

**Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**

---

## Simulação 3D do Fluxo de Ar de um Sistema Real de Armazenagem de Grãos

Vanessa Faoro<sup>1</sup>

Departamento de Ciências Exatas e Engenharias DCEEng, UNIJUÍ, Ijuí, RS

Oleg A. Khatchatourian<sup>2</sup>

Departamento de Ciências Exatas e Engenharias DCEEng, UNIJUÍ, Ijuí, RS

Manuel O. Binelo<sup>3</sup>

Departamento de Ciências Exatas e Engenharias DCEEng, UNIJUÍ, Ijuí, RS

Rodolfo França de Lima<sup>4</sup>

Departamento de Ciências Exatas e Engenharias DCEEng, UNIJUÍ, Ijuí, RS

**Resumo.** Em armazéns graneleiros a conservação dos grãos por determinado tempo depende principalmente de um eficiente sistema de aeração, preservando a quantidade e a qualidade dos grãos armazenados. Para um bom sistema de aeração um modelo matemático e software foram desenvolvidos para simular a distribuição do fluxo de ar em armazéns graneleiros horizontais, em condições não homogêneas e anisotrópicas. Com a simulação foi possível analisar a distribuição do fluxo de ar em todos os pontos da massa de grãos armazenada. Dados experimentais sobre a distribuição de pressão de um sistema real de armazenagem de grãos foram obtidos. Comparação entre os dados experimentais e simulados mostraram concordância satisfatória. Avaliação do desempenho do sistema de aeração foi realizada, usando critério proposto pelos autores para estimar a eficácia da distribuição do fluxo de ar em armazéns graneleiros.

**Palavras-chave.** Modelagem Matemática, Método dos Elementos Finitos, Simulação 3D, Sistema de Aeração, Armazéns Graneleiros

## 1 Introdução

Devido ao clima quente e úmido no Brasil, a armazenagem de grãos ao longo prazo só é possível com o uso de sistemas de aeração. A fim de compensar a deficiência de capacidade de armazenamento no país, a construção e exploração de grandes armazéns horizontais atinge dimensões adotadas amplamente significativas, tornando difícil e as vezes impossível a aeração no armazém graneleiro. Durante o tempo de armazenamento,

---

<sup>1</sup>vanessa.faoro@unijui.edu.br

<sup>2</sup>olegkha@unijui.edu.br

<sup>3</sup>manuel.binelo@gmail.com

<sup>4</sup>rodolfofrancadelima@gmail.com

a quantidade do produto armazenado não é constante (parte da massa de grãos pode ser extraído ou adicionado), que altera as condições de fluxo de ar.

Além disso, há presença da não homogeneidade da massa de grãos, devido à compactação e anisotropia da forma esférica das sementes, torna o problema da distribuição do fluxo de ar no armazenamento mais difícil. Sistema de aeração ineficiente pode causar problemas como migração de umidade de grãos, superaquecimento de grãos devido à atividade biológica, e a proliferação de fungos e insetos conforme [13].

Existem vários fatores que afetam a distribuição do fluxo de ar em armazéns graneleiros, por exemplo, o método de enchimento, a profundidade da massa de grãos, a morfologia dos grãos, velocidade dos ventiladores acionados, etc. Em obras de [3, 5, 7, 8, 10, 12, 13] o fluxo de ar através da massa de grãos sob a influência de algumas destas características foi estudada. Em grandes armazenaméns, a não homogeneidade foi estudada por [6] e anisotropia da massa de grãos por [4].

Os principais objetivos do presente trabalho foram: *a)* contribuição da implementação do modelo matemático e software para calcular a pressão estática, analisar a distribuição do fluxo de ar em 3D, com condições não homogêneas e anisotrópicas; *b)* coletar dados experimentais da distribuição de pressão em diferentes profundidades de um sistema real de armazenagem de grãos; *c)* realizar simulações numéricas 3D do fluxo de ar do sistema real de armazenagem de grãos horizontal; *d)* validar o modelo desenvolvido com dados experimentais; *e)* detectar áreas de risco operacional.

