fluxo de ar e o teor de impurezas no percentual de 0, 1, 2, 3, 4 e 5% (valores observados e preditos pelo modelo: $RD=aQ+bI+cQ^2+dI^2+e$) 45

RESUMO

A quinoa (*Chenopodium quinoa* Willdenow) tem sido apontada como uma promissora fonte de alimento. Aspectos relacionados com a secagem e armazenamento de grãos de quinoa, como a resistência imposta pelos grãos à passagem de ar, que é essencial no dimensionamento de sistemas eficientes de aeração e secagem, são poucos abordados em pesquisas. Esse trabalho objetivou avaliar os efeitos do fluxo de ar sobre a queda da pressão estática em massas granulares de quinoa, cultivar Real, com diferentes teores de impurezas, ajustando os modelos matemáticos aos dados experimentais obtidos, selecionando aquele que melhor represente o fenômeno, bem como determinar a resistência distribuída em uma massa granular de quinoa com diferentes teores de impurezas, usando a técnica de elementos finitos. A quinoa, cultivar Real, importada da Bolívia, foi adquirida no comércio local de Goiânia-GO. O produto inicialmente estava isento de impurezas e com teor de água de 17% b.s. Para a verificação da influência de impurezas na resistência a passagem de ar, foram feitas adições destas 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. Aos dados experimentais de perda de carga foram ajustados às equações comumente utilizadas para descrever o fenômeno. Além disso, foi também feita a modelagem utilizando a técnica de elementos finitos, para determinar a resistência distribuída da massa de quinoa. 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, sendo esta mais influenciada pelo aumento do fluxo de ar do que pelo aumento do teor de impurezas; 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; d) A resistência distribuída em uma coluna com quinoa com diferentes teores de impureza e fluxos de ar, variou de 1,24x10⁹ a 4,77x10⁸ m⁻²; e e) A resistência distribuída em uma coluna com quinoa reduziu com o incremento do fluxo de ar e com o aumento do teor de impureza.

Palavras-chave: fluxo de ar, pressão estática, resistência ao fluxo de ar.

ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willdenow) has been indicated as a promising food source. Aspects related to drying and storage of quinoa grains, such as the resistance imposed by the grains to air flow, which is essential in dimensioning of efficient aeration and drying systems, have not been greatly researched. The purpose of this study was to evaluate the effects of air flow on the drop in static pressure in granular masses of quinoa, Real cultivar, with different levels of impurity, adjust the mathematical models to the experimental data obtained, selecting those that best represent the phenomenon, as well as determine the distributed resistance in a granular mass of quinoa with different levels of impurity using the finite element technique. Quinoa, Real cultivar, imported from Bolivia, was purchased in the local market of Goiania, GO. The product was initially free of impurities and with moisture content of 17% d.b. To check the influence of impurities on resistance to air flow, additions of these impurities were made at the percentages of 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. In addition, modeling was also made using the finite element technique to determine the distributed resistance of the mass of quinoa. The results allow one 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 led to reduction in the static pressure drop, with the latter being more affected by the increase in air flow than by the increase in the level of impurities; c) the equations that best represent the experimental data of pressure drop in the inside of the bed with quinoa grains, with and without impurities, were the Shedd and Guimarães equations respectively; d) the distributed resistance in a column with quinoa with different levels of impurity and air flows ranged from 1.24x10⁹ to 4.77x10⁸ m⁻²; and e) the distributed resistance in a column with quinoa reduced with the increase of air flow and with the increase in the level of impurity.

Keywords: air flow, impurities, resistance to air flow.

INTRODUÇÃO

A Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) declarou 2013 como o Ano Internacional da Quinoa. Esta foi uma proposta da Bolívia, e 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", essa cultura nativa dos Andes esta sendo priorizada para mitigar difíceis condições agrícolas e para fornecer aos agricultores e governos como alternativa viável para garantir alimento de alta qualidade nutricional. (FAO, 2012).

O crescente interesse pela cultura de quinoa se justifica, pois ela é qualificada como o melhor alimento de origem vegetal para consumo humano pela Academia de Ciências dos Estados Unidos. Segundo a OMS (Organização Mundial da Saúde) e a FAO, é um dos alimentos mais completos que existe sendo selecionada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para integrar a dieta dos astronautas em viagens espaciais de longa duração (CAPERUTO et al., 2001).

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 e JACOBSEN, 2006).

A quinoa tem sido muito estudada, porém as investigações não atingem todo o processo da cadeia de produção, e as áreas de a colheita, secagem, armazenamento e tecnologias de pré-processamento recebem menos atenção. Mujica et al. (2001) destaca que é necessário uma abordagem multidisciplinar, envolvendo setor público e privado. Isso 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 (CORRÊA et al., 2001a). 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 microrganismos.

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 (ERGUN, 1952).

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 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 (BROOKER et al., 1974; JAYAS, 1987).

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 (FARMER et al., 1979; GRAMA et al., 1984). 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 (PATTERSON et al., 1971; 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 necessária 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, 1988).

A queda de pressão estática de uma camada de grãos quando atravessada por um fluxo de ar, 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 (GONELI, 2008). Shedd (1953) apresentou um gráfico em escala logarítmica contendo curvas conhecidas como “Curvas de Shedd”, relacionando o fluxo de ar e a queda de pressão para 22 tipos de grãos.

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 e Denisienia (1996), para sementes de trigo; Nalladurai et al. (2002), para arroz em casca;

Tabak et al. (2005), para sementes de algodão; Agullo e Marenya (2005), para café Arábica; Kashaninejad et al. (2010), para pistache; Shahbazi (2011), para grão de bico.

Técnicas numéricas, também, têm sido amplamente usadas na resolução de problemas de escoamento de fluidos, dentre estas, a técnica de elementos finitos, que vem sendo utilizada com sucesso por vários pesquisadores para a resolução de diferentes problemas envolvendo escoamentos (ROJANO et al., 1998; FERGUSON, 1995; GONG e MUJUMDAR, 1995).

Para Marchant (1976), o método de elementos finitos pode ser usado com razoável precisão para resolver equações que descrevem a distribuição do fluxo de ar em produtos agrícolas. Este método, em comparação com as outras técnicas, possui a vantagem de resolver as equações para sistemas em qualquer forma geométrica.

A resistência distribuída (representações macroscópicas de geometria no interior da região em estudo) é um meio conveniente de se aproximar efeitos de meios porosos sem realmente modelar a sua geometria. Sendo o conhecimento da queda de pressão do ar ao escoar em leitos de grãos essencial no dimensionamento de sistemas eficientes de aeração e secagem, as técnicas numéricas aplicadas em conjunto com processos de otimização podem ser uma alternativa razoável na modelagem do escoamento de ar em meios porosos.

Diante do exposto esse trabalho objetivou 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, encontrando aquele que melhor represente o fenômeno; e determinar a resistência distribuída em uma massa granular de quinoa com diferentes teores de impurezas, usando a técnica de elementos finitos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Quinoa

1.1.1. Origem, histórico e importância

A quinoa (*Chenopodium quinoa* Willdenow) é uma espécie granífera, domesticada pelos habitantes da Cordilheira dos Andes, há milhares de anos (SPEHAR e SANTOS, 2002) e difundido especialmente na Bolívia, Peru e Equador, essa planta se apresenta em uma grande diversidade e variedade (MONTAÑO et al., 2006).

Mujica et al. (2001) destacaram que existem provas de que possivelmente a domesticação da quinoa levou muito tempo, processo que provavelmente iniciou com a utilização das folhas da planta, principalmente, na alimentação e, em seguida, com o uso dos grãos. Arquivos e crônicas arqueológicas e antropológicas na América do Sul Andina (Peru e Bolívia) evidenciam a presença da quinoa entre 8.000 e 5.000 anos a.C., fazendo deste alimento, oriundo de colheita e do berço andino, o mais antigo de que se tem registro (TAPIA, 1997).

Antes de se tornar uma cultura sagrada para os Incas, que a chamavam de “grão mãe”, a quinoa era cultivada e utilizada pelas civilizações nativas e também servia como moeda de troca entre as civilizações peruanas antigas. Ainda que constituísse um alimento básico da população na época, com a conquista espanhola e a introdução de grãos consumidos na Europa, como cevada e trigo, seu cultivo entrou em declínio. Com isso, pretendiam-se também reduzir a importância que essa granífera representava para os povos, a sociedade e a religião (SPEHAR e SANTOS, 2007).

Farro (2008) destaca que a quinoa não perdeu o prestígio e credibilidade entre seus herdeiros, e isso se deve aos aspectos nutricionais, medicinal e especialmente por sua alta resistência às intempéries do clima e adaptabilidade a solos alcalinos, arenosos e pobres nutricionalmente.

Schlick e Bubenheim (1996) concluíram que a quinoa tem qualidades alimentares desejáveis para o *Controlled Ecological Life Support System* (CELSS), uma entidade que cria sistemas auto-sustentáveis de suporte de vida para as estações espaciais e colônias tipicamente controladas por meio de sistemas ecológicos fechados.

1.1.2. *Qualidade nutricional*

A quinoa é considerada como excelente fonte de proteína, sendo o único alimento de origem vegetal que fornece todos os aminoácidos essenciais para a vida humana, e em valores perto dos estabelecidos pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) (MUJICA et al, 2001).

A quinoa é uma ótima fonte de carboidratos de baixo índice glicêmico e sua contribuição de carboidratos para o conteúdo de energia total é de 57%. Além disso, a quinoa também possui vitaminas (B1, B2, B3, B6, C e E), minerais (ferro, fósforo e cálcio), fibras e ácidos graxos (Ômega-3 e Ômega-6) (SPEHAR, 2006).

A proteína da quinoa tem 80% mais concentração de lisina que outros cereais, composição que lhe outorga alto valor nutritivo, sendo que a dimensão do embrião de seus grãos permite armazenar maior quantidade de proteína (VALDIVIA et. al, 1997). Alves et. al (2008) concluíram que a quinoa real apresenta elevada digestibilidade da proteína podendo ser comparada à da caseína. Contudo estes resultados contradizem a literatura, que diz que nenhum alimento de origem vegetal possui a digestibilidade da proteína superior a 80%, sendo os valores encontrados na ordem de 98%. A quinoa também pode ser considerada como uma boa fonte de fibra dietética, polifenóis e outros compostos antioxidantes (REPO-CARRASCO-VALENCIA e SERNA, 2011).

Conforme Spehar (2006) os fatores que tornam a quinoa atrativa no sistema de produção são as características de composição do grão e da planta, como seu emprego em dietas especiais para pacientes celíacos (pessoas alérgicas ao glúten).

1.1.3. *Usos da quinoa*

Com múltiplos usos, a planta pode ser usada tanto para o consumo animal quanto para o humano, nas fases do seu desenvolvimento.

Algumas variedades de quinoa que apresentam porte alto, muito ramificado e abundante produção de biomassa podem ser utilizadas como fonte forrageira para a alimentação de ruminantes, como forragem verde picada, ou por meio de sistemas de conservação de forragens para períodos de escassez mediante silagem (ASCHERI et al., 2002).

No estado vegetativo as folhas da planta de quinoa podem ser colhidas e utilizadas como hortaliça, em forma similar ao consumo de espinafre. Já quando se inicia a

diferenciação floral, os botões florais podem ser cozidos e consumidos como o brócolis (MUJICA et al., 2003).

O grão pode ser submetido à cocção para a elaboração de sopas, acompanhamento de arroz ou saladas ou como prato principal. Mujica et al. (2001) ressaltam que é possível produzir leite de quinoa. Outra utilização é a farinha, obtida a partir da moagem e peneiração do grão, pode ser utilizada em combinação com outras farinhas como trigo e milho, para melhorar as propriedades nutricionais de alguns produtos como pães, bolachas, bolos, macarrão, cremes entre outros produtos (SPEHAR, 2006).

O valor nutritivo da proteína da quinoa depende do tratamento ou preparo do grão. O valor do Coeficiente de Eficácia Protéica (PER) da proteína de quinoa Sajama lavada, quando crua foi 29% inferior ao da caseína enquanto que, após a cocção, o ganho de peso dos animais que a consumiram aumentou 100% e o valor de PER foi igual ao da caseína (RUIZ, 1979). Repo-Carrasco-Valencia e Serna (2011) concluíram em seu trabalho que o processo de extrusão e a cocção podem melhorar o valor nutricional dos grãos de quinoa. Já Pásko et al. (2009) concluíram que a os brotos de quinoa tem uma atividade antioxidante significativamente maior que as sementes.

1.1.4. Restrições ao uso de quinoa devido à presença de saponina

A utilização da quinoa em larga escala está limitada principalmente pela presença de glicosídeos, genericamente chamados de saponinas que, conferem ao grão um sabor amargo além de serem apontadas como compostos anti-nutricionais (SOUZA et al., 2004). Porém outros pesquisadores defendem que a saponina extraída do grão de quinoa possui excepcionais propriedades detergentes. Em países como Bolívia e Equador, as saponinas são utilizadas na indústria farmacêutica, de cosméticos, de alimentos, em detergentes e na indústria de mineração. Concentrações de saponina de 5 a 6% são frequentemente empregadas em formulações de sabões, xampu e sais de banho. Outras aplicações incluem seu uso na fabricação de cerveja, líquidos de extintores de incêndio, creme hidratante, hormônios sintéticos, pesticidas, indústria fotográfica, antibióticos, entre outros (RESTREPO et al., 2005).

Spehar e Santos (2007) destacam que a saponina, em pequenas quantidades, pode ser útil e desejável, como aditivo, pela indústria de alimentos e ração. Contribui para prevenir algumas doenças de articulação em cavalos e eliminar vermes e protozoários do trato digestivo de animais domésticos (CHEEKE, 2002).

Apesar das qualidades da saponina presente na quinoa, sua presença inviabiliza o consumo direto dos grãos na alimentação, sendo necessário, no processamento pós-colheita, uma etapa que elimine ou separe tais substâncias, tornando o produto mais atrativo. Uma das vantagens da cultivar BRS Piabiru, a primeira recomendação para cultivo brasileiro, é o fato de já ter sido desenvolvida sem a presença de saponina (SPEHAR et al., 2011). A obtenção de cultivares sem saponina é possível, pois essa característica é eliminada por seleção de genótipos pelo melhoramento genético (SPEHAR e SANTOS, 2002; ROCHA, 2011).

1.1.5. Produção de quinoa no mundo e no Brasil

Em meados da década de 70, a *National Academic Science* (NAS) considerou a quinoa como uma das 23 plantas promissoras e recomendadas para estudos, com o objetivo de melhorar a nutrição e a qualidade de vida da população em seus países de origem, estando a maioria destes “em desenvolvimento”. Devido a este fato, muitos países que ainda não eram produtores, iniciaram o seu cultivo, como Canadá e Estados Unidos e países da comunidade europeia como França, Alemanha, Dinamarca entre outros (SPEHAR, 2001).

A Bolívia é o principal produtor de quinoa com 46% da produção mundial, com uma área de cultivo estimada em 35.700 hectares. Aproximadamente 65% dela é cultivada para auto-consumo e 35% para a venda no mercado nacional e internacional. O Peru é o segundo maior produtor do grão, com 42% da produção mundial, e possui a maior diversidade de espécies e variedades de quinoa existentes no mundo. Os Estados Unidos aparece em terceiro lugar com 6,3% da produção mundial de quinoa (SOTO et al., 2004; TEJADA CAMPOS, 2004).

A produção de quinoa nos países andinos voltada à exportação tem sido impulsionada pela sua popularização, que vem ocorrendo principalmente nos países desenvolvidos, onde há uma demanda por alimentos alternativos com alto valor nutritivo e baixo colesterol (BONIFÁCIO, 1999).

No Brasil o cultivo de quinoa surgiu como uma alternativa para diversificar os sistemas produtivos baseados no plantio direto e como uma opção para a safrinha. As primeiras tentativas de adaptá-la ocorreram por seleção em populações híbridas, provenientes de Cambridge, Inglaterra (SPEHAR e SOUZA, 1993). Após dois anos de ensaios de competição com linhagens selecionadas anteriormente, foi uniformizada, a partir de 1998, para características agrônômicas e ausência de saponina. A primeira recomendação de quinoa como cultivo granífero no Brasil, foi a cultivar BRS Piabiru, originada da linhagem EC 3,

selecionada a partir de uma população procedente de Quito, Equador (SPEHAR e SANTOS, 2002).

