

Análise da Pressão de Ar em Armazéns Graneleiros através de Simulação Tridimensional do Fluxo de Ar

Vanessa Faoro, Oleg Khatchatourian, Manuel O. Binelo, Rodolfo F. de Lima

Depto de Ciências Exatas e Engenharias, UNIJUI, Rua São Francisco 501 98700-000, Ijuí, RS, Brasil.

E-mail: vaneffaoro@yahoo.com.br

olegkha@unijui.edu.br

manuel.binelo@gmail.com

rodolfofrancadelima@hotmail.com

Resumo: O trabalho proposto apresenta uma primeira etapa de pesquisas relacionadas com otimização de funcionamento de armazéns graneleiros. Nesta etapa um modelo matemático e software foram empregados para a simulação 3D do fluxo de ar em armazéns graneleiros, considerando a não-uniformidade e anisotropia da massa das sementes. Com a simulação foi possível analisar a eficiência de um sistema real de aeração em todos os pontos da massa de grãos para um armazém. A avaliação para o desempenho abrangeu uma análise de distribuição da vazão específica local dentro de armazém com aeração central e lateral. Para validar os resultados obtidos (segunda etapa de pesquisa) atualmente estão sendo realizadas as medições de pressão estática em vários pontos do sistema real. Realizando as comparações entre os dados simulados e experimentais e aplicando os métodos de problemas inversos pode ser feita uma validação do modelo matemático e o software pode ser aplicado para otimizar o desempenho de armazéns reduzindo os custos da engenharia de novos depósitos de grãos.

1 Introdução

Atualmente o Brasil é um país que se destaca na agricultura, devido aos investimentos realizados em pesquisas e tecnologia na produção agrícola conforme [1]. Com o avanço tecnológico na área agrícola, a produção rural vem se tornando um assunto de interesse em diversas comunidades, onde estudos vêm buscando encontrar melhorias na produção e no armazenamento de grãos.

A produção de grãos é armazenada em grandes armazéns verticais ou horizontais, de variados tamanhos, os quais são responsáveis em manter a qualidade do grão por determinado tempo, sendo que o principal processo empregado é a aeração. O método de aeração é utilizado para modificar o microclima da massa de grãos, propiciando condições desfavoráveis ao crescimento de organismos prejudiciais ao grão. A resistência do fluxo de ar num sistema de aeração depende dos parâmetros do fluxo de ar, sobre as características da superfície do produto, a forma e o tamanho de qualquer impureza estranha na massa do grão, do tamanho e da quantidade de grãos quebrados, e sobre a profundidade do grão. A pesquisa realizada por [2], [6] e [7], examinaram a influência de alguns desses parâmetros no fluxo de ar no armazenamento das sementes. [4] pesquisaram a compactação do grão e do padrão de fluxo de ar sob condições não homogêneas. Como [3] e [5] demonstraram que existe uma forte anisotropia de resistência ao fluxo de ar através da massa de grãos.

Desta forma, para que o sistema de aeração seja eficiente, o processo da aeração deve ser controlado para que ocorra a uniformidade do fluxo de ar em todas as regiões do silo ou armazém. Considerando que, há regiões onde não ocorre esta uniformidade do fluxo de ar, procura-se compensar com o aumento da vazão total, provocando o aumento do consumo de energia, tornando o sistema mais economicamente custoso. Além disso, falhas no sistema de aeração podem causar secagem excessiva em uma parte da massa de grãos e aeração ineficiente em outros domínios.

A otimização do sistema de aeração é muito importante, o referente artigo é resultado de uma pesquisa, em andamento, que tem como objetivo: (a) contribuição da implementação de um modelo matemático capaz de fazer a simulação tridimensional da distribuição do fluxo de ar em armazéns, visando uma melhora na parte econômica e qualitativa, (b) a realização de

simulações numéricas em armazéns de grãos com aeração para detectar áreas de risco operacional, com dados de um sistema real.