## 2 Descrição do Sistema Real de Armazenagem de Grãos

O objeto de estudo deste trabalho é um sistema real de armazenagem de grãos de propriedade da Cooperativa Cotrirosa, localizada na cidade de Santa Rosa, estado do Rio Grande do Sul, Brasil (características são apresentadas na Tabela 1). O armazém possui estrutura fundo V, com 180 metros de comprimento e 40 metros de largura. Existem dois sistemas de entrada de ar: 1) sistema de entrada central, 2) sistema de entrada lateral, conforme a Figura 1.

Tabela 1: Características do armazém graneleiro estudado.

Tipo de grão	Soja
Tipo do armazém	Abaixo do solo, em fundo V
Número de entrada da aeração central	12 registros
Número de ventiladores da aeração central	12 motores de 44 kW/1730 RPM
Número de entrada da aeração lateral	6 registros
Número de ventiladores da aeração lateral	2 motores de 44 kW/1730 RPM
Valor de pressão da aeração central	2942 Pa
Valor de pressão da aeração lateral	982 Pa
Profundidade do armazém estudado	10 m

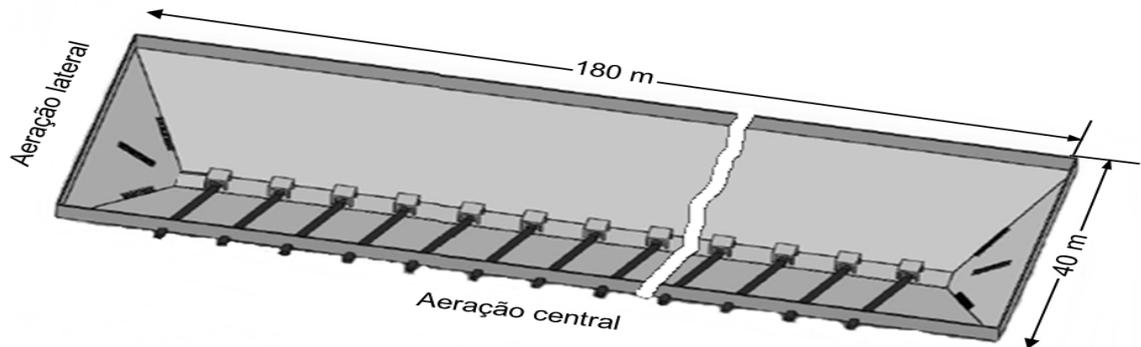


Figura 1: Estrutura do armazém graneleiro estudado.

### 3 Modelagem Matemática e Descrição do Software

#### 3.1 Modelo matemático

Para simular o fluxo de ar tridimensional em meio particulado, foi utilizado o modelo matemático descrito por [9]. Para simplificar o modelo, a relação entre a velocidade e o gradiente de pressão estudado, foi apresentada de forma semelhante à equação proposta por [1] e apresentado em [2]:

$$\text{grad}P = aV + b|V|V \quad (1)$$

onde  $V$  é o vetor velocidade em  $ms^{-1}$ ;  $\text{grad}P$  é o gradiente de pressão em  $Pa$ ;  $a$  e  $b$  são constantes que dependem do tipo de grão;

Como resultado a equação diferencial parcial não-linear para a pressão tem a forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -K_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -K_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -K_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

onde  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$  em  $m^3kg^{-1}s$ , são os coeficientes de permeabilidade nas principais direções.

Neste trabalho assume-se que: *a*) o coeficiente de permeabilidade  $K_z$  correspondente à direção vertical; *b*) os coeficientes pertencentes ao plano horizontal são iguais, isto é,  $K_x = K_y$ ; Em grandes armazéns, o coeficiente  $K$  e o gradiente de pressão varia de acordo com a profundidade em que está localizado a camada de grãos. Os resultados obtidos em [6] foram utilizados para esclarecer a influência do fator de compactação em grandes quantidades na massa de grãos sobre o coeficiente de permeabilidade. A anisotropia da massa de grãos (a diferença entre  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ ) foi obtida de acordo com o trabalho [9]

Para avaliar a aeração foi utilizado o critério criado por [6], chamado de vazão específica local, permitindo avaliar a qualidade da aeração em qualquer ponto do produto. A taxa de fluxo de ar local específica para todos os pontos internos  $X(x, y, z)$  do armazém é:

$$q_L(X) = \frac{V(X)}{\rho(X)L(X)} \quad (3)$$

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

### 3.2 Breve descrição do software

O método dos elementos finitos [11] foi usado para resolver a equação (2). A matriz de coeficientes de permeabilidade  $K$  foi calculada em cada nó da malha de elementos finitos, utilizando um processo iterativo. O software, desenvolvido em *ANSI C ++* e *Pascal*, usa ferramentas de software livre sempre que possível. Uma descrição mais detalhada do software pode ser encontrado em [6].