1.1.6. Descrição botânica e agrônômica

Chenopodium quinoa Willdenow, essa definição do gênero e espécie foi feita por Luis Christian Willdenow (NARREA, 1975 citado por RUIZ, 1979). Pertence à família das Chenopodiaceae, a mesma da beterraba e do espinafre (SPEHAR e SANTOS, 2007)

Quinoa é uma planta herbácea anual que pode medir até 3 m de altura, dependendo das condições ambientais e genótipo. Sua inflorescência se dá tipo panícula com grupos de flores em glomérulos. O fruto ocorre em um aquênio e os grãos de 1 a 2,6 milímetro podem ser branco, amarelo, vermelho, roxo, marrom ou preto. A raiz principal é densamente ramificada, pivotante e profunda fornecem resistência ao estresse hídrico (MUJICA, 1997).

O ciclo varia de 120 a 240 dias, dependendo das variedades e lugares de produção, sendo adequado para várias condições ambientais. No Brasil o ciclo pode variar de 80 a 150 dias (SPEHAR e SANTOS, 2002).

Os rendimentos de grãos que se obtém, varia de 650 kg ha⁻¹ em comunidades campesinas com tecnologia tradicional, até 3500 kg ha⁻¹ em sementeiras e campos experimentais. Vale lembrar que o rendimento está em função do uso da semente melhorada, fertilização e cuidados culturais brindados. Por exemplo, com irrigação em Majes em Arequipa, Peru se tem obtido até 5000 kg ha⁻¹, o que indica grande potencial (FAO/RLAC, 1998). Os rendimentos encontrados no Brasil, cultivar BRS Piabiru, foram de 3000 kg ha⁻¹ (ROCHA, 2008).

1.1.7. Colheita

A quinoa é uma planta considerada sensível em termos de manejo e cuidados com a colheita que deve ser feita em um momento apropriado não só para evitar perdas devido aos efeitos adversos do clima e do ataque de pássaros, mas também pela deterioração da qualidade do grão (NIETO e VALDIVIA, 2001).

As sementes de quinoa são altamente higroscópicas, ou seja, ganham ou perdem água facilmente (SPEHAR et al., 2007). Após a maturidade fisiológica, em condição de alta umidade as sementes deterioram ou germinam na panícula (SPEHAR e SOUZA, 1993), com consequente perda da colheita, ou, pelo menos, a ocorrência de perda de qualidade por

oxidação, causando mudança de cor dos grãos (NIETO e VIMOS, 1992). Segundo Nieto e Valdivia (2001) as perdas pré-colheita e na colheita de quinoa podem chegar a 16%.

A colheita tradicional de quinoa na Zona Andina é totalmente manual, o arranque das plantas também pode ser feito com foice e a debulha é realizada com fricção manual, golpes ou pisoteio de animais. A qualidade dos grãos nesse sistema fica comprometida pelo tempo de manuseio e pela mistura dos grãos com terra e restos culturais. Um sistema melhorado consiste em usar uma trilhadora estacionária (NIETO e VALDIVIA, 2001).

A colheita e trilha também podem ser feitas de maneira totalmente mecanizada, sendo essa a opção mais adequada para grandes extensões de terra (NIETO e VALDIVIA, 2001). Por se tratar de grãos pequenos e leves, devem-se tomar cuidados na regulagem da colhedora para evitar perda de grãos (FARRO, 2008).

1.1.8. Pós-colheita

As etapas de pós-colheita consistem em limpar os grãos, fazer a devida secagem dos mesmos para reduzir seu teor de água e conservar a qualidade do produto por um período de tempo maior na etapa subsequente que é o armazenamento.

A eliminação de impurezas dos grãos colhidos é uma prática importante do manejo de pós-colheita, pois permite melhorar a apresentação dos mesmos, preservando sua qualidade, e favorecendo o armazenamento. A norma técnica peruana define que uma massa granular de quinoa deve ter no máximo 4,5% de impurezas (SALAS, 1999). Manter um índice baixo de impurezas é importante, pois estas são higroscópicas e propensas ao ataque de fungos e insetos, o que acelera a deterioração dos grãos armazenados (NAVARRO e NOYES, 2002).

Assim como os demais cereais a quinoa também necessita passar por um processo de secagem se os grãos estiverem com alto teor de água, para evitar possíveis fermentações e queda na qualidade do produto e desta forma aumentar a armazenabilidade do produto.

Os grãos de quinoa podem ser secos naturalmente, antes da colheita, ou ainda fazer a colheita e apenas secar ao sol, recolhendo durante a noite para evitar um possível reumidecimento do produto. Esse tipo de secagem não é recomendado, principalmente, por aumentar as perdas quantitativas e qualitativas e ser sujeito a condição climática, porém é necessária quando o produtor não dispõe de tecnologias para realizar a secagem do produto com maior eficiência.

O ideal seria uma secagem com maior controle de qualidade, que é realizada em menor tempo e para uma maior quantidade de produto. A secagem consiste em passar, através

da massa de grãos, fluxos de ar previamente aquecido ou não. É recomendada também quando se tem condições atmosféricas desfavoráveis ou quando o processo produtivo exige o manejo de grandes quantidades de grãos em um tempo relativamente curto (NIETO e VALDIVIA, 2001).

O armazenamento de quinoa tem sido realizado em sacarias, principalmente por pequenos produtores que muitas vezes também utilizam latas e tambores, porém a FAO tem promovido o uso de silos metálicos de diferentes capacidades para a estocagem da quinoa e obtido resultados satisfatórios (TAPIA e ARONI, 2001).

Na literatura pode-se observar que pouco se tem estudado sobre a necessidade de criar máquinas próprias para o pré-processamento dos grãos de quinoa, o que se tem feito até agora é adaptar maquinário existente, próprio para outras culturas, e isso muitas vezes não traz um bom resultado, pois é preciso levar em consideração as peculiaridades da cultura para se obter sucesso nos processos de limpeza, secagem e armazenagem, reduzindo as perdas e aumentando a qualidade e competitividade do produto no mercado.

Domínguez (2003) destaca que as perdas na pós-colheita de quinoa podem ser de até 40% da produção total e que a maioria dos produtores de quinoa são pequenos agricultores, que obtêm um produto de qualidade inferior devido ao manuseio pós-colheita inadequado, resultando preços mais baixos para o produto.

1.2. Processos de pós-colheita de grãos

Para o armazenamento e a conservação das características fisiológicas dos produtos agrícolas por longos períodos, certos cuidados são necessários para evitar a deterioração, resultante de sua atividade biológica (CORRÊA et al., 2001a).

Quando colhidos os grãos encontram-se muitas vezes com elevado teor de água, e a primeira providência que deve ser tomada para um armazenamento seguro é a redução desse teor de água até níveis que reduza ao máximo a atividade biológica dos mesmos. A secagem é a técnica de pré-processamento mais utilizada para esse fim e consiste em forçar o ar através da massa granular, promovendo um processo de transferência de calor e massa entre o ar e o produto (BROOKER, 1992; AL-YAHYA e MOGHAZI, 1998).

Como medidas preventiva e/ou curativa, têm-se a aeração que é utilizada, durante o armazenamento, visando homogeneizar e/ou reduzir a temperatura da massa granular, evitando-se desníveis de temperatura ocasionados pelo desenvolvimento de insetos,

microrganismos e respiração da massa de grãos (ALAGUSUNDARAM et al., 1994; GINER e DENISIENIA, 1996).

A função do sistema de distribuição do ar em qualquer sistema de secagem ou aeração de grãos é distribuí-lo o mais homogêneo possível. Isso é desejável não somente para a eficiência da operação do equipamento, como a obtenção de um produto uniformemente seco ou aerado.

Uma massa de grãos é composta de partículas e espaços intergranulares. A resistência ao fluxo de ar se desenvolve como um resultado da perda de energia por meio de fricção e turbulência, em que o ar é forçado a atravessar a massa de grãos. Por esse motivo, a pressão total fornecida ao ar tem de ser maior que o gradiente de pressão ocorrido no sistema (AFONSO, 1994).

Goneli (2008) destaca que pesquisadores e profissionais da área de pré-processamento e armazenamento de produtos agrícolas tem dedicado bastante atenção à resistência específica de um meio poroso à passagem de ar sob a influência de um gradiente de pressão. O interesse por essa propriedade é devido ao seu efeito na análise de uniformidade de distribuição do fluxo de ar e na determinação da quantidade de energia que o sistema de movimentação precisa transferir ao ar para que possa vencer a resistência imposta pelos grãos. Esse conhecimento é importante, pois a má distribuição do ar em uma massa de grãos armazenados pode provocar o desenvolvimento de fungos em áreas onde a velocidade do ar é baixa e, também, ocasionar a supersecagem dos grãos em áreas com alta velocidade do ar.

Faz-se necessário então, o conhecimento da resistência que o produto oferece a passagem de ar para a elaboração de projetos de sistemas de ventilação forçada, utilizados na secagem e aeração. A resistência ao fluxo de ar promove uma queda de pressão estática, que é diretamente proporcional à potência do ventilador, afetando o consumo de energia requerida para a operação adequada do sistema (AL-YAHYA e MOGHAZI, 1998).

Essa resistência ao fluxo de ar de diferentes produtos agrícolas tem sido objeto de estudo durante, pelo menos, 56 anos. O conhecimento da resistência ao fluxo de uma determinada cultura é necessário para selecionar um ventilador adequado para fornecer o fluxo de ar requerido nos processos de pós-colheita (HIRNING e EICHHORST, 1987; SIEBENMORGEN e JINDAL, 1987).

1.2.1. Resistência ao fluxo de ar e fatores que influenciam

Diversos fatores afetam a resistência ao fluxo de ar, como, aspectos físicos da variedade, umidade do produto, tamanho e forma, densidade, quantidade e distribuição das impurezas na massa de grãos, dutos de ar, método de enchimento do silo, direção do fluxo de ar e profundidade da camada de grãos (HIRNING e EICHHORST, 1987; BROOKER et al., 1992).

A variação da resistência ao escoamento de ar em função do teor de água de grãos de milho foi estudada por Shedd (1951), que concluiu que o produto a teores de água acima de 25% b.s., oferece resistência menor que o milho mais seco. Haque et al. (1982), trabalhando com milho, sorgo e trigo, a teores de água entre 14,26 e 33,87% b.s. e densidades de fluxo de ar na faixa de 0,01 a 0,22 m³ s⁻¹ m⁻², encontraram resultados semelhantes.

Os diferentes tipos de grão influenciam grandemente a resistência ao fluxo de ar. As razões para essas diferenças estão diretamente relacionadas com as formas dos grãos. Alguns dos quais se encaixam mais firmemente, alterando assim o caminho que o ar deve seguir na massa de grãos (LOEWER et al., 1994).

A massa específica aparente dos grãos é uma importante propriedade física que afeta a resistência ao fluxo de ar. Berna e Charity (1975) estudando o efeito dessa propriedade sobre a resistência ao fluxo de ar em milho, chegaram à mesma conclusão de Yang e Willian (1990). Estes realizaram seus estudos com sorgo e, fazendo a mesma análise, concluíram que a relação é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a massa específica aparente da massa de grãos maior será a resistência imposta por esses à passagem do fluxo de ar.

1.2.2. Modelos empregados para expressar a perda de carga

A queda de pressão estática de uma camada de grãos, quando um fluxo de ar é forçado a passar por este, é frequentemente estimada por meio de curvas empíricas, relacionando fluxo de ar e pressão estática. A literatura cita o desenvolvimento de diversos modelos para simular a variação da pressão de uma massa de grãos submetida à passagem de um fluxo de ar.

A equação mais simples e mais utilizada para expressar a relação entre a queda de pressão e fluxo de ar é a equação de Shedd (1953) (Equação 1):

$$\Delta P = aQ^b \quad (1)$$

em que, ΔP é a queda de pressão estática, por unidade de profundidade, Pa m⁻¹; a e b são constantes particulares dos grãos; e Q é o fluxo de ar em m³ s⁻¹ m⁻².

Hukill e Ives (1955) desenvolveram um modelo para prever a queda de pressão, na faixa de fluxo de ar de 0,01 a 0,20 m³ s⁻¹ m⁻², e determinaram as constantes envolvidas na equação para vários grãos. A American Society of Agricultural and Biological Engineer (ASABE) recomenda essa equação semi-empírica para representar o fluxo de ar versus dados de queda de pressão, e lista os valores de a e b de diversos produtos para intervalos específicos de fluxo de ar (Equação 2) (ASABE, 2007):

$$\Delta P = \frac{aQ^2}{\ln(1 + bQ)} \quad (2)$$

em que, ΔP é a queda de pressão estática, por unidade de profundidade, Pa m⁻¹; a e b são constantes particulares dos grãos; e Q é o fluxo de ar em m³ s⁻¹ m⁻².

A porcentagem de impurezas presentes na massa de grãos é um fator importante que afeta a resistência ao fluxo de ar. A resistência ao escoamento de ar varia quando impurezas são adicionadas ao produto, sendo inversamente proporcional ao tamanho das impurezas (GRAMA et al., 1984). Materiais estranhos presentes em uma massa de grãos, quando menores que estes mesmos grãos, proporcionam aumento da resistência ao escoamento de ar e, quando maiores, diminuem a resistência (PATTERSON et al., 1971; SHEDD, 1951).

Para Haque et al. (1978), Alagusundaram e Jayas (1990) e Sokhansanj et al. (1990) é possível estimar a queda de pressão em uma camada de grãos com impurezas, com a adição do termo de impureza nas equações empíricas de queda de pressão estática.

Haque et al. (1978) desenvolveram uma equação empírica que relaciona o teor de impureza (Equação 3).

$$\Delta P = aQ + bQ^2 + cQI \quad (3)$$

em que, ΔP é a queda de pressão estática, por unidade de profundidade, Pa m⁻¹; a, b e c são constantes particulares dos grãos; Q é o fluxo de ar em m³ s⁻¹ m⁻²; e I é o teor de impurezas, decimal.

A Equação 4 também faz a correção da pressão levando em consideração as impurezas presentes (ASABE, 2007).

$$\Delta P = aQ^b(1 + (a - bQ)(I)) \quad (4)$$

em que, ΔP é a queda de pressão estática, por unidade de profundidade, Pa m^{-1} ; a e b são constantes particulares dos grãos; Q é o fluxo de ar em $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$; e I é o percentual de impurezas, decimal.

O efeito teor de impureza foi investigado por Giner e Denisienia (1996), que utilizaram camadas de trigo afetadas pela velocidade do ar, teor de água e impurezas. Propuseram a Equação 5 para estimar a queda de pressão estática em uma camada granular.

$$\Delta P = (a + bI)Q(1 + 3Q) \quad (5)$$

em que, ΔP é a queda de pressão estática, por unidade de profundidade, Pa m^{-1} ; a e b são constantes particulares dos grãos; Q é o fluxo de ar em $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$; I é a fração impureza no leito.

A Equação 6 foi desenvolvida por Guimarães (1998) que estudou o efeito do nível e do tipo de impurezas na resistência ao fluxo de ar em camadas de grãos de feijão.

$$\Delta P = aQ^b + cI \quad (6)$$

em que, ΔP é a queda de pressão estática, por unidade de profundidade, Pa m^{-1} ; a , b e c são constantes particulares dos grãos; Q é o fluxo de ar em $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$; I é a fração impureza no leito.

Sacilik (2004) também investigou equações para o efeito de níveis de impurezas em sementes de papoula e desenvolveu uma equação empírica que relaciona o conteúdo de umidade, a massa específica aparente e o teor de impurezas da massa de grãos (Equação 7).

$$\Delta P = aQ^2 + bMQ + c\rho_b Q + dIQ \quad (7)$$

em que, ΔP é a queda de pressão por unidade de profundidade, Pa m^{-1} ; a , b , c e d são coeficientes de regressão; M é o teor de água, % b.s.; Q é o fluxo de ar em $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$; ρ_b é a massa específica aparente da massa de grãos, kg m^{-3} ; e I é o teor de impurezas, %.

1.2.3. Pesquisas sobre a resistência dos grãos à passagem do fluxo de ar

O estudo da resistência do fluxo de ar através de produtos agrícolas foi iniciada por Stirniman et al. em 1931 e continuou por outros tendo sido relatado para grãos e sementes de cereais e oleaginosas (KASHANINEJAD e TABIL, 2009).