2 Modelagem Matemática

Khatchatourian e Savicki [6] propuseram a fórmula que descreve o fluxo de ar em meio particulado, para as três condições do fluxo, consistindo em um sistema de duas equações:

$$\text{div } \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = -\frac{\text{grad}P}{|\text{grad}P|} \exp\left(\frac{[\ln(1+U^2) - 2U \arctan(U)]/\pi + 3U}{4a + C}\right) \quad (2)$$

onde \mathbf{V} é o vetor velocidade; $\text{grad}P$ é o gradiente de Pressão; $U(P)=a \ln(|\text{grad}P|)+b$ é um argumento intermediário; $a>0$ e b são constantes; a e b precisam ser definidos experimentalmente; C é a constante de integração.

A equação expressa que o vetor velocidade e o gradiente de pressão são colineares em todos os pontos do domínio do fluxo de ar e que a razão dos módulos desses vetores é função do gradiente de pressão.

A proporcionalidade é expressa pelo coeficiente k por:

$$k = \exp\left(\frac{[\ln(1+U^2) - 2U \arctan(U)]/\pi + 3U}{4a + C}\right) / |\text{grad}P| \quad (3)$$

Para um meio isotrópico não homogêneo $K = K(x, y, z)$ é escalar. Empregando a equação (2), as componentes da velocidade u , v e w para o caso tridimensional podem ser expressas na forma:

$$u = -k_x \frac{\partial P}{\partial x}; v = -k_y \frac{\partial P}{\partial y}; w = -k_z \frac{\partial P}{\partial z} \quad (4)$$

onde a coordenada y em metros corresponde à direção vertical e as coordenadas x e z estão localizadas no plano correspondente ao fundo do silo.

Substituindo a equação (4) na equação (1), a equação diferencial parcial não linear tridimensional é obtida:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-k_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-k_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-k_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

Portanto a distribuição de pressão e velocidade do fluxo do ar no estado permanente em um domínio tridimensional da massa de grão é descritos pelas equações (3), (4) e (5) juntamente com as condições de contorno Dirichlet e Neumann.

A vazão específica do ar serve para avaliar a eficiência do sistema de aeração em armazéns graneleiros, com diferente distribuição de ar e será utilizado o critério criado por [4] chamado de vazão específica local, definido por:

$$q(X) = \frac{W(X)}{\rho(X)L_x} \quad (6)$$

onde $q(X)$ é a vazão de ar específica local no ponto $X(x, y, z)$ em $\text{m}^3\text{s}^{-1} \text{kg}^{-1}$; $W(X)$ é a velocidade do ar no ponto X em ms^{-1} ; $\rho(X)$ é a densidade da massa de grãos no ponto X em $\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$; L_x é o comprimento total em m da trajetória de ar que passa pelo ponto X .

O método consiste na velocidade de ar em cada ponto, dividido pela densidade do produto nesse mesmo ponto e pela trajetória do ar até o momento. A vazão específica local, permite avaliar a qualidade da aeração em qualquer ponto do produto.

3 Descrição do Software

A equação (5) foi resolvida pelo Método dos Elementos Finitos utilizando um processo iterativo para calcular o coeficiente de permeabilidade k_x , k_y , k_z , em cada ponto do domínio de integração e utilizando a distribuição da pressão. O software utilizado para as simulações foi desenvolvido em C++, conforme [4]. Os dados da malha da geometria do armazém foram

obtidos através do programa TetGen (<http://wias-berlin.de/software/tetgen/>). O Tetgen, disponível sob licença GPL, gera malhas tetraédricas com qualidade, usando algoritmos Delaunay com refinamento adaptativo dinâmico da malha. A exportação dos dados é dada em formato VTK, aceito como campo de entrada no Paraview usado na visualização da geometria.

Os arquivos de entrada para o software, gerado pelo Tetgen descrevem informações referente a nós, faces e elementos tetraédricos, e gera um arquivo que descreve as condições de contorno e os requisitos de precisão de saída. Utilizando a informação da matriz local, o sistema de matriz global é gerado. O método Sucessive Over-Relaxation (SOR) foi utilizado para resolver o sistema de equações algébricas lineares.

Para validar o modelo matemático proposto, as relações da pressão estática foram obtidas em diferentes profundidades de armazenamento de grãos. Os coeficientes apresentados no modelo matemático foram obtidos experimentalmente para a soja. Todavia, o modelo matemático pode ser adequado para vários tipos de grãos como milho, arroz e grãos de trigo.