## 4 Resultados e Discussões

Para validar o modelo matemático e o software, foram obtidos dados experimentais sobre a distribuição de pressão estática em duas camadas de grãos do armazém graneleiro, após foram comparados com os dados da simulação.

### 4.1 Simulação numérica

Devido ao estudo experimental, foram acionados quatro entradas de ar central e uma lateral, correspondente a massa de grão estudada do armazém. Com a execução do programa, foi obtido como resultado a simulação do fluxo de ar de um sistema real de armazenagem de grãos, onde a pressão é dada em Pascal ( $Pa$ ).

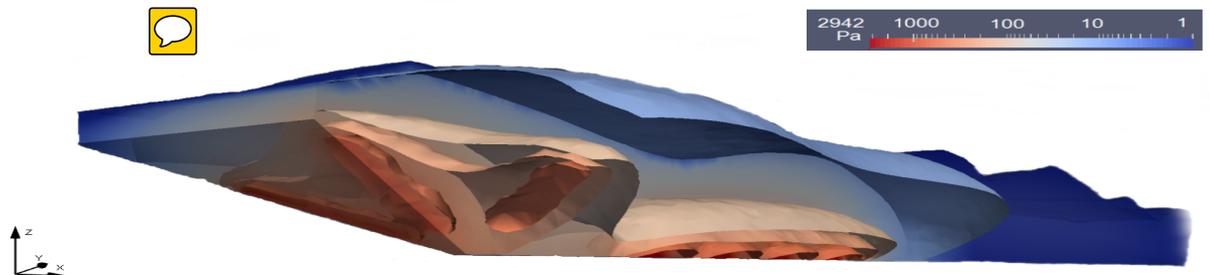


Figura 2: Superfícies isobáricas do armazém estudado.

A Figura 2, apresenta a localização das superfícies isobáricas espacial da distribuição de pressão do ar no armazém, verifica-se o sistema de aeração central e lateral, e a distribuição do fluxo de ar em diferentes valores de pressão na massa de grãos. A Figura 3, mostra a vazão específica local do sistema de aeração estudado, em um corte na secção vertical central, em direção ao eixo  $x$ . Percebe-se que a massa central de grãos, possui um grande volume do escoamento do ar transportado em um intervalo de tempo, devido à menor resistência oferecida pela massa de grãos nesta direção.

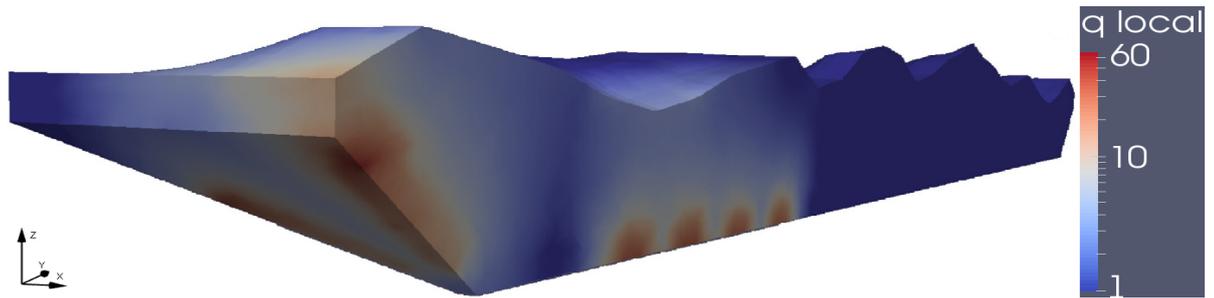


Figura 3: Distribuição de taxas da vazão específica local do sistema real de armazenamento estudado.