O efeito do teor de água, da concentração de impurezas e da densidade a granel sobre a resistência do fluxo de ar de arroz de grão longo foi determinado por Siebenmorgen e Jindal (1987). Os autores avaliaram o efeito da densidade (480 a 604 kg m⁻³), teor de água (13,6 a 31,6% b.s.) e teor de impurezas (0 a 30%), na resistência ao fluxo de ar, 0,013 a 0,387 m³ s⁻¹ m⁻². Estudando a condição específica de fluxo de ar de 0,10 m³ s⁻¹ m⁻² e as condições de projeto típicas para o arroz limpo (teor de água de 18% b.s., densidade de 577 kg m⁻³) os autores verificaram que: (a) com o aumento da concentração de 1% de impurezas há um aumento da resistência ao fluxo de ar de 0,87%; (b) aumentando a densidade de 16 kg m⁻³ ocorre um acréscimo da resistência de 3,37%; e (c) com o acréscimo de 1% do teor de água a resistência reduz 3,73%.

Dairo e Ajibola (1994) estudaram a resistência de sementes de gergelim ao fluxo de ar, 0,234 a 0,369 m³ s⁻¹ m⁻², em diferentes profundidades do leito, 0,15; 0,30 e 0,45 m, com densidade a granel que variaram de 562,5 a 713,2 kg m⁻³, níveis de umidade de 6,5, 10,4 e 18,2% b.s. e níveis de impureza, de 0, 5 e 10%. Concluíram que a resistência ao fluxo de ar aumentou com o acréscimo da taxa de fluxo de ar, densidade, profundidade do leito, porcentagem de impureza fina e redução do teor de água. A queda de pressão encontrada variou de 94 a 679 Pa m⁻¹.

Pagano et al. (1995) determinaram a resistência ao fluxo de ar, faixa de 0,07 a 0,60 m³ s⁻¹ m⁻², em leitos de soja de produção argentina, influenciada pela presença de material estranho, 0, 7, 18, 25 e 75, 100 %, e pela direção do fluxo de ar, horizontal e vertical. Concluíram que a queda de pressão em leitos de material estranho foi aproximadamente 5 vezes maior que a de soja limpa em fluxo vertical e 1,5 vezes em fluxo horizontal. Nos leitos de soja limpa, a perda de carga em fluxo vertical foi 2,5 vezes maior que a de fluxo horizontal. Em leitos com material estranho a resistência em fluxo vertical foi doze vezes maior que a de fluxo horizontal. Com isso os autores ressaltam a possibilidade de economia de energia empregando, nos sistemas de aeração, fluxo horizontal.

Pagano et al. (1998) estudando a resistência ao fluxo de ar em massa de sementes de linho (*Linum usitatissimum*) e avaliando dois tipos de impurezas, fina e grossa, concluíram que a resistência ao fluxo de ar aumenta com o acréscimo de impurezas finas e reduz com o

aumento de impureza grossa. Ao se misturar impurezas finas à massa de grãos limpo, houve um aumento da resistência ao fluxo de ar por unidade de profundidade do leito, sendo que o acréscimo de 5 a 10% e de 5 a 15% correspondeu ao aumento de 81 e 116%, respectivamente, na queda de pressão no fluxo de $0,011 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, e aumentos de 24 e 56% para o fluxo de $0,141 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. O acréscimo de impurezas grossas de 5 a 10% produziu uma redução de 7% na resistência ao fluxo de ar.

Gunasekaran e Jackson (1998) determinaram a resistência ao fluxo de ar de sementes de sorgo, com umidade de 19,8, 22,7 e 29,9% b.s., na faixa de fluxo de ar de 0,05 a $0,30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Concluíram que a perda de carga aumenta com o acréscimo de fluxo de ar, com a profundidade do leito e com a redução da umidade dos grãos. A queda de pressão aumentou mais rapidamente com o acréscimo de velocidades de ar do que com profundidades de leito crescentes.

Rajabipour et al. (2001) determinaram a relação entre a queda de pressão e o fluxo de ar em uma coluna de nozes. Foi usado um compressor de ar para conseguir os fluxos de ar desejado na coluna. Os resultados mostraram que, houve uma maior queda de pressão estática com o aumento do fluxo de ar e com o aumento da umidade do produto, especialmente para fluxos de ar maiores.

Sacilik (2004) determinou a resistência ao fluxo de ar de sementes de papoulas a granel, avaliou a influencia da umidade do produto (6,21 a 18,37% b.s.), da densidade (558,3 a $592,7 \text{ kg m}^{-3}$), teor de impureza (0 a 10%), profundidade do leito e taxa de fluxo de ar (0,03 a $0,08 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$). A queda de pressão através dos leitos de semente de papoulas aumentou com um aumento na taxa de fluxo de ar, profundidade do leito, densidade e do teor de impurezas e com redução no teor de água. A queda de pressão observada aumentou mais rapidamente com taxas de fluxo de ar crescentes do que com o aumento profundidade do leito. Um incremento de 10% no teor de impureza causou um aumento na queda de pressão em cerca de 30,08%.

Agulo e Marenya (2005) determinaram a resistência ao fluxo de ar de café pergaminho a granel em teores de água de 14,5; 24,4; 44,3 e 58% b.s. Foi estudado o fluxo de ar na faixa de $0,126$ a $0,72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Os resultados indicaram que a resistência ao fluxo de ar através de uma coluna de café aumentou com a profundidade do leito e fluxo de ar e com redução no teor de água, tanto para enchimento denso quanto solto. Colunas densamente preenchidas resultaram em maior resistência ao fluxo de ar. Concluiu-se também que o fluxo de ar teve o maior efeito sobre a queda de pressão, seguido pelo teor de água e massa específica aparente.

Sorour (2006) avaliou a queda de pressão em leitos de grãos de girassol, a quatro fluxos de ar (0,05; 0,08; 0,11 e 0,13 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$), três níveis de temperatura do ar (40; 50 e 60 °C), quatro teores de água dos grãos (10,5; 11,7; 16,3 e 21,2% b.s.) e três métodos de enchimento (normal, solto e vibrado). Os resultados mostraram que: (a) a queda de pressão aumenta com o aumento do fluxo de ar; (b) A redução da umidade do girassol aumenta a resistência ao fluxo de ar; (c) A queda de pressão aumenta com o incremento na massa específica aparente dos grãos, mesmo usando métodos diferentes de preenchimento; e (d) A queda de pressão diminuiu com o aumentando da temperatura do ar.

Silva et al. (2006) determinaram, expressões para descrever as variações da massa específica, aparente e real, e porosidade do café em coco e despulpado, em função do teor de água do produto. O comportamento da resistência ao fluxo de ar em colunas de café foi avaliado em função do teor de água do produto, intensidade do fluxo e profundidade na coluna. Para o comportamento da pressão estática na coluna do produto, concluíram que a pressão no café despulpado é sempre maior do que no café em passa, para todas as profundidades e nos três teores de água.

Abou-el-hana e Younis (2008) determinaram a queda de pressão em leitos de milho, variando o fluxo de ar, o teor de água e a temperatura do ar. Concluíram que a redução do teor de água do milho e da temperatura do ar e o acréscimo do fluxo de ar aumentaram a resistência da massa de grãos de milho.

Kashaninejad et al. (2010) estudaram a queda de pressão através de uma coluna de pistache (variedade Kalleghochi). Foram investigados o efeito do teor de água, da taxa de fluxo de ar, profundidade do leito e método enchimento. Para isso variou a umidade do produto (5,04; 16,96; 31,06; 60,26 e 83,82% b.s.), as profundidades da coluna (0,25; 0,50; 0,75 e 1,0 m,) e dois métodos de preenchimento (frouxo e denso) para fluxos de ar de 0,08 a 1,00 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$. Os resultados indicaram que a resistência ao fluxo de ar através de uma coluna de pistache aumentou com o aumento profundidade do leito, teor de água e fluxo de ar para os dois métodos de preenchimento. O fluxo de ar foi o fator mais importante que afetou a queda de pressão do pistache, seguido pelo método de preenchimento e teor de água.

Shahbazi (2011) pesquisou a resistência ao fluxo de ar de sementes a granel de grão de bico com teores de água de 11,28 a 37,29% b.s., para o fluxo de ar de faixa 0,02 a 0,50 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$. Foram investigados os efeitos do fluxo de ar, profundidade do leito (0,25 a 1,0 m), método de enchimento (frouxo e denso) e teor de água, na resistência de grão de bico. Os resultados indicaram que a resistência de sementes de grão de bico à passagem do fluxo de ar aumentou com o aumento do fluxo de ar e profundidade do leito, e diminuiu com o teor de

água. Um por cento de aumento no teor de água diminuiu a queda de pressão em 2,94%. O método de preenchimento denso resultou num aumento na resistência ao fluxo de ar de cerca de 33,17% a mais do que no enchimento solto.

1.3. Modelagem usando elementos finitos

Teoricamente, o problema de escoamento de fluidos é definido pelas leis de conservação de massa, de *momentum* e de energia. Quando se consideram as seguintes restrições do fluido, isto é, fluido Newtoniano, fluido incompressível, sem mudança de fase, com escoamento isotérmico e permanente, domínio espacial não muda com tempo e viscosidade constante do fluido, a Equação 8 representa a equação de conservação de massa (ANDRADE et al., 2001):

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

em que, $\vec{V} = (V_x, V_y \text{ e } V_z)$ são os componentes do vetor velocidade do fluido nas direções x, y e z, respectivamente; x, y e z são as coordenadas cartesianas.

As Equações 9, 10 e 11 representam as equações de momentum (ANDRADE et al., 2001).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} \\ = & \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial z} \\ = & \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_z)}{\partial z} \\ = & \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

em que, P é a pressão do fluido; ρ é a densidade do fluido; $g = (g_x, g_y \text{ e } g_z)$ são componentes da aceleração da gravidade nas direções x , y e z , respectivamente; $\vec{R} = (R_x, R_y \text{ e } R_z)$ representam quaisquer termos adicionais (fontes ou sorvedouros) nas direções x , y e z , respectivamente; e μ_e = viscosidade efetiva.

O tratamento analítico do escoamento de fluidos em leitos de partículas é bastante complexo. Enquanto as partículas que compõem o leito possuem, em geral, diferentes formas e tamanhos, o fluido escoar por complicados labirintos e a geometria do escoamento difere de maneira não previsível de uma região para outra do material. Por estas razões, a análise do escoamento de fluidos através de leitos de partículas tem sido feita de forma empírica. Na mecânica dos fluidos de meios porosos as equações de conservação são substituídas por numerosas observações experimentais resumidas matematicamente, como a lei de Darcy (BEJAN, 1984).

Conforme Marchant (1976), o método de elementos finitos pode ser usado com razoável precisão para resolver equações que descrevem a distribuição do fluxo de ar em produtos agrícolas. O método, em comparação com as outras técnicas, possui a vantagem de resolver as equações para sistemas em qualquer forma geométrica.

No método dos elementos finitos, aplicado a escoamentos de fluidos, a região espacial em estudo é dividida em elementos conectados por pontos comuns (nós), e as equações 8, 9, 10 e 11 são discretizadas para cada elemento. O método de Galerkin, o dos resíduos ponderados (SEGERLIND, 1984), é usado na obtenção de matrizes para os elementos que são acoplados em uma única matriz. O sistema de equações resultante é resolvido para cada grau de liberdade obtendo-se, assim, valores de pressão e de velocidade em cada nó do sistema.

Os termos R_x , R_y e R_z , nas equações 9, 10 e 11, podem ser considerados resistências distribuídas (representações macroscópicas de geometria no interior da região em estudo) e são uma maneira conveniente de se aproximar efeitos de meios porosos sem realmente modelar a sua geometria (ANDRADE et al., 2001).

O conhecimento da queda de pressão do ar ao escoar em leitos de grãos é essencial no dimensionamento de sistemas eficientes de secagem e aeração de produtos vegetais. Vários modelos têm sido propostos para expressar a queda de pressão em função da profundidade da coluna de grãos. Os valores dos desvios entre os resultados provenientes da aplicação desses modelos e os valores experimentais de gradientes de pressão com a profundidade são variáveis que dependem do produto e da faixa de fluxo de ar em consideração. Técnicas

numéricas aplicadas em conjunto com processos de otimização podem ser uma alternativa razoável na modelagem do escoamento de ar em meios porosos (ANDRADE et al. 2001).

Essas técnicas têm sido usadas na resolução de problemas de escoamento de fluidos, dentre estas, a técnica de elementos finitos, que vem sendo utilizada com sucesso por vários pesquisadores para a resolução de diferentes problemas envolvendo escoamentos, como por exemplo, Lai (1980), Ferguson (1995), Gong e Mujumdar (1995) e Rojano et al. (1998).

Miketinac et al. (1986), utilizando a técnica de elementos finitos, determinaram a distribuição do fluxo de ar em silos de fundo plano e cônicos, e com diferentes dutos de distribuição do ar, e concluíram que a técnica de elementos finitos pode ser usada para prever a distribuição do ar nos silos e determinar as zonas onde ocorre baixa velocidade do ar.

Andrade et al. (2001), usando a técnica de elementos finitos, modelaram a queda de pressão estática em um leito recheado de grãos de canola submetido a diferentes fluxos de ar. Utilizando um processo de otimização determinaram a permeabilidade do leito aos diferentes fluxos de ar. Quando comparados com resultados provenientes de modelos clássicos, a técnica de elementos finitos apresentou os melhores resultados de queda de pressão. O erro relativo, usando-se a técnica de elementos finitos, variou na faixa 0,7 a 24,3% e, para todas as simulações, o erro foi igual a 5,3%.

Khatchatourian e Savicki (2004) empregaram a técnica de elementos finitos para desenvolver um modelo matemático, considerando a não uniformidade da massa de grãos, para a simulação de fluxos de ar no processo de aeração de soja. Para obter a relação empírica entre o coeficiente de permeabilidade e o fator de profundidade, o equipamento experimental foi construído para reproduzir as condições existentes em um silo. Simulações numéricas da operação de aeração de grãos de soja foram feitas para diferentes layouts e projetos de aeração. Avaliando vários projetos de aeração de silos, observaram que silos com fundo V tem velocidade do ar em sua base muito maior do que nas camadas superiores, e citaram a geometria do silo e a compactação dos grãos como fatores que provocam esse fenômeno.

Devilla et al. (2005) utilizaram técnica de elementos finitos para determinar a distribuição do fluxo de ar em uma massa de grãos de milho submetida a um processo de aeração. Para validação do modelo foram feitos experimentos com o fluxo de ar simulado, $0,0157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Os testes foram realizados em silo metálico, provido de dutos circulares para aeração, onde o produto com teor de água de 14,94% b.s. estava armazenado. Os autores concluíram que: (a) na parte inferior, próximo ao centro do silo e à sua parede, existem zonas de baixo fluxo de ar na massa de grãos; (b) as velocidades do ar na superfície da massa de grãos, simuladas e experimentais, tenderam a ser uniformes; e (c) a utilização da técnica de

elementos finitos para a predição da distribuição do fluxo de ar, em silos providos de sistema de aeração, mostrou-se satisfatória e envolveu um erro relativo médio de 6,9%.

Khatchatourian e Binelo (2008) usando técnica de elementos finitos simularam tridimensionalmente o fluxo de ar através grãos de soja, milho, arroz e trigo, armazenados em silos, tipo graneleiro, de elevada capacidade. Para validar o modelo proposto, as relações empíricas entre a velocidade do ar e queda de pressão estática foram obtidas para camadas compactadas em diferentes profundidades da massa de grãos armazenada. A eficiência do sistema aeração de vários grãos armazenados foi analisada para proporcionar a uniformidade de distribuição do fluxo de ar e os valores de pressão estática que geram fluxo de ar apropriado para armazenamento seguro. Além disso, foi mostrado que é possível otimizar a distribuição do fluxo de ar em silos com grãos armazenados, operando os dados de entrada, e selecionando um período de aeração adequado para cada situação. As simulações mostraram um bom desempenho e o método pode ser aplicado para otimizar o desempenho do sistema de aeração em silos e reduzir os custos de engenharia de novos depósitos de grãos.

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 – Goiás.

2.1. Material

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.