4 Estudo Experimental

O procedimento metodológico adotado nesta pesquisa para realizar simulações do fluxo de ar em armazéns graneleiros em um sistema real e ter melhor precisão de um resultado real é de natureza qualitativa e quantitativa. A coleta de informações (Tabela 1) foi realizada na cooperativa Tritícola de Santa Rosa (Cotrirosa), de acordo com as dimensões da massa de grão armazenada, sistema de aeração, informações sobre a quantidade de entradas de ar para a aeração, sendo subsídio importante para a realização da simulação. Dependendo do controle, falhas no sistema de aeração podem causar secagem excessiva em uma parte da massa de grãos e aeração ineficiente em outros domínios.

Dados da Cooperativa	
Tipo do grão	Soja
Tipo de armazém	Abaixo do solo, em formato V
Volume de grãos	30 000 000 kg
Quantidade de entradas de aeração central	4 registros abertos
Quantidade de motores para entradas de aeração central	4 motores de 60 CV/1730 RPM
Quantidade de entradas de aeração lateral	3 registros abertos
Quantidade de motores para entradas de aeração lateral	1 motor de 60 CV/1730 RPM
Pressão da entrada do ar central	1140 Pa
Pressão da entrada do ar lateral	500 Pa

Tabela 1: Coleta de dados da cooperativa Cotrirosa.

O sistema de aeração da cooperativa consiste em um conjunto de ventiladores instalados em túneis nas extremidades de dentro do armazém, fornecendo uma corrente de ar, proporcionando trocas de ar suficientes para conforto e segurança dos operadores. Os ventiladores também são instalados no telhado do armazém com a finalidade de remover o ar carregado de umidade, que se acomoda entre a massa de grão e o telhado, reduzindo a temperatura nas camadas superiores dos grãos (Figura 1, A).

Os armazéns horizontais apresentam projetos mais complexos de aeração, divididos em dutos centrais e laterais. O armazém investigado possui dutos centrais, onde acontece a maior vazão de ar e maior pressão na entrada de ar. O ar atravessa um túnel (Figura 1, B) pela parte central inferior do armazém. As entradas de ar no fundo do armazém fazem com que o ar atravesse a massa de grãos saindo pela parte superior. Porém, o ar do duto central não consegue atingir as áreas laterais do armazém, por isso, na maioria dos casos, é coerente adicionar ventiladores e dutos de ar nas laterais do armazém, sendo chamada de aeração lateral, como mostra a Figura 1, B, que representa a aeração lateral da cooperativa.

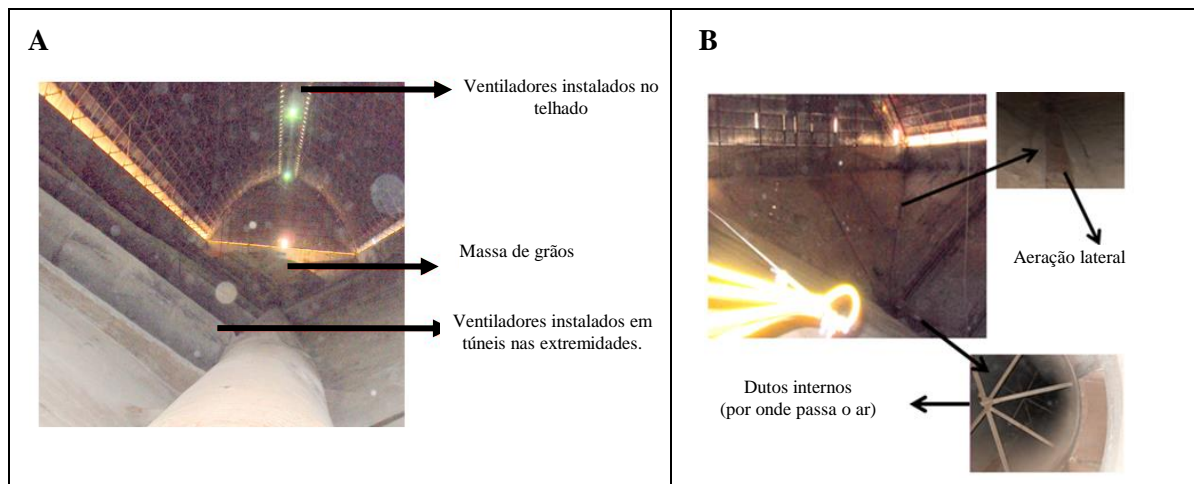


Figura 1: Sistema de aeração do armazém da cooperativa Cotrirosa.