As entradas de ar centrais são importantes para o sistema de aeração estudado, contudo, com a análise da vazão específica local do ar, pode-se perceber domínios centrais da massa de grãos com muita vazão, afastando-se do valor taxa recomendada pela literatura mundial de  $13m^3h^{-1}t^{-1}$ . Devido ao volume e a não uniformidade significativa da massa de grãos do armazém, a eficácia do sistema de aeração deve ser melhorada. Para armazéns horizontais estas melhorias podem ser alcançadas, em particular, através da otimização do controle do sistema de aeração, abrangendo um dimensionamento e pressão das entradas de ar adequados para um bom armazenamento.

## 4.2 Resultado experimental, validação do modelo e software

O estudo experimental foi realizado em apenas um terço da massa de grãos do armazém, portanto foram acionados as entradas de ar correspondente a massa de grão estudada (Figura 1, lado direito). A pressão estática foi medida em profundidades de 1 e 2 metros abaixo da massa de grãos, em 28 pontos, (com espaçamento no eixo  $x$  a cada 8 metros). Para a coleta dos dados experimentais de pressão, foram imersas na massa de grãos, sondas com as respectivas profundidades, analisando a pressão através manômetro. Foi adotado o manômetro tubo U inclinado em relação ao eixo horizontal com ângulo de  $30^\circ$ , adequado para medições de pequenas pressões com boa precisão. Para a medição da pressão da entrada do ar, foi adotado o manômetro Tubo em U.

Os dados experimentais da medição da pressão estática estão apresentados na Figura 4. De acordo com o esquema de enchimento do armazém, com a redução da profundidade da camada de grãos perto do eixo longitudinal, a pressão estática tem valor maior em pontos situados mais próximo do eixo longitudinal do armazém graneleiro. Por conseguinte, na periferia do armazém, em que o caminho entre a entrada e saída de ar é máxima, a pressão têm valores menores. O valor mais alto de pressão estática ( $44 Pa$ ) foi obtido na secção de  $X = 30 m$ , na profundidade de 2 metros.

A análise estatística dos dados experimentais e simulados foi satisfatória (Figura 4). Os valores do coeficiente de determinação ( $R^2 = 0.72$  profundidade de 1 metro e  $R^2 = 0,92$  profundidade de 2 metros) indicam a precisão do modelo e do software desenvolvido, possibilitando utilizar a simulação tridimensional do fluxo de ar em armazéns graneleiros horizontais, para problemas de otimização do fluxo de ar.