2.2. Métodos

2.2.1. *Determinação do teor de água*

Determinou-se o teor de água pelo método padrão da estufa, à temperatura de $105\pm 3^{\circ}\text{C}$, durante 24 h, em três repetições, de acordo com a Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Esse procedimento foi realizado antes e após a determinação da pressão estática.

2.2.2. *Caracterização granulométrica da amostra e impureza*

A granulometria, 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).

2.2.3. *Obtenção de lotes com diferentes percentuais de impureza*

Para obtenção dos diferentes percentuais de impureza, 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.

Foram consideradas como sendo impurezas materiais provenientes da própria planta como galhos, palhas, resíduos maiores e menores que os grãos, retirados na operação de pré-limpeza. O produto limpo foi considerado com 0% de impureza.

2.2.4. Tamanho e forma

O tamanho dos grãos de quinoa foi determinado a partir das dimensões dos eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura), Figura 1, de cinquenta grãos, em três repetições, com o auxílio de um paquímetro digital com precisão 0,01 mm, de acordo com Mohsenin (1986) utilizado por Nunes (2009).

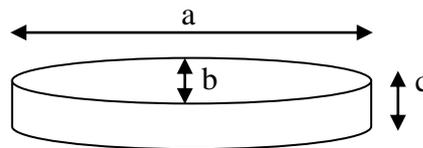


FIGURA 1 – Eixos ortogonais dos grãos de quinoa (a: comprimento; b: largura; e c: espessura).

Determinados os eixos ortogonais dos grãos de quinoa, foi estimada a forma dos grãos, conforme Mohsenin, (1978). Essas medidas possibilitaram calcular a esfericidade, a circularidade e o diâmetro equivalente, conforme as Equações 12, 13 e 14, respectivamente.

$$S = \frac{(a \times b \times c)^{\frac{1}{3}}}{a} \times 100 \quad (12)$$

em que, S é esfericidade, %; a é a medida do maior eixo do grão, m; b é a medida do eixo normal ao eixo a, m; e c é a medida do eixo normal aos eixos a e b, m.

$$C = \frac{d_i}{d_c} \times 100 \quad (13)$$

em que, C é a circularidade, %; d_i é o diâmetro do maior círculo inscrito, m; e d_c é o diâmetro do menor círculo circunscrito, m.

$$D_e = (a \times b \times c)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

em que, D_e é o diâmetro equivalente, %.

2.2.5. *Massa específica aparente*

Com o auxílio de um recipiente cilíndrico de volume conhecido ($0,2214 \text{ m}^3$) e uma balança de precisão de $0,001 \text{ g}$, determinou-se a massa específica aparente, em cinco repetições. A altura de queda de $0,3 \text{ m}$ foi utilizada para o enchimento do recipiente. Em seguida pesou-se o recipiente com os grãos e utilizou-se a Equação 15 para estimar a massa específica aparente das massas de grãos com diferentes teores de impureza.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \quad (15)$$

em que, ρ_{ap} é a massa específica aparente, kg m^{-3} ; m é a massa do produto, kg ; e V é o volume do recipiente, m^3 .

2.2.6. *Porosidade*

A porosidade foi determinada pelo método direto, conforme Mohsenin (1978). Fixou-se uma altura de queda, $0,3 \text{ m}$, 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.

2.2.7. *Determinação da perda de carga em uma coluna de quinoa*

a) Fluxos de ar

Foram impostos, na entrada do leito, os fluxos de ar: $0,1$; $0,2$; $0,3$ e $0,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$, para simular os fluxos de ar utilizados nos processos de secagem e aeração dos grãos.

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

b) Determinação da pressão estática

Para cada combinação de percentual de impureza e fluxo de ar, fez-se a leitura da pressão estática em 1 ponto no plenum e 9 pontos na coluna de grãos.

c) Equipamento experimental

Para a coleta dos dados de pressão estática, que indica a resistência à passagem do fluxo de ar em uma coluna de quinoa, foi projetado e construído um dispositivo de testes conforme Figura 2.

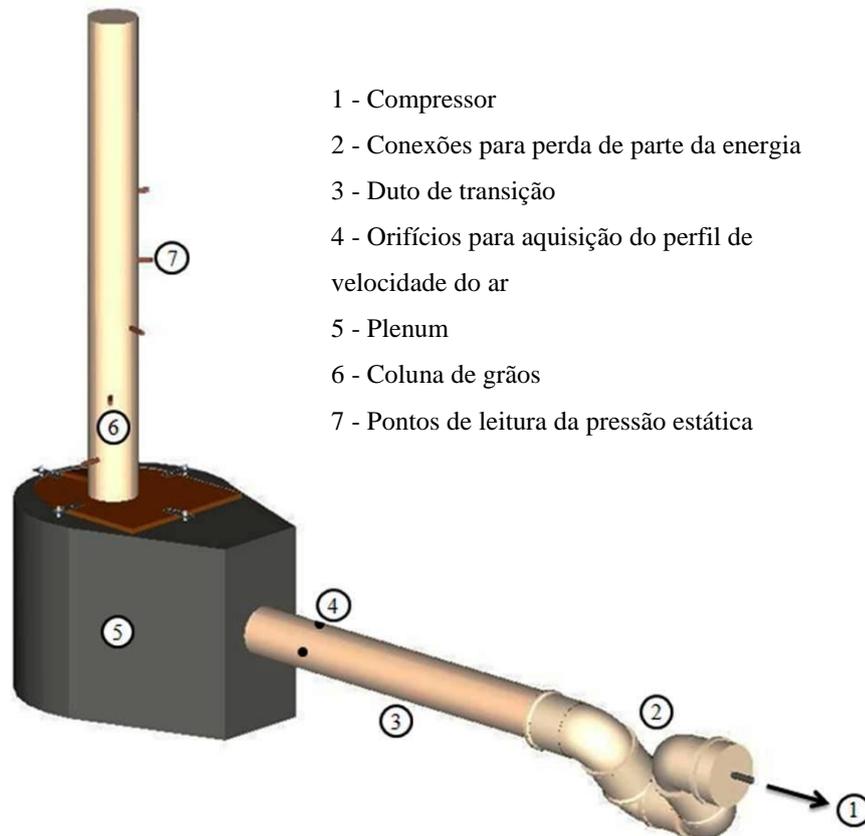


FIGURA 2 – Equipamento experimental utilizado na determinação da resistência dos grãos de quinoa, cultivar Real, a passagem do fluxo de ar.

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 (Figura 3A).

Tubo de transição: construído em PVC, tendo 1 m de comprimento e 0,1 m de diâmetro. Nesse tubo, a 0,85 m da entrada do plenum foi colocado um homogeneizador de fluxo tipo colméia e a 0,15 m da entrada do plenum foram feitos os orifícios para determinação do perfil de velocidade. Visando determinar a pressão estática, para o fluxo de ar até $0,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, colocou-se na entrada do tubo de transição, que conduz o ar até o plenum, quatro conexões em curva de 90° , objetivando com isso perder parte da energia fornecida antes de atingir a coluna com grãos (Figuras 3B, 3C e 3E).

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 (Figura 3E).

Base da coluna de grãos: confeccionada em madeira e 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 feita na base da coluna, próxima a mesma (Figura 3E).

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 isso o diâmetro deve ser no mínimo 16 vezes maior que o diâmetro do produto (YANG e WILLIAMS, 1990) (Figura 3E).

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

Tubos para medição de pressão estática: foram distribuídos 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 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 a 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 (Figuras 3D e 3F).

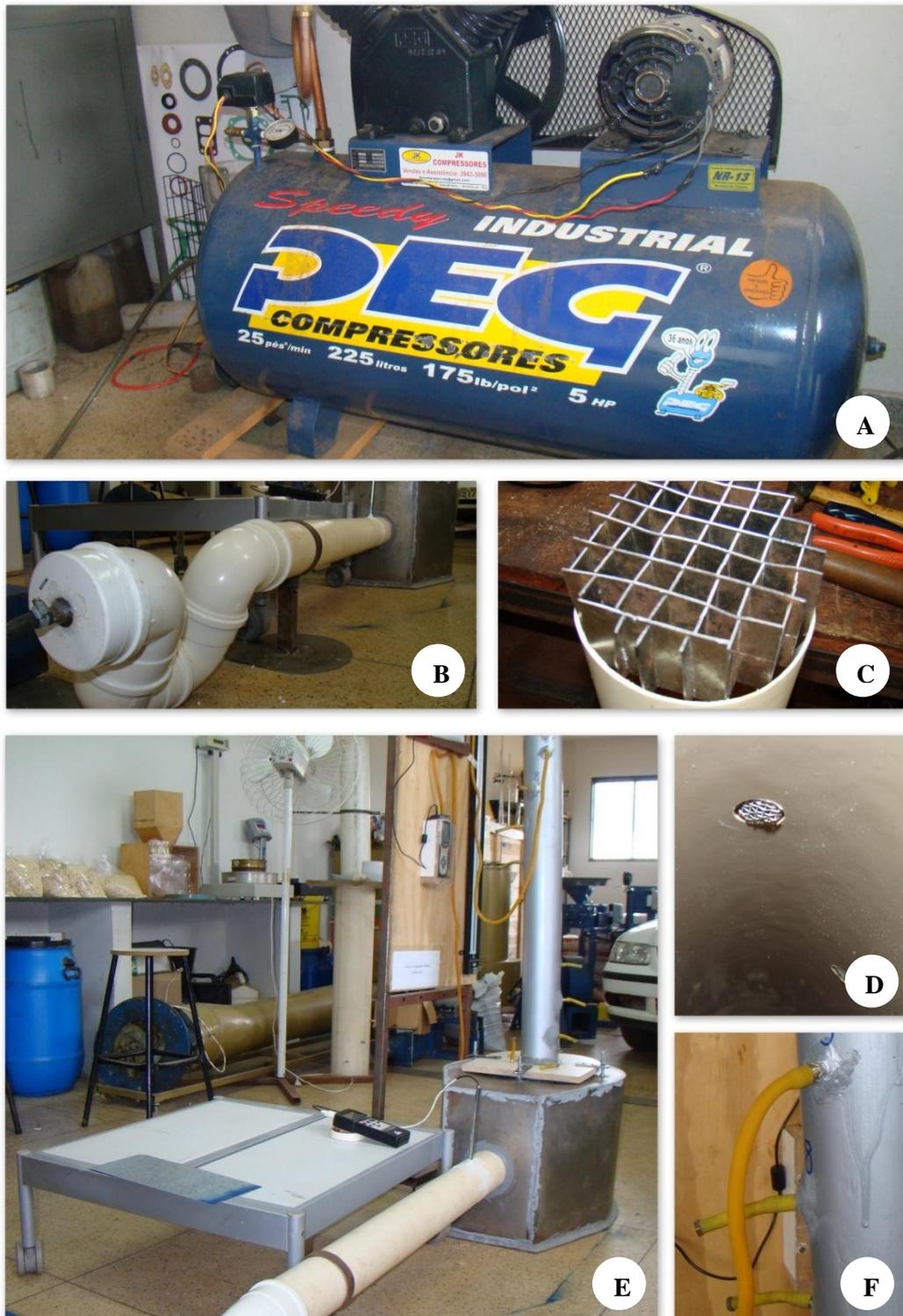


FIGURA 3 – Componentes do equipamento experimental utilizado na tomada de pressão estática na coluna com grãos de quinoa: (A) Compressor; (B) Conexões utilizadas para reduzir a pressão; (C) Homogeneizador de fluxo; (D) Tela utilizada para evitar escoamento dos grãos nos tubos de medição; (E) Tubo de transição, plenum e coluna para leitura de pressão estática; e (F) Tubos para medição da pressão, vedados.

2.2.8. *Procedimentos para determinação de pressão estática*

A seguir é descrito, o procedimento utilizado para a determinação da pressão estática dos lotes de quinoa com diferentes percentuais de impurezas.

1. Verificou-se e corrigiu possíveis vazamentos no equipamento.
2. Com a altura de queda fixada, encheu-se a coluna com os grãos de quinoa até completar 1 m de altura.
3. Ligou-se o compressor e ajustou-se a abertura da válvula de saída de ar, a fim de se obter a vazão de ar desejada.
4. Determinou-se o perfil de velocidade do ar no duto de transição, com o auxílio de um anemômetro de fio quente. Com os valores médios da velocidade e da área da seção transversal do duto de transição, calculou-se a vazão de ar.
5. Definida a vazão, iniciou-se a determinação da pressão estática, com o auxílio de um manômetro de coluna d'água, em U, com precisão de 1 mm. Foram determinadas em nove pontos ao longo da coluna de grãos, sendo que apenas o ponto em que se estava fazendo a leitura permanecia aberto, os demais permaneciam vedados.
6. Terminado a tomada de pressão estática ao longo da coluna para o primeiro fluxo de ar, esperou-se o compressor atingir a pressão de trabalho e efetuou-se a regulagem da vazão de ar e o perfil de velocidade novamente, para a determinação da pressão estática do próximo fluxo.
7. Concluídos as leituras de pressão de todos os fluxos, a válvula do compressor foi fechada totalmente e o sistema desmontado, retirando todo o produto da coluna e uma nova amostra de quinoa foi, aleatoriamente, acondicionada na coluna para que todos os passos anteriormente descritos pudessem ser repetidos. O procedimento foi realizado até concluir as três repetições de cada percentual de impureza.

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, e teor de água.

2.2.9. Modelagem matemática

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 a modelos matemáticos apresentados na Tabela 1 e 2, respectivamente.

TABELA 1 – Modelos matemáticos ajustados à perda de carga em grãos de quinoa, cultivar Real, isentos de impurezas.

Referência	Modelo matemático
SHEDD (1951)	$\Delta PL = aQb$
HUKILL e IVES (1955)	$\Delta PL = (aQ^2) / (\ln (1 + bQ))$
HUNTER (1983)	$\Delta PL = aQ + bQ^2$
Linear	$\Delta PL = a + bQ$
Logaritmo	$\Delta PL = a \ln(Q) + b$

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

TABELA 2 – Modelos matemáticos ajustados à perda de carga em grãos de quinoa, cultivar Real, com diferentes percentuais de impurezas.

Referência	Modelo matemático
HAQUE (1978)	$\Delta PL = aQ + bQ^2 + cQI$
GINER e DEINISIENIA (1996)	$\Delta PL = (a + bI) Q (1 + 3Q)$
GUIMARÃES (1998)	$\Delta PL = aQb + cI$
ASABE (2007)	$\Delta PL = aQ^b (1 + (a - bQ) I)$

em que, ΔPL é a perda de carga, Pa m^{-1} ; Q é o 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, foi realizada análise de regressão linear e não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 6.0®. Os modelos foram selecionados considerando-se a magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e a 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, de acordo com Barros et al. (1995). O erro médio relativo para cada um dos modelos foi calculado conforme a Equação 16.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (16)$$

em que, P é o erro médio relativo, em %; n é o número de observações experimentais; Y é o valor observado experimentalmente; e \hat{Y} é o valor estimado pelo modelo;

2.2.10. Análise por elementos finitos

De posse das equações, que melhor representam o fenômeno de perda de carga em uma massa de quinoa com e sem impurezas, estimou-se ao longo da coluna, a perda de carga dos grãos de quinoa em diferentes fluxos de ar (0,1; 0,2; 0,3; e 0,4 m³ s⁻¹ m⁻²) e com percentuais de impureza de 0, 1, 2, 3, 4 e 5%. Com os dados simulados, fez-se uma análise tridimensional, usando a técnica de elementos finitos, visando determinar a resistência distribuída na massa granular de quinoa, com e sem impurezas.

A análise tridimensional, por elementos finitos, do escoamento de ar em uma coluna fixa de quinoa, foi realizada utilizando-se o software ANSYS, versão 5.3.

O problema de escoamento de fluidos é definido, teoricamente, pelas leis de conservação de massa, de momentum e de energia. Se forem consideradas as restrições do fluido, isto é, fluido Newtoniano, fluido incompressível, sem mudança de fase, com escoamento isotérmico e permanente, domínio espacial invariável com tempo e viscosidade constante, a equação de conservação de massa pode ser expressa como Equação 8 (ANDRADE et al., 2001).

O produto no interior da coluna foi considerado equivalente a uma resistência distribuída no interior do duto, ou seja, correspondente aos termos R_x , R_y e R_z , das Equações 9, 10 e 11, que representam as equações de *momentum* (ANDRADE et al., 2001). Dessa forma, a queda de pressão no leito foi estimada sem se considerar a geometria do meio poroso.