5 Simulação Numérica

Para a aplicação do Método dos Elementos Finitos é necessário o estabelecimento de um domínio de integração, no caso tridimensional, esse domínio precisa ser um sólido. Na etapa da criação do sólido também são definidas as diferentes regiões na superfície do domínio que terão diferentes condições de contorno.

Até o momento foi possível simular o fluxo de ar, de acordo com as características da armazenagem do sistema real. O armazém possui em sua estrutura o fundo em formato V, com 60 metros de largura e 40 metros de comprimento e há dois sistemas de entrada de ar: 1) sistema de entrada central, 2) sistema de entrada de lateral em uma das extremidades. As simulações de aeração no armazém, foram geradas utilizando a taxa de fluxo global de $Q = 9 \text{ m}^3\text{h}^{-1}\text{t}^{-1}$, que são os valores recomendados para a aeração em armazém graneleiros.

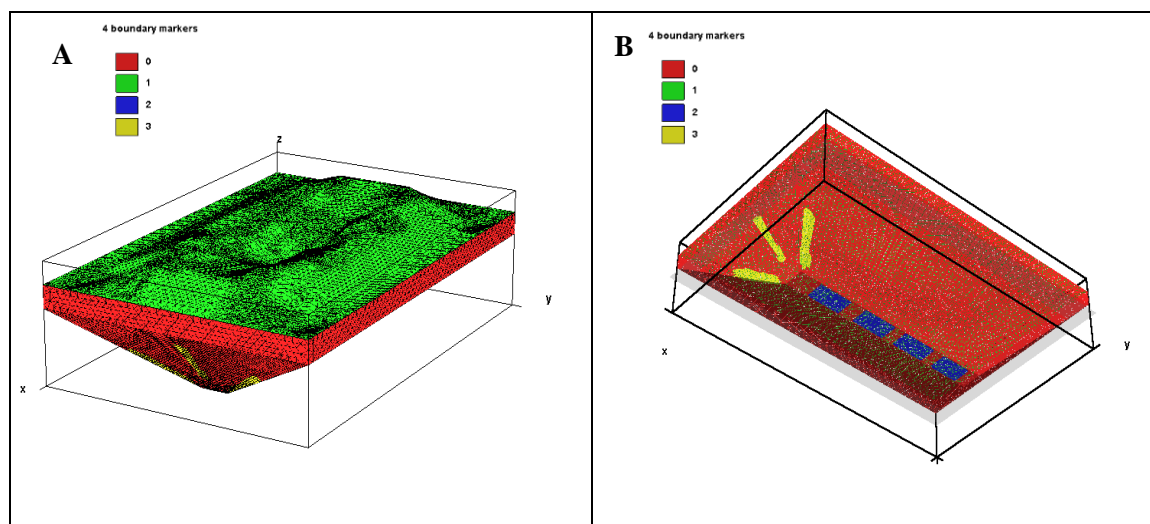


Figura 2: Malha tetraédrica para análise pelo Método dos Elementos Finitos.

O armazém graneleiro investigado foi discretizado, conforme a Figura 2, em 31.866 nós e 125.530 tetraedros. A malha do armazém foi construída no TetGen, um poderoso software aliado em modelos matemáticos, pois seu refinamento e discretização da geometria são adequados para realizar a implementação do Método dos Elementos Finitos.

A criação da malha tetraédrica provém das reais características da armazenagem de grãos da Cooperativa, do mês de Setembro de 2013. Como é um sistema real, a não homogeneidade da massa de grão (Figura 2, A) está presente na geometria. A Figura 2, B

mostra as condições de contorno criadas, a cor em azul representa o sistema de aeração da entrada de ar central, já a cor amarela, representa a entrada de ar lateral. Criou-se condições de contorno diferentes para ambas as entradas, devido ao valor da pressão do ar ser diferente em cada entrada.