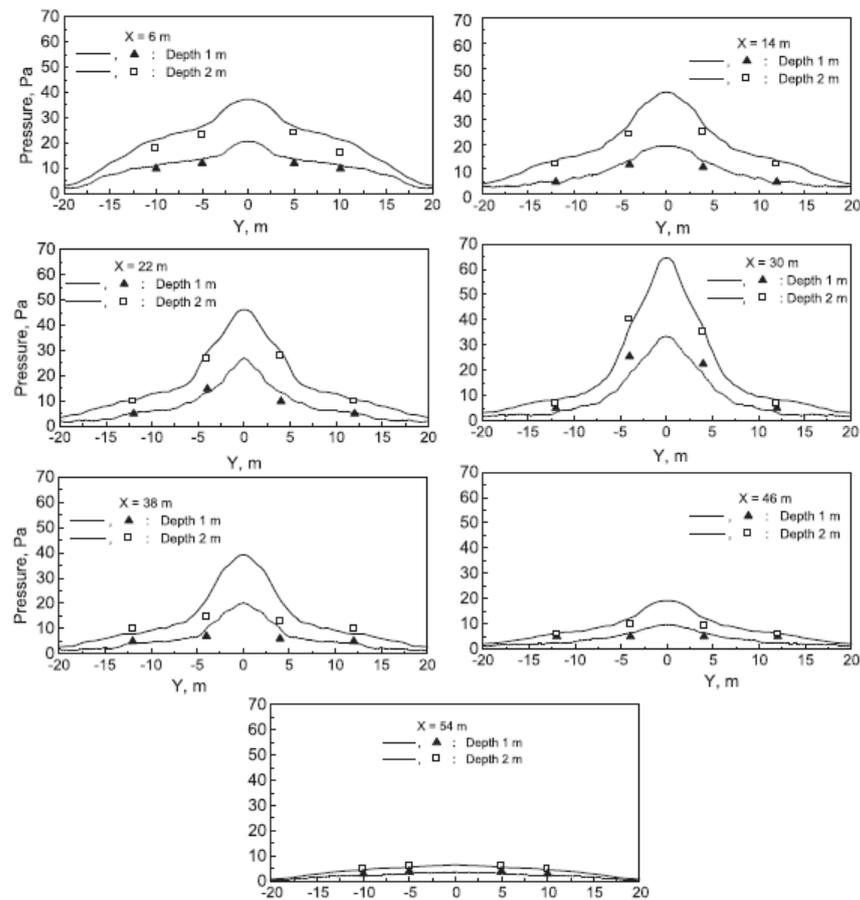


Figura 4: Distribuição de pressão nas camadas de grãos localizadas a uma profundidade de um e dois metros abaixo da massa de grãos: dados experimentais (pontos) e dados simulados (linhas), o coeficiente de determinação de profundidade de um metro  $R^2 = 0,72$  e de dois metros de  $R^2 = 0,92$ .

## 5 Conclusões

Neste trabalho, foi estudado a distribuição do fluxo de ar de um sistema real de armazenagem de grãos, uma análise foi realizada para detectar áreas de risco e, conseqüentemente, melhorar a eficiência do processo de aeração. A fim de validar o modelo e o software desenvolvido, dados experimentais sobre a distribuição de pressão de um sistema real de armazenagem de grãos foram obtidos. Comparação entre os dados experimentais e simulados mostrou uma concordância satisfatória (coeficiente de determinação  $R^2 = 0,72$  profundidade de 1 metro e  $R^2 = 0,92$  profundidade de 2 metros). Esta validação possibilita utilizar o método para melhorar e otimizar a distribuição do fluxo de ar em armazéns graneleiros horizontais.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Unijuí pelo apoio financeiro e a Cooperativa Triticola Cotrirosa pela ajuda e disponibilidade na coleta dos dados experimentais.

## Referências

- [1] Y. Bachmat. Basic transport coefficients as aquifer characteristics. *Proceedings of the Dubrovnik Symposium, Hydrology of Fractured Rocks.*, 1:63–75, 1965.
- [2] J. Bear. Dynamics of fluids in porous media. *Dover Publications.*, 1988.
- [3] D. B. Brooker, F. W. Bakker-Arkema, and C. W. Hall. Drying cereal grains. *AVI Publishing Co., Inc., Westport, CT.*, 1982.
- [4] T. J. A. Hood and G. R. Thorpe. The effects of the anisotropic resistance to airflow on the design of aeration systems for bulk stored grains. *Agricultural Engineering Australia.*, 21:18–23, 1992.
- [5] D. S. Jayas, S. Sokhansanj, E. B. Moysey, and E. B. Barber. The effect of airflow direction on the resistance of canola (rapeseed) to airflow. *Canadian Agricultural Engineering.*, 29:189–192, 1987.
- [6] O. A. Khatchatourian and M. O. Binelo. Simulation of three-dimensional airflow in grain storage bins. *Biosystems Engineering.*, 101(2):225–238, 2008.
- [7] O. A. Khatchatourian and F. A. Oliveira. Mathematical modelling of airflow and thermal state in large aerated grain storage. *Biosystems Engineering.*, 95(2):159–169, 2006. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2006.05.009.
- [8] O. A. Khatchatourian, F. A. Oliveira, and A. Bihain. Estado térmico de produtos armazenados em silos com sistema de aeração: estudo teórico e experimental. *Engenharia Agrícola.*, 27(1):247–258, 2007. DOI:10.1590/S0100-69162007000100019.
- [9] O. A. Khatchatourian, N. A. Toniazzo, and Y. F. Gortyshov. Simulation of airflow in grain bulks under anisotropic conditions. *Biosystems Engineering.*, 104(2):205–215, 2009. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2009.06.023.
- [10] D. E. Maier, R. G. Moreira, and F.W. Bakker-Arkema. Comparison of conventional and chilled aeration of grains under texas conditions. *Applied Engineering in Agriculture.*, 8(5):661–667, 1992.
- [11] L. J. Segerlind. *Applied Finite Element Analysis*. J. Wiley and Sons Inc, New York, USA.
- [12] C. K. Shedd. Resistance of grains and seeds to air flow. *Agricultural Engineering, St Joseph, Michigan*.
- [13] E. Weber. *Armazenagem Agrícola*. Kepler Weber Industrial., Porto Alegre, 1995.