A resistência ao escoamento, modelada como uma resistência distribuída pode ser devida 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 ($C = 1/K$). Assim, o gradiente de pressão total, na direção x, pode ser expresso pela Equação 17 (ANSYS, 2001).

$$\frac{\partial P}{\partial x_{\text{resistência}}} = - \left\{ F \rho V_x |V| + \frac{f}{D_h} \rho V_x |V| + C_x \mu V \right\} \quad (17)$$

em que: D_h - diâmetro hidráulico.

Considerou-se o meio isotrópico ($C_x = C_y = C_z = C$) e foram desprezadas a fricção nas paredes do duto (f) e as perdas localizadas de pressão (F). O duto foi dividido em elementos do tipo FLUID 142, com oito nós.

No Ansys foi utilizado um programa-fonte visando à determinação da resistência distribuída. As entradas do programa-fonte foram as propriedades do ar e as condições de contorno: As condições de contorno foram: (1) velocidade nula segundo os três eixos coordenados na parede lateral interna do duto; (2) velocidade constante e uniformemente distribuída na base do duto; e (3) pressão igual à atmosférica em todos os nós da extremidade superior do duto.

Para a obtenção dos valores da resistência distribuída (RD1), associada a cada velocidade de entrada do ar e a cada teor de impureza, foi utilizada a rotina de otimização do ANSYS, obedecendo-se os seguintes passos:

1. O programa-fonte foi executado com um valor inicial de resistência distribuída;
2. Os valores de pressão em nós situados em determinadas profundidades ao longo do duto, foram obtidos;
3. Os erros relativos ($\text{erro} = 100 \times |V_e - V_s|/V_e$) entre os valores simulados, V_s , e os obtidos experimentalmente, V_e , para as mesmas profundidades, foram calculados;
4. Determinou-se o somatório de todos os erros relativos, considerando-se todas as profundidades, e esse resultado foi armazenado em uma variável (P1) a ser minimizada;
5. Atribuiu-se valores, máximo e mínimo, para a variável RD1 e, também, o erro máximo admitido para a variável P1;
6. A rotina de otimização do programa ANSYS foi acionada e determinada o valor de RD1 que conduziu a um valor mínimo para a variável P1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização das amostras

Os resultados da caracterização do teor de água das amostras no início e ao término da determinação da pressão estática estão apresentados na Tabela 3. Como era de se esperar, houve uma secagem das amostras após a realização dos testes devido à exposição do produto aos fluxos e ar.

TABELA 3 – Médias e desvios do teor de água das amostras de quinoa isenta de impurezas e com 1, 2, 3, 4, e 5% de impurezas.

Teor de água (b.s)	Percentual de impurezas (%)					
	0	1	2	3	4	5
Início	16,98±0,308	17,35±0,06	17,54±0,121	17,68±0,155	17,96±0,137	18,06±0,221
Término	15,81±0,305	16,02±0,148	16,31±0,175	15,77±0,167	15,86±0,456	15,55±0,122

Na Tabela 4 são mostrados os resultados da composição granulométrica dos grãos de quinoa da cultivar Real. Nota-se que, aproximadamente, 20% das impurezas são maiores que os grãos de quinoa e 3,5% menores que estes. A composição das partículas de impurezas indicou uma mistura de impurezas grossas e finas e para caracterizar melhor as partículas de grãos de quinoa seriam necessárias peneiras de malhas intermediárias, entre de 2 e 1 mm.

TABELA 4 – Médias e desvios da composição granulométrica dos grãos e impurezas de quinoa.

Peneiras (malha)	Grãos (%)	Impurezas (%)
# 2 mm	0,5±0,1	20,51±4,09
# 1 mm	99,5±0,34	71,29±4,32
# 0,5 mm	0±0,0	2,88±0,07
Fundo	0±0,0	0,61±0,18

A caracterização do tamanho e forma dos grãos de quinoa está apresentada na Tabela 5. As dimensões dos grãos de quinoa justificam as adaptações feitas no equipamento experimental.

TABELA 5 – Médias e desvios dos eixos ortogonais (a, b e c), da esfericidade, da circularidade e do diâmetro equivalente dos grãos de quinoa, cultivar Real.

Eixo a (10^{-3} m)	Eixo b (10^{-3} m)	Eixo c (10^{-3} m)	Esfericidade (%)	Circularidade (%)	Diâmetro Equivalente (10^{-3} m)
2,13±0,20	2,02±0,19	1,12±0,18	79,04±3,40	94,86±3,70	1,69±0,18

Na Figura 4 são mostrados os valores da massa específica aparente e da porosidade da massa de grãos de quinoa em função do teor de impurezas. 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. (2001b), para grãos de feijão, Agullo e Marenya (2005) que trabalharam com café em pergaminho e Gonelli (2008) que estudou grãos de mamona.

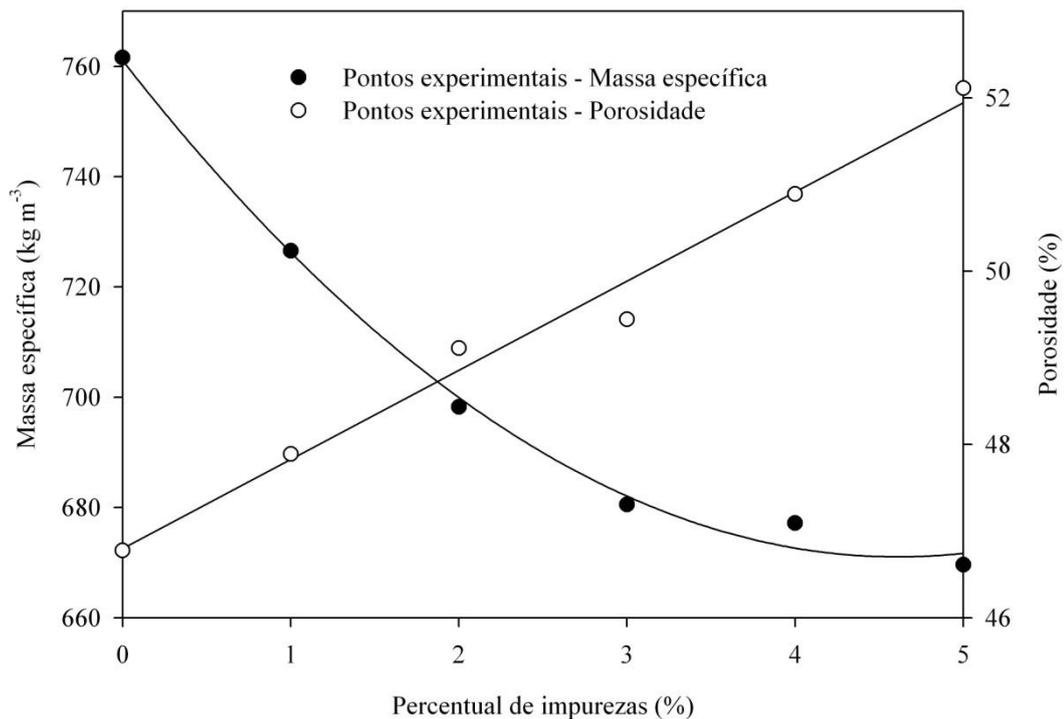


FIGURA 4 – Valores da massa específica aparente (kg m^{-3}) e da porosidade (%) dos grãos de quinoa, cultivar Real, em função de diferentes percentuais de impurezas (%).

Na Tabela 6 são apresentados modelos ajustados aos dados experimentais da massa específica aparente e da porosidade da massa de grãos de quinoa com diferentes percentuais

de impurezas, seus respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2) e a magnitude do erro médio relativo (P).

TABELA 6 – Modelos estimados aos dados experimentais da massa específica aparente e porosidade dos grãos de quinoa em função do teor de impurezas.

Propriedades físicas	Modelo	R^2 (%)	P (%)
Massa específica aparente (kg m^{-3})	$Me = 4,229^+I^2 - 39,027^+I + 761,09^+$	99,52	0,84
Porosidade (%)	$PO = 1,0286^+I + 46,799^+$	99,21	0,33

⁺ Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste t.

Nota-se na Tabela 6 que os elevados valores de coeficiente de determinação (R^2), os baixos valores da magnitude do erro médio relativo (P) e significância da regressão indicam que os modelos se ajustaram bem aos dados experimentais.

3.2. Perda de carga em grãos de quinoa

A variação da pressão estática em função da profundidade da camada e do fluxo de ar, para a quinoa isenta de impurezas, está apresentada na Figura 5.

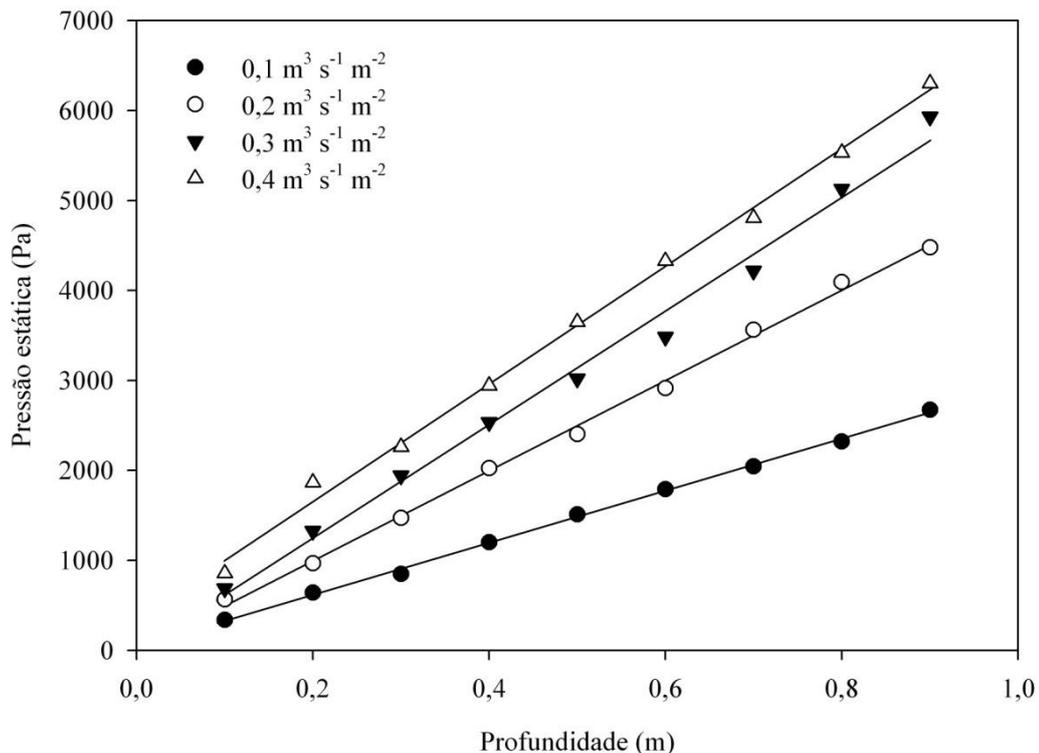


FIGURA 5 – Influência da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa isentos de impurezas.

Na Figura 5, pode-se observar que para um mesmo fluxo de ar a pressão estática aumenta linearmente com o aumento a profundidade da camada de grãos de quinoa. Nota-se, também, que para uma mesma profundidade da camada 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, 150%.

Nas Figuras 6, 7, 8, 9 e 10 estão os resultados da pressão estática para os grãos de quinoa com diferentes percentuais de impurezas.

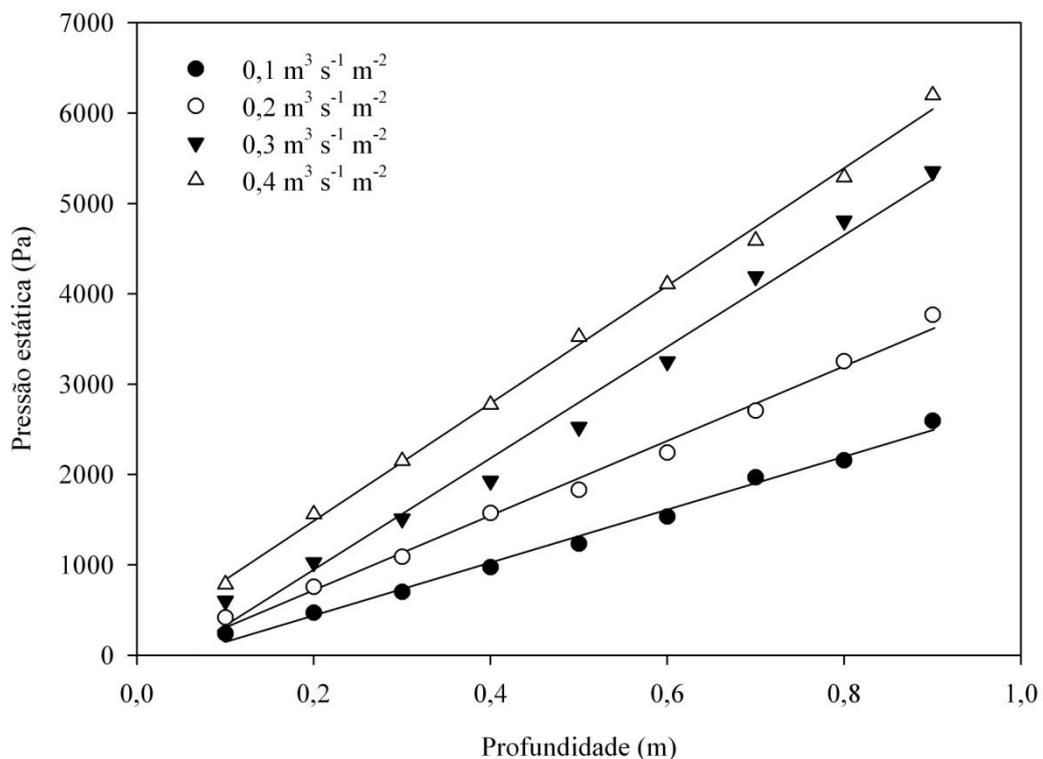


FIGURA 6 – Influência da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa com 1% de impurezas.

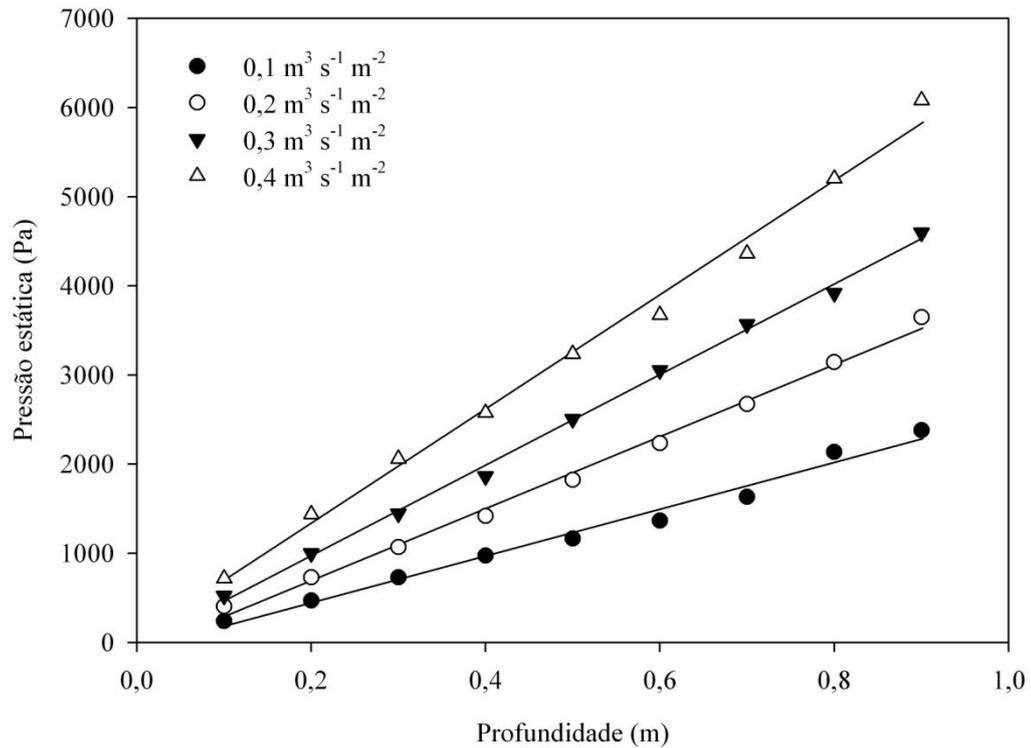


FIGURA 7 – Influencia da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa com 2% de impurezas.