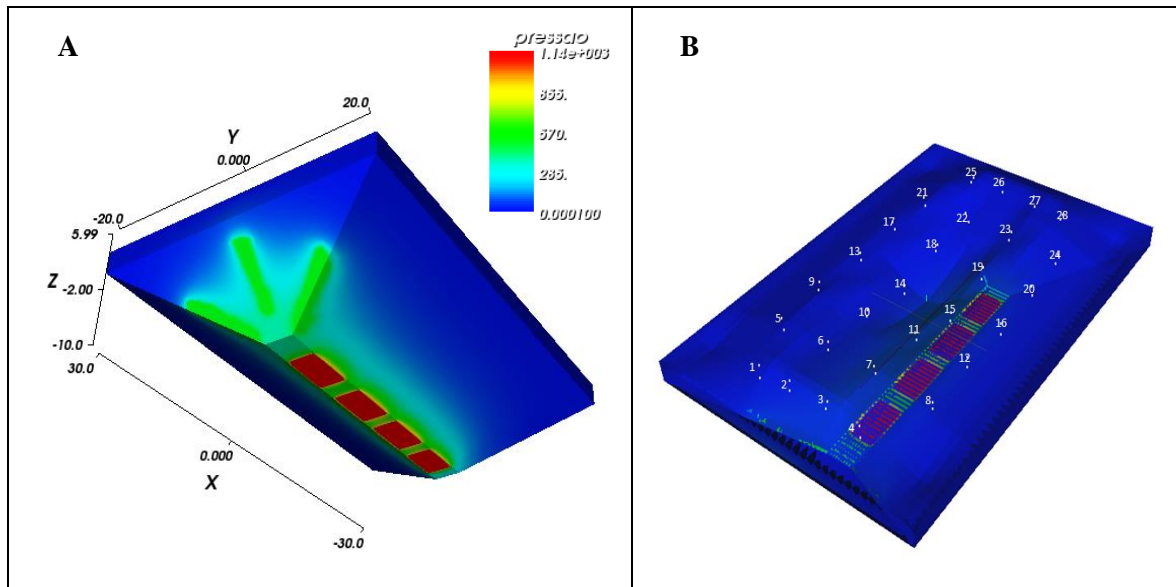


Figura 3: Análise da distribuição da pressão do ar.

Após a execução do programa, foi obtido como resultado (Figura 3, A) a simulação do fluxo de ar em armazém graneleiro de um sistema real. Verifica-se a instalação dos dutos centrais e laterais, que ajudam a equalizar o fluxo de ar na massa de grão. Percebe-se que na simulação tridimensional existe um grande volume de grãos com baixa vazão específica local, tanto no topo do armazém, quanto nas áreas laterais (eixo x). Isso indica que poderia haver um sistema de aeração mais abrangente nas laterais do armazém, para não ocorrer aeração ineficiente nesses domínios.