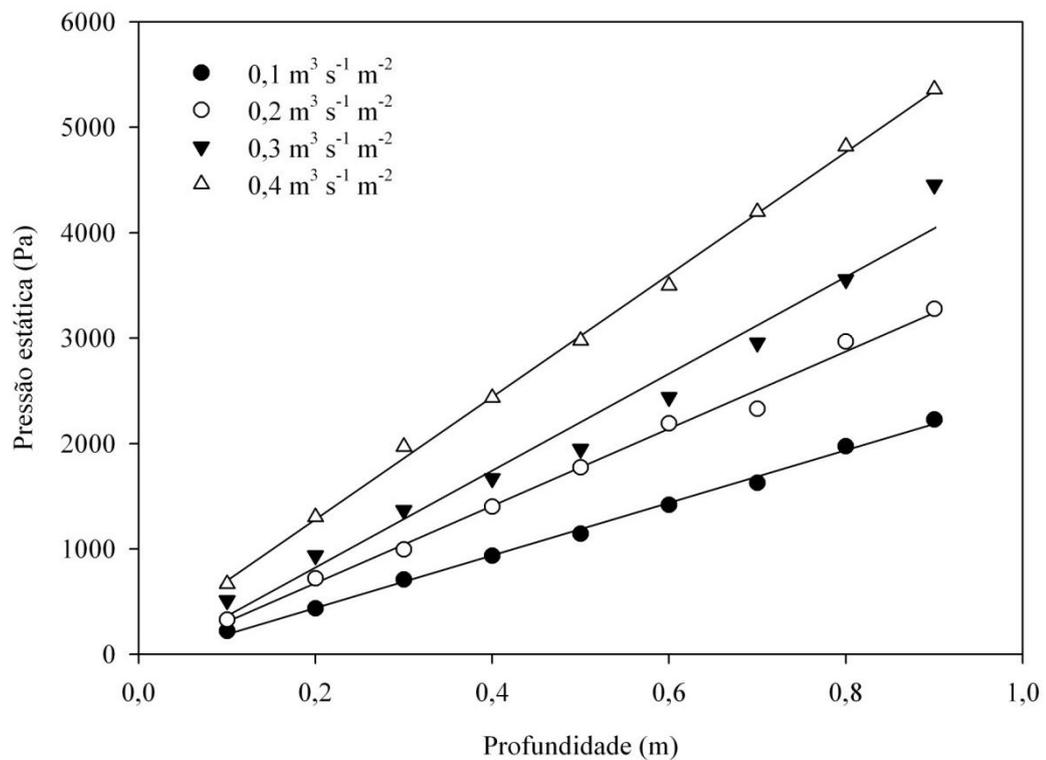


FIGURA 8 – Influencia da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa com 3% de impurezas.

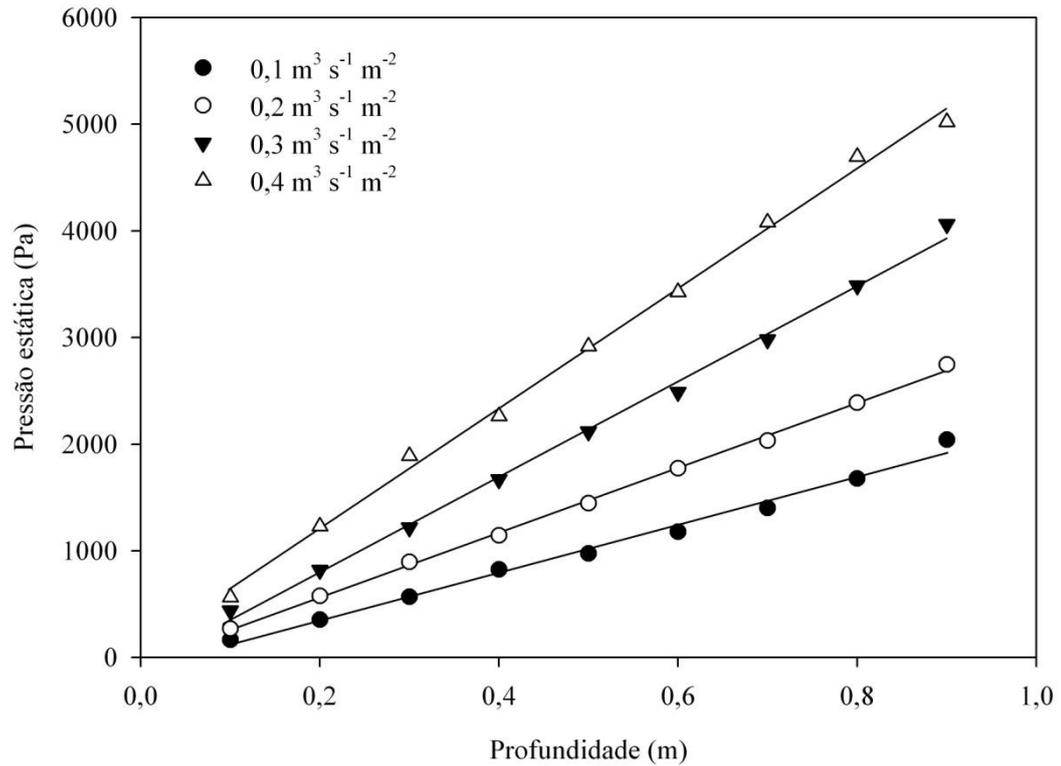


FIGURA 9 – Influencia da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa com 4% de impurezas.

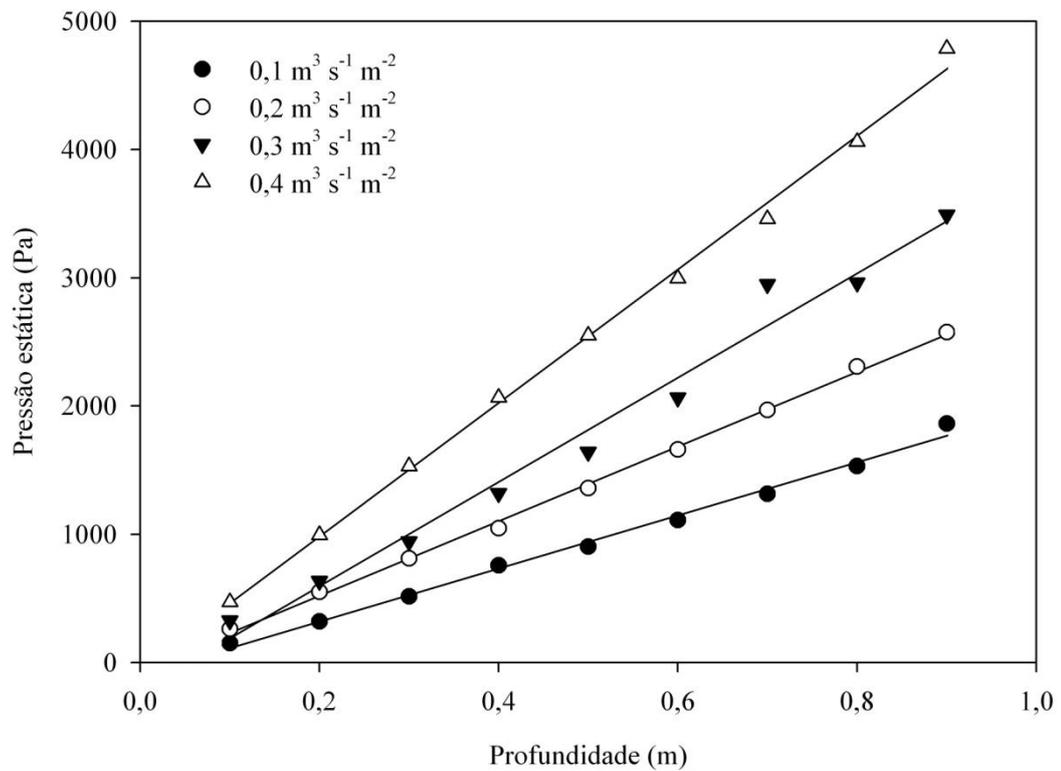


FIGURA 10 – Influencia da profundidade da camada de grãos e do fluxo de ar sobre a pressão estática em grãos de quinoa com 5% de impurezas.

Nas Figuras 6, 7, 8, 9 e 10 nota-se 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 a 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. A pressão estática na coluna de quinoa com fluxos de ar de 0,1 a 0,4 m³ s⁻¹ m⁻² 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 nas Figuras 5 a 10 foram encontrados por Masoumi e Tabil (2003), trabalhando com grão de bico, Salicik (2004) estudando sementes de papoula, Biaggioni et al. (2005) para noz macadâmia, Silva et al. (2006) café despulpado, Kashaninejad e Tabil (2009) para pistache e Kenghe et al. (2011) para chícáro (*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 (m³ s⁻¹ m⁻²) estão apresentados na Tabela 7, juntamente com seus respectivos valores de erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R²).

TABELA 7 – Parâmetros, dos modelos, estimados para grãos de quinoa isento de impurezas e seus respectivos valores de coeficiente de determinação (R²) e erro médio relativo (P).

Modelos	Parâmetros		R ² (%)	P (%)
	a	b		
Hukill e Ives	1,03E+06	5,32	94,95	10,86
Hunter	3,16E+04	-3,23E+04	99,56	2,84
Linear	1764,26	1,49E+04	99,18	4,33
Logaritmo	3221,59	1,04E+04	99,67	2,42
Shedd	1,37E+04	0,64	99,80	2,10

Os resultados do ajuste dos dados experimentais de perda de carga aos modelos testados mostram que todos os modelos apresentaram elevados valores do coeficiente de determinação, onde apenas Hukill e Ives apresentou valor inferior a 99%, além disso, esse modelo também apresenta o erro médio relativo maior que 10%. O modelo que melhor prediz

a perda de carga em uma coluna de quinoa é o modelo de Shedd, pois tem o maior coeficiente de determinação e menor erro médio relativo.

O modelo de Shedd já foi selecionado como melhor modelo para predição da perda de carga de diversos outros produtos como nozes, 9,4% b.s., (RAJABIPOUR et al., 2001); arroz em casca, 18,76% b.s., (NALLADURAI et al., 2002); grão de bico, 14,57% b.s., (MASOUMI e TABIL, 2003); sementes de papoula, 14,29% b.s., (SACILIK, 2004); e pistache, 18,52% b.s., (KASHANINEJAD e TABIL, 2009).

Na Tabela 8 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 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$).

TABELA 8 – Parâmetros, dos modelos, 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	-	99,57	3,81
	2	0,78	0,76	-	99,37	3,77
	3	0,61	0,74	-	98,51	5,53
	4	0,55	0,87	-	98,74	6,87
	5	0,44	0,79	-	97,95	6,66
Giner e Denisienia	1	-544,61	-1,65	-	81,91	24,73
	2	-205,30	-2,04	-	79,05	24,89
	3	-177,51	-1,45	-	76,94	24,44
	4	-83,33	-2,15	-	89,33	21,26
	5	-519,90	-0,24	-	82,76	23,35
Guimarães	1	16,77	1,19	146,42	99,90	1,31
	2	15,83	1,25	78,57	99,82	1,66
	3	17,27	1,53	62,61	99,56	2,99
	4	18,86	1,60	36,97	99,69	2,87
	5	16,92	1,74	31,13	99,35	3,90

Continua...

TABELA 8 – Continuação...

Modelos	Teor de Impureza (%)	Parâmetros			R ² (%)	P (%)
		a (x 10 ³)	b	c (x 10 ³)		
Haque	1	-921,76	-1,43E+04	944,91	99,00	5,90
	2	10,95	-1,47E+04	556,34	98,54	6,32
	3	10,09	-1,34E+04	339,41	97,25	8,28
	4	8,19	-4,86E+03	201,26	98,41	8,20
	5	7,68	-7,66E+03	150,40	97,03	8,99

Nota-se na Tabela 8 que houve um bom ajuste dos modelos com coeficiente de determinação maior que 97%, com exceção do modelo de Giner e Denisenia 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 de acima de 99%, erro médio relativo inferior a 10%.

O comportamento da pressão estática da massa granular de quinoa, com diferentes percentuais de impurezas e influenciada pelo fluxo de ar, está representado na Figura 11. 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 menor fluxo de ar. Nota-se, também, que o aumento no percentual de impurezas, dentro de um mesmo fluxo de ar, promoveu uma redução na resistência ao escoamento de ar pelo produto, aproximadamente 38%, provavelmente devido o aumento da porosidade da massa granular. Estes resultados corroboram os resultados encontrados por Corrêa et al. (2001a), estudando a influencia de impurezas grossas na perda de pressão estática de duas variedades de feijão e Gonelli (2008), para grãos de mamona com diferentes percentuais de impureza grossa.

A Figura 11 mostra ainda, uma acentuada influencia do fluxo de ar no aumento da resistência a passagem de ar na massa de grãos de quinoa e a redução dessa resistência à medida que há um acréscimo de impurezas nas amostras.

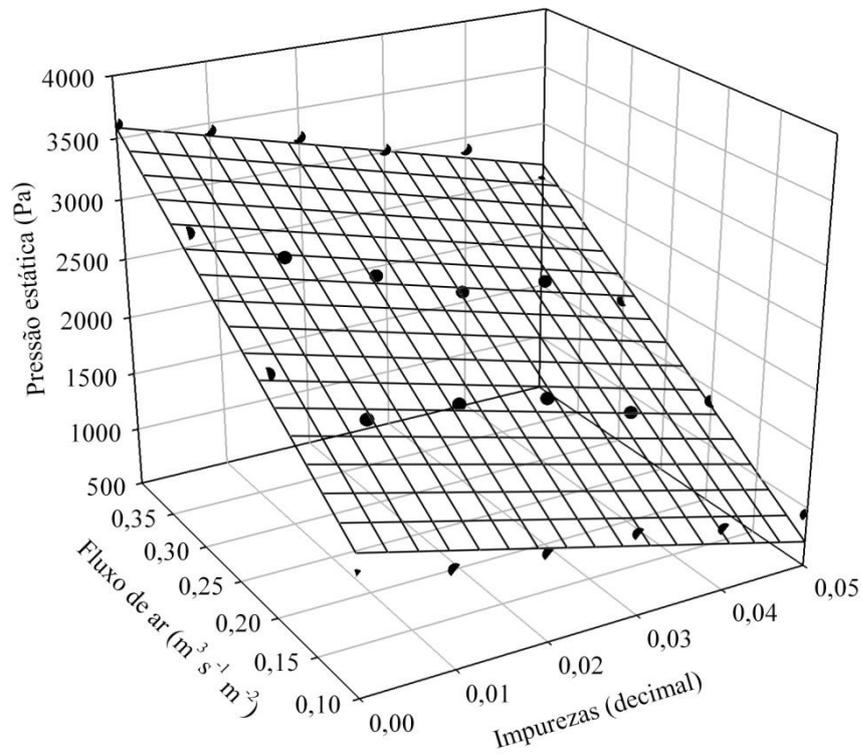


FIGURA 11 – Variação da pressão estática com o fluxo de ar em massas granulares de quinoa isenta de impurezas e com diferentes teores impurezas.

A Figura 12 mostra a perda de carga dos grãos de quinoa; soja, milho, linho, sorgo, canola (ASABE, 2007); grão de bico (MASOUMI e TABIL, 2003); gergelim (DAIRO e AJIBOLA, 1994) e trigo (GINER e DENISIENIA, 1996).