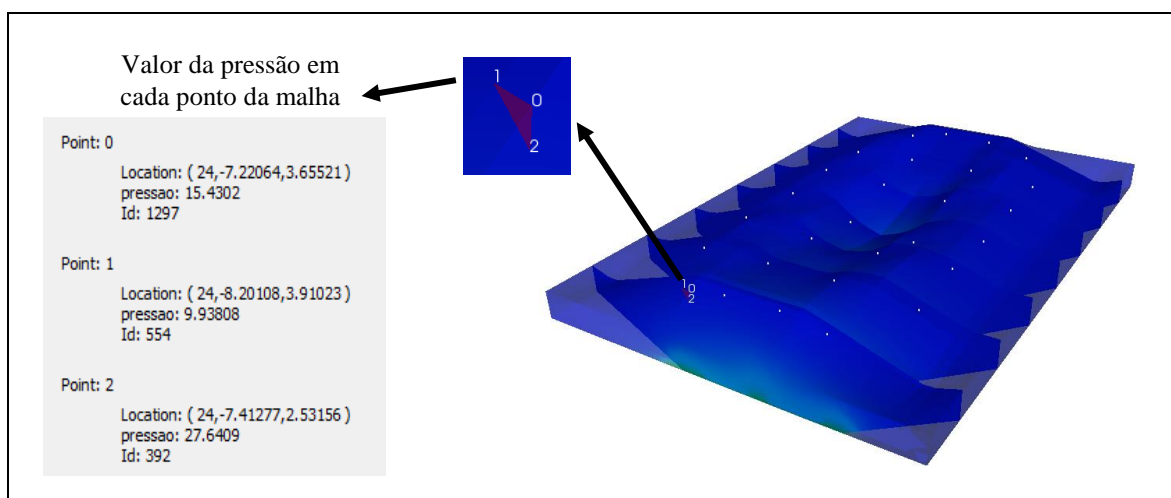


Figura 4: Vazão específica local calculada.

Para validação dos dados simulados, atualmente está sendo realizada uma coleta de dados experimentais no sistema real de armazenagem da Cooperativa. Para medição da pressão

do ar em 28 pontos (Figura 3, B) em duas camadas de grãos, com profundidades de um e dois metros, utiliza-se um tubo de Pitot com manômetro.

Na Figura 4 está apresentada a distribuição de vazão específica local dentro do armazém considerado. Devido à malha estar subdividida em tetraedros é possível obter, através da simulação, valores da pressão em cada ponto do domínio, assim como em diferentes profundidades. Através da análise da distribuição de vazão específica local a simulação mostra que para o sistema de entrada de ar escolhido, existem os domínios tanto com baixo nível de aeração (azul escuro) como com alto nível (verde).

O trabalho seguirá com a medida da pressão do ar de um sistema real de armazenagem, nos pontos indicados. Esses dados serão analisados para a validação do modelo matemático.

6 Conclusão

Foi desenvolvido um software para a simulação 3D da distribuição do fluxo de ar em armazéns graneleiros em condições não uniformes na massa de grãos.

O modelo foi obtido baseado em dados experimentais, coletados no Laboratório de Medidas Físicas para Modelagem Matemática do Departamento de Ciência Exatas e Engenharias da UNIJUÍ.

Foram realizadas as simulações para um armazém real. Com a solução criada, foi possível fazer a análise de eficiência da aeração em todos os pontos do armazém. Com a análise da distribuição de pressão a simulação mostra que para o sistema de entrada de ar escolhido, existem domínios tanto com baixo nível de aeração tanto com alto nível.

É necessária a validação do modelo aplicado em software. Para isso atualmente está sendo realizada uma coleta de dados experimentais no sistema real de armazenagem.

Referências

- [1] Azevedo, Loianny Faria; OLIVEIRA, Thamy Pinheiro; PORTO, Alexandre Gonçalves; SILVIA, Fabricio Schwanz. **A capacidade estática de armazenamento de grãos no Brasil**. Artigo do XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, RJ, pp.04-05, (2008)
- [2] Brooker, D. B, **Computing air pressure and velocity distribution when air flows through a porous medium and nonlinear velocity – pressure relationship exists**, Transaction of the ASAE, 12, pp. 118-120, (1969).
- [3] Jayas D. S; Sokhansanj, S; Moysey E. B; Barber E. B, **The effect of airflow direction on the resistance of canola (rapeseed) to airflow**. Canadian Agricultural Engineering, 29, pp. 189 192, (1987)
- [4] Khatchatourian O. A; Binelo M. O, **Simulation of three-dimensional airflow in grain storage bins**. **Biosystems Engineering**, 101(2), pp. 225-238, (2008).
- [5] Khatchatourian O. A; Toniazzo N. A; Gortyshov Y. F, **Simulation of airflow in grain bulks under anisotropic conditions**. **Biosystems Engineering**, 104(2), pp. 205-215,(2009)
- [6] Khatchatourian O. A; Savicki D. L, **Mathematical modelling of airflow in an aerated soya bean store under non-uniform conditions**. **Biosystems Engineering**, 88(2), pp.201-211, (2004).
- [7] Shedd, C. K., **Resistance of grains and seeds to air flow**. Agricultural Engineering, St Joseph, Michigan: 34-9, p. 616-619, (1953).