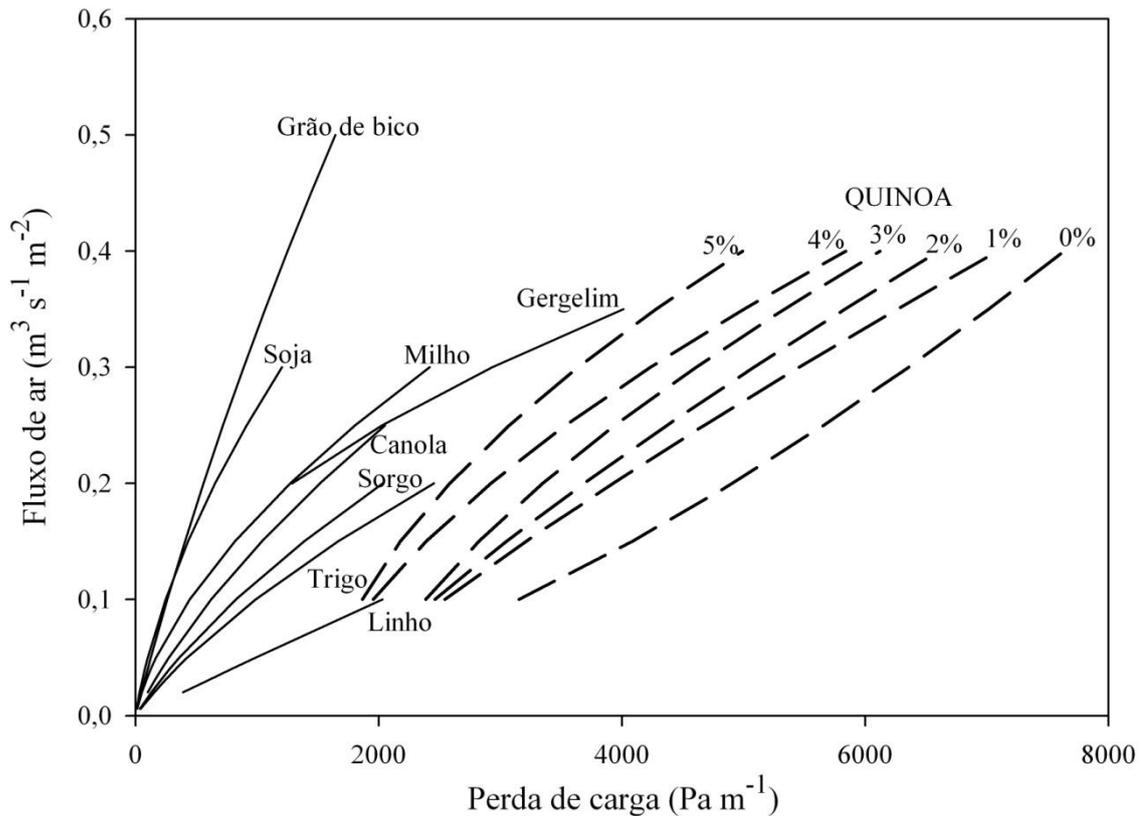


FIGURA 12 – Perda de carga (Pa m^{-1}) em função do fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$) para grãos de quinoa com diferentes teores de impurezas, comparados com de soja, milho, linho, sorgo, canola (ASABE, 2007), grão de bico (MASOUMI e TABIL, 2003), gergelim (DAIRO e AJIBOLA, 1994) e trigo (GINER e DENISIENIA, 1996).

Na Figura 12 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. Esse fenômeno, provavelmente, ocorre devido ao tamanho e forma dos grãos de quinoa. À medida que são acrescentados impurezas à massa de quinoa, a resistência à passagem de ar reduz, chegando próximo a resistência oferecida pelos demais produtos.

3.3. Análise por elementos finitos

Na Figura 13 é mostrado a discretização da coluna de grãos de quinoa, cultivar Real. Observa-se que a coluna de grãos foi discretizada em 1476 elementos do tipo FLUID142, com oito nós resultando em 1927 nós.

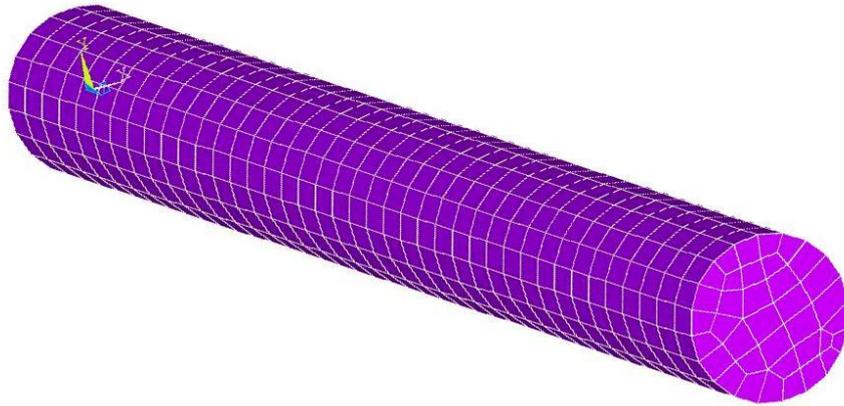


FIGURA 13 – Discretização da coluna de grãos de quinoa em 1476 elementos.

Na Figura 14 são mostrados os valores das resistências distribuídas (RD1) e os erros relativos (P1), representativos do leito de quinoa, para cada valor de fluxo de ar e percentual de impureza, provenientes do processo de otimização.

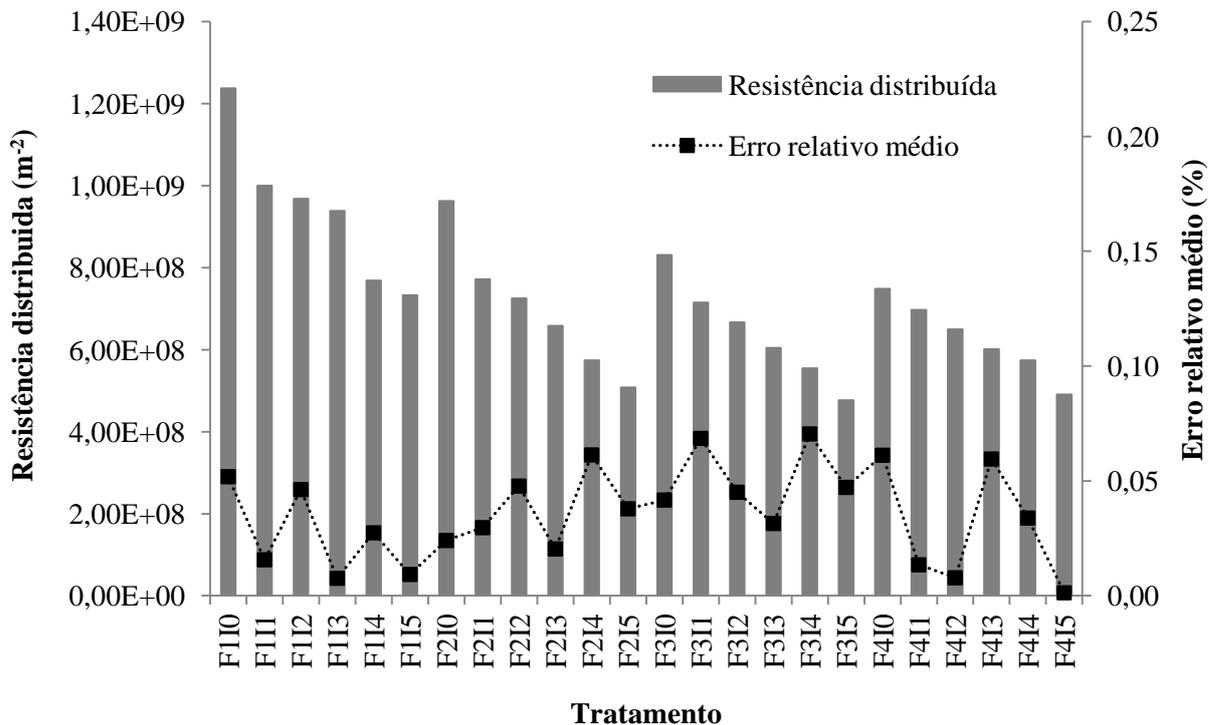


FIGURA 14 – Valores da resistência distribuída com seus respectivos erros da otimização, para a coluna de quinoa submetida a diferentes fluxos de ar e teores de impureza. F1, F2, F3 e F4, fluxos de ar, 0,1, 0,2, 0,3 e 0,4 m³ s⁻¹ m⁻², respectivamente; I0, I1, I2, I3, I4 e I5 teores de impureza, 0, 1, 2, 3, 4 e 5%, respectivamente;

Verifica-se que a resistência distribuída variou de $1,24 \times 10^9$ a $4,77 \times 10^8 \text{ m}^{-2}$, resultados superiores ao obtido por Andrade et al. (2001) para canola, que variaram de $1,86 \times 10^8$ a $3,29 \times 10^8 \text{ m}^{-2}$. Nota-se ainda que a medida que aumenta o fluxo, para um mesmo percentual de impurezas, a resistência distribuída reduz, tendência contrária ao observado por Andrade et al. (2001) onde, o aumento do fluxo de ar fez elevar a resistência distribuída na coluna de canola. Observa-se, ainda, que para um mesmo fluxo de ar o incremento dos teores de impureza na massa de quinoa reduz a resistência distribuída.

Nota-se, na Figura 12, que os valores dos erros relativos médio apresentam-se muito baixos, sendo seu maior valor de 0,07%. Segundo Barros et al. (1995) erro médio relativo abaixo de 10% é satisfatório para prever com precisão fenômenos de engenharia. Os erros médios variaram de 0,001 a 0,07% e mostram que a técnica de elementos finitos é eficaz para modelar o escoamento de ar em leito de grãos de quinoa.

A Tabela 9 apresenta o modelo ajustado para estimar a resistência distribuída em uma coluna com quinoa, submetida a fluxos de ar de 0,1 a $0,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ e com percentuais de impurezas variando de 0 a 5%. O modelo se ajustou bem apresentando R^2 de 97% e erro médio relativo de 5,12%.

TABELA 9 – Modelos para estimar a resistência distribuída, em uma coluna de quinoa, em função do fluxo de ar e do teor de impurezas e seus respectivos valores de coeficiente de determinação (R^2) e erro médio relativo (P).

Modelo	R^2 (%)	P (%)
$RD=3,8 \times 10^9 Q - 9,6 \times 10^9 I + 5,7 \times 10^9 Q^2 + 4,7 \times 10^{10} I^2 + 1,4 \times 10^9$	97,11	5,12

Na Figura 15 está apresentada a variação da resistência distribuída com o fluxo de ar de 0,1 a $0,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ e o percentual de impurezas no percentual de 0, 1, 2, 3, 4 e 5%, obtida com a equação apresentada na Tabela 9. Nota-se que a resistência distribuída reduz tanto com o aumento do fluxo de ar quanto com o acréscimo de impurezas na massa de quinoa.

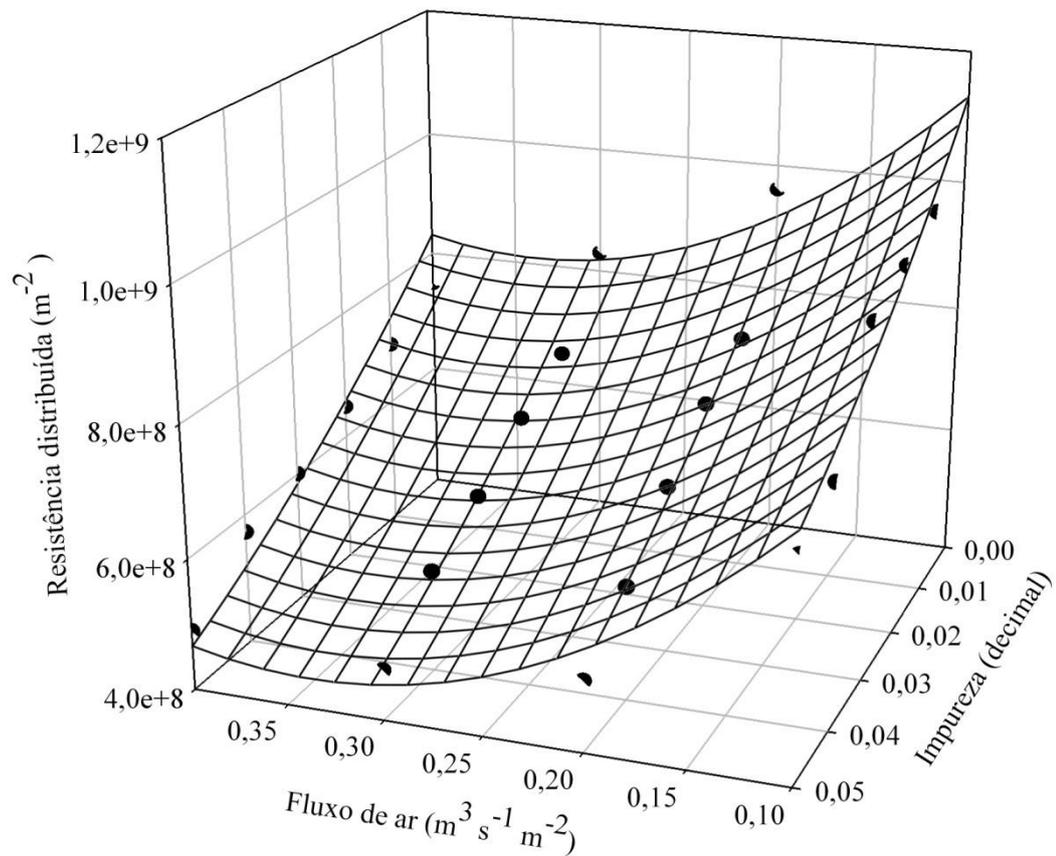


FIGURA 15 – Variação da resistência distribuída com o fluxo de ar e o percentual de impurezas no percentual de 0, 1, 2, 3, 4 e 5% (valores observados e preditos pelo modelo: $RD=aQ+bI+cQ^2+dI^2+e$)

CONCLUSÃO

Nas condições em que foi realizado esse trabalho e com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O aumento do nível de impureza de 0 até 5% provocou redução da queda de pressão estática;
- A queda de pressão estática é mais influenciada pelo aumento do fluxo de ar do que pelo aumento do teor de impurezas;
- 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 m³ s⁻¹ m⁻²;
- A equação 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;
- A resistência distribuída, em uma coluna com quinoa com diferentes percentuais de impureza e fluxos de ar, variou de 1,24x10⁹ a 4,77x10⁸ m⁻²;
- A resistência distribuída, em uma coluna com quinoa, reduz com o incremento no fluxo de ar e com o aumento do teor de impureza;
- A técnica de elementos finitos é eficaz para modelar o escoamento de ar em leito com grãos de quinoa, com diferentes percentuais de impureza e fluxos de ar, resultando em erros relativos na faixa de 0,001 à 0,07%;
- A equação que estima a resistência distribuída dos grãos de quinoa com diferentes teores de água e fluxos de ar é $RD=3,8 \times 10^9 Q - 9,6 \times 10^9 I + 5,7 \times 10^9 Q^2 + 4,7 \times 10^{10} I^2 + 1,4 \times 10^9$.

REFERÊNCIAS

- ABOU-EL-HANA, N.H.; YOUNIS, M.A. Pressure drop through shelled corn as affected by airflow rates, moisture content and air temperature. **Misr Journal Agricultural Engineering**, v. 25, n. 3, p. 944-956, 2008.
- AFONSO, A.D.L. **Gradiente de pressão estática em camadas de frutos de café (*Coffea arábica* L.) com diferentes teores de umidade**. 1994. 68p. Dissertação (Mestrado em Eng. Agrícola) – UFV.
- AGULLO, J.O.; MARENIA, M.O. Airflow resistance of parchment arabica coffee. **Biosystems Engineering**, v. 91, n. 2, p. 149–156, 2005.
- ALAGUSUNDARAM, K.; JAYAS, D.S. Airflow resistance of grains and oilseeds. **Postharvest News and Information**, v. 1, n. 4, p.279-283, 1990.
- ALAGUSUNDARAM, K.; JAYAS, D.S.; FRIESEN, O.H.; WHITE, N.D.G. Airflow patterns through wheat, barley, and canola in bins with partially perforated floors – Na experimental investigation. **Applied Engineering in Agricultural**, St. Joseph, v. 10, n. 6, p. 791-796, 1994.
- ALVES, L.F.; ROCHA, S.M.; GOMES, C.C.F. Avaliação da qualidade protéica da quinoa real (*Chenopodium quinoa* Willd.) através de métodos biológicos. **E-scientia**, v. 1, n. 1, 16 p., 2008.
- AL-YAHYA, S.A.; MOGHAZI, H. Static pressure drop through barley grain. **Canadian Agricultural Engineering**. v. 40, n. 2, p. 213-217, 1998.
- ANDRADE, E.T.; COUTO, S.M.; QUEIROZ, D.M. Distribuição da pressão estática em uma coluna de canola: análise por elementos finitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 5, n. 2, p. 288-295, 2001.
- ANSYS. **Ansys/Multiphysics Product (Program and Program Documentation)**, Realease 5.3, ANSYS Inc, Houston. 2001.
- 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**, p. 526-633, 2007.
- ASCHERI, J.L.; SPEHAR, C.R.; NASCIMENTO, N.E. Caracterización química comparativa de harinas instantaneas por extrusión de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), maíz y arroz. **Alimentaria**, v. 39, n. 331, p. 82-89, 2002.
- BARROS, B.N.; SCARMÍNIO, I.S.; BRUNS, R.E. 1995. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas. Editora da UNICAMP, p. 229.
- BEJAN, A. **Convection heat transfer**. Durhan: Wiley Interscience, 1984. 477p.
- BIAGGIONI, M.A.M.; PIZA, P.L.B.T.; FERREIRA, W.A. Queda de pressão estática por meio de uma couna de noz de macadâmia. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 499-507, 2005.

BONIFÁCIO, A. **Aspectos agrícolas y de mejoramiento de la quinoa en Bolivia**. In: Memórias primer Taller Internacional em Quinoa recursos geneticos y sistemas de producció. Proyecto quinoa CIP-DANIDA, Lima Peru, 1999.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399 p.

BROOKER, D.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York : Van Nostrand Reinhold, 1992. 450 p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. **Drying cereal grains**. Westport: CT, The AVI Publishing Company, Inc., 1974. 265p.

CAPERUTO, L.C.; AMAYA-FARFAN, J.; CAMARGO, C.R.O. Performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) flour in the manufacture of gluten-free spaghetti, **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 81, n. 1, p. 95-101, 2001.

CHEEKE, P.R. Actual and potential applications of *Yucca schlidigera* and *Quillaja saponaria* saponins in human and animal nutrition. In: SIMPÓSIO SOBRE INGREDIENTES NA ALIMENTAÇÃO ANIMAL, 2. 2002, Uberlândia. **Anais...** Campinas, SP: Colégio Brasileiro de Nutrição Animal, 2002. p.127-131.

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, 2001b.

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, n. 1, p. 53-59, 2001a.

DAIRO, O.U.; AJIBOLA, O.O. Resistance to airflow of bulk sesame seed. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 58, n. 2, 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, n. 2, p. 256-262, 2005.

DOMINGUEZ, S.S. Quinoa - Postharvest and Commercialization, **Food Reviews International**, v. 19, n. 1 e 2, p. 191–201, 2003.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, v.48, p.89-94, 1952.

FAO - **La ONU declara al 2013 Año Internacional de la Quinoa**. Disponível em: <http://www.fao.org/agronoticias/agro-noticias/detalle/es/?dyna_fef%5Buid%5D=119288> acesso em: 10 de abril de 2012.

FAO/RLAC. **Prueba americana y europea de quinoa: Libro de campo**. Puno, Perú, CIP. 1998. 41 p.

FARMER, G.S.; BRUSEWITZ, G.H.; WHITNEY, R.W. Resistance to air flow of bluestem grass seed. **American Society of Agricultural Engineers**, n. 79-3538, 17p., 1979

FARRO, P.C.A. **Desenvolvimento de filmes biodegradáveis a partir de derivados do grão de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willdenow) variedade “Real”**. 2008, 320 p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

FERGUSON, W.J. A control volume finite element numerical simulation of the high temperature drying of spruce. **Drying Technology**, New York, v. 3, n. 3, p. 607-634, 1995.

GINER, S.A.; DENISIENIA, E. Pressure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines. **Journal Agricultural Engineering Research**, Silsoe, n. 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**. 2008, 199p. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

GONG, Z.X.; MUJUMDAR, A.S. A two-dimensional finite element model for kiln-drying of refractory concrete. **Drying Technology**, New York, v. 3, n. 3, p. 585-605, 1995.

GRAMA, S.N.; BERN, C.J.; HURBURGH, C.R. Airflow resistance of mixtures of shelled corn and fines. **American Society of Agricultural Engineers**, TRANSACTIONS of the ASAE, v. 27, p. 268-272, 1984.

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, 1998. 47p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

GUNASEKARAN, S.; JACKSON, C. Y. Resistance to airflow of grain sorghum **American Society of Agricultural Engineers**, TRANSACTIONS of the ASAE , v. 31, p. 1237–1240, 1988

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, n. 4, 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, n. 5, p. 997-1000, 1978.

HIRNING, H.; EICHHORST, W. Resistance to airflow, **Safe and efficient use of electricity, Electric Power**, EPQ #112, 1987. 4p.

HUKILL, W.V.; SHEDD, C.K. Nonlinear airflow in grain drying. **Agricultural Engineering**, v. 36, p. 462-466, 1955.

HUNTER. AJ. 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.

JAYAS, D.S. **Resistance of bulk canola oilseed to airflow**. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1987. 203p. Tese (Doutorado).

- 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, n. 1, p. 87-99, 2011.
- KHATCHATOURIAN, O.A.; BINELO, M.O. Simulation of three-dimensional airflow in grain storage bins. **Biosystems Engineering**, v. 101, p. 225–238, 2008.
- KHATCHATOURIAN, O.A.; SAVICKI, D.L. Mathematical modelling of airflow in an aerated soya bean store under non-uniform conditions. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 2, p. 201–211, 2004.
- LAI, F.S. Three-dimensional flow of air through non uniform grain beds. **American Society of Agricultural Engineers**, TRANSACTIONS of the ASAE , St. Joseph, v. 23, n. 2, p. 729-734, 1980.
- LOEWER, O.J.; BRIDGES, T.C.; BUCKLIN, R.A. **On-Farm drying and storage systems**. American Society of Agricultural Engineers, 1994. 560p.
- MARCHANT, J.A. The prediction of airflows in crop drying systems by the finite element method. **Journal Agricultural Engineering**, v. 21, p. 417-429, 1976.
- 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- 325, 2003. 14 p.
- MIKETINAC, M.J.; SOKHANSANJ, S.; JAYAS, D.S. Graphical analysis of airflow distribution in grain bins using the finite element method. **Canadian Agricultural Engineering**, Saskatoon, v. 28, n. 1, p. 23-30, 1986.
- MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1978. 841p.
- MONTAÑO, E.A.R.; TORRES, D.P.Á.; PULIDO, J.O.G. Componente nutricional de diferentes variedades de quinua de la región andina. **Avances - Investigación en Ingeniería**. n. 5, p. 86-97, 2006.
- MUJICA, A. **Cultivo de quinua**. Instituto Nacional de Investigación Agraria, INIA. Dirección General de Investigación Agraria. Serie Manual RI, n. 1-97. Lima, Perú.130 p. 1997.
- MUJICA, A.; JACOBSEN, S. **La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y sus parientes silvestres. Botánica Económica de los Andes Centrales**. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, p. 449-457, 2006.
- MUJICA, A.; ORTIZ, R.; CANAHUA, A.; ROSELL, J.; PONCE, R. **Cultivo de quinua**. Proyecto quinua, Peru – Bolivia – Colômbia, 2003, 23p.

MUJICA, A; JACOBSEN, S.E; IZQUIERDO, JI; MARATHEÉ, JP. **Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro**. CD-Rom: Cultivos Andinos Version 1.0. FAO, Santiago Chile. (2001).

NALLADURAI, K.; ALAGUSUNDARAM, K.; GAYATHRI, P. Airflow resistance of paddy and its byproducts. **Biosystems Engineering**, v. 83, n. 1, p. 67–75, 2002.

NAVARRO, S.; NOYES, R.T. **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. New York: CRC Press, 2002. 647p.

NIETO, C.; VALDIVIA, R. **Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) - Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. CAPITULO IX. POSTCOSECHA, TRANSFORMACIÓN Y AGROINDUSTRIA**. In: MUJICA, A; JACOBSEN, S.E; IZQUIERDO, JI; MARATHEÉ, JP. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. CD-Rom: Cultivos Andinos Version 1.0. FAO, Santiago Chile, 2001.

NIETO, C.; VIMOS, C. **La quinua, cosecha y poscosecha. Algunas experiencias en Ecuador**. INIAP, Quito, Ecuador. (Boletín divulgativo 224), 43 p., 1992.

NUNES, D.M.C. **Propriedades físicas, térmicas e aerodinâmicas de grãos de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd)**. 2008, 62p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Goiás, Anápolis-GO.

PAGANO, A.M.; CROZZA, D.E.; NOLASCO, S.M. Efecto de la presencia de material extraño y de la dirección de flujo de aire sobre la resistencia al flujo de aire en lechos de soja. **Información Tecnológica**, v. 6, p. 139–144, 1995.

PAGANO, A.M.; CROZZA, D.E.; NOLASCO, S.M. Pressure drop through in-bulk flax seeds. **AOCS**, v. 75, n. 12, p. 1741-1747, 1998.

PÁSKO, P.; BARTÓN, H.; ZAGRODZKI, P.; GORINSTEIN, S.; FOŁTA M.; ZACHWIEJA, Z. Anthocyanins, total polyphenols and antioxidant activity in amaranth and quinoa seeds and sprouts during their growth. **Food Chemistry**, n. 115, p. 994–998, 2009.

PATTERSON, R.J.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; BIKERT, T.G. Static pressure air flow relationships in packed beds of granular biological materials such as grains. **American Society of Agricultural Engineers, TRANSACTIONS of the ASAE**, v. 14, p. 172-174, 1971.

RAJABIPOUR, A.; SHAHBAZI, F.; MOHTASEBI, S.; TABATABAEEFAR, A. Airflow Resistance in Walnuts. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 3, p. 257-264, 2001.

REPO-CARRASCO-VALENCIA, R.A.; SERNA, L.A. Quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd.) as a source of dietary fiber and other functional components. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, n. 31, v. 1, p. 225-230, 2011.

RESTREPO, L.A.M.; VIANCHÁ, L.M.; BALLESTEROS, J.P. Analisis de variables estratégicas para la conformación de una cadena productiva de quinua en Colombia. **INNOVA – Gestión de producción e tecnología**, p. 103-119, 2005.

ROCHA, J.E.S. **Controle de caracteres agronômicos em quinoa (*Chenopodium quinoa* Willdenow)**. Brasília, 2011. 164p. Tese (Doutorado), Universidade de Brasília, Brasília-DF.

ROCHA, J.E.S. **Seleção de genótipos de quinoa com características agronômicas e estabilidade de rendimento no planalto central**. 2008, 127p. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília-DF.

ROJANO, A.; RAMIREZ, A.; FITZ, E.; OJEDA, W. Temperature distribution in a greenhouse due to shape factor, **American Society of Agricultural Engineers**, n. 98-415610, 10 p., 1998.

RUIZ, W.A. **Estudo cromatográfico das saponinas da quinua (*Chenopodium quinoa* Willd., variedade Kancolla)**. Campinas, UNICAMP. 1979. 135 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) FEA/UNICAMP.

SACILIK, K. Resistance of bulk poppy seeds to airflow. **Biosystems Engineering**, v. 89, n. 4, p. 435–443, 2004.

SALAS, S. **La quinua poscosecha y comercialización**. In: Jacobsen, S.-E. and Z. Portillo (eds.). Memorias, Primer Taller Internacional sobre Quinoa – Recursos Genéticos y Sistemas de Producción, 10–14 May 1999, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru. CD-Rom available from CIP, Lima, Peru.

SCHLICK, G.; BUBENHEIM, D.L. **Quinoa: candidate crop for NASA's controlled ecological life support systems**. In: J. Janick (ed.), Progress in new crops. ASHS Press, Arlington, VA. p. 632-640, 1996.

SEGERLIND, L.J. **Applied finite element analysis**. New York: John Wiley, 1984. 427p.

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.

SHEDD, CK. Resistance of seeds and grains to airflow. **Agricultural Engineering**, v. 34, n. 9, p. 616-619, 1953.

SIEBENMORGEN, T.J.; JINDAL, V.K. Airflow resistance of rough rice as affected by moisture content, fines concentration and bulk density. **American Society of Agricultural Engineers**, TRANSACTIONS of the ASAE, v. 30, n. 4, p. 1138-1143, 1987.

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, n. 1, p. 168–174, 2006.

SILVA, L.O.N. **Efeito da taxa de fluxo de ar, do teor e do tipo de impureza na perda de carga numa camada de grãos de arroz (*Oryza sativa*, L.) com casca**. Viçosa, MG. 1988.52p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa.

SOKHANSANJ, S.; FALACINSKI, A.A.; SOSULSKI, F.W.; JAYAS, D.S.; TANG, J. Resistance of bulk lentils to airflow. **American Society of Agricultural Engineers, TRANSACTIONS of the ASAE**, v.33, n. 4, p. 1281-1285, 1990.

SOROUR, H.M. A study on pressure drop through bulk of sunflower. **Misr Journal Agricultural Engineering**, v. 23, n. 2, p. 422 – 433, 2006.

SOTO, J.L.; ROJAS, W.E.; PINTO, M. Cultivando e Comercializando grãos andinos. **Agriculturas**, v. 1, n. 1, p. 34-36, 2004.

SOUZA, L.A.C.; SPEHAR, C.R.; SANTOS, R.L.B. Análise de imagem para determinação do teor de saponina em quinoa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 4, p. 397-401, 2004.

SPEHAR, C.R. Adaptação da quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) para incrementar a diversidade agrícola e alimentar no Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília-DF, v. 23, n. 1, p. 41-62, 2006.

SPEHAR, C.R. **Piaburu: a quinoa brasileira que chegou para diversificar a safrinha**. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 3 p., 2001.

SPEHAR, C.R.; CARVALHO, W. P.; VELOSO, R F. **Cultivo comercial**. In: SPEHAR, C. R. Quinoa: alternativa para a diversificação agrícola e alimentar. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 2007, p. 83-89.

SPEHAR, C.R.; ROCHA, J.E.S.; SANTOS, R.L.B. Desempenho agrônômico e recomendações para cultivo de quinoa (BRS Syetetuba) no cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 145-147, 2011.

SPEHAR, C.R.; SANTOS, R.L.B. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) BRS Piaburu: alternativa para diversificar os sistemas de produção de grãos. **Pesquisas Agropecuárias Brasileiras**, Brasília-DF, v. 37, n. 6, p. 889-893, 2002.

SPEHAR, C.R.; SANTOS, R.L.B. **Quinoa: alternativa para a diversificação agrícola e alimentar**. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2007. 103p.

SPEHAR, C.R.; SOUZA, P.I.M. Adaptação da quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) ao cultivo nos cerrados do Planalto Central: resultados preliminares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 28, n. 5, p. 635-639, 1993.

TABAK, S.; ASKAROV, B.; RASHIDOV, U.; TABAK, I.; MANOR, G.; SHMULEVICH, I. Airflow through granular beds packed with cottonseeds. **Biosystems Engineering**, v. 88, n.2, p. 163-173, 2004.

TAPIA, M. **Cultivos Andinos Subexplotados y su aporte a la alimentación**. 2. ed. Santiago: FAO - Oficina Regional para América Latina y el Caribe, 1997. 273p.

TAPIA, M., ARONI, G. **Tecnología del cultivo orgánico de la quinua**. In: MUJICA, A; JACOBSEN, S.E; IZQUIERDO, JI; MARATHEÉ, JP. Quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. CD-Rom: Cultivos Andinos Version 1.0. FAO, Santiago Chile. (2001)

TEJADA CAMPOS, T. **El cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willdenow)**. Série: Manual Técnico. 1ª Edição, Suporte Técnico: Estação Experimental Baños del Inca – INIA Cajamarca, 2004. 57p.

VALDIVIA, R.; PAREDES, S.; ZEGARRA, A.; CHOQUEHUANCA, V.; REINOSO, R. **Manual del productor de quinua**, Centro de Investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Editorial Altiplano, Puno, Perú. 1997. 158p.

VASCONCELOS, L.H. **Determinação das propriedades físicas da canola (*Brassica napus*), variedade Iciola 41, relacionadas à armazenagem**. Campinas, SP, 1998, 113p. Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, Dissertação de Mestrado.

VILCHE, C.; GELY, M.; SANTALLA, E. Physical properties of quinoa seeds. **Biosystems Engineering**. v. 86, n.1, p. 59-65, 2003.

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, n. 6, p. 1966-1970, 1990.