

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

---

## Otimização do Sistema de Aeração em Armazém Graneleiro Horizontal

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

Nelson A. Toniazzo<sup>4</sup>

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

**Resumo.** Com o avanço da área agrícola e safras de volumes significativos de grãos torna-se indispensável o investimento na armazenagem. A aeração é o principal processo empregado para esse fim, tendo a finalidade de preservar a massa de grãos com qualidade. 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. Foram incorporados no software o critério de avaliação e o critério de otimização do sistema de aeração. Informações de um sistema real de armazenagem de grãos foram obtidas. Foi realizada uma análise do desempenho do sistema real de aeração estudado. Os resultados mostraram que o perfil otimizado permite uma melhor distribuição do fluxo de ar, fazendo que a energia gasta na aeração traga um melhor benefício para a armazenagem.

**Palavras-chave.** Modelagem Matemática, Desempenho, Fluxo de ar, Simulação

### 1 Introdução

A agricultura possui um grande impacto na economia do Brasil, segundo a Conab em [2], a previsão da produção de grãos da safra 2016/2017 será 15,4 % maior que a safra anterior. Com o avanço da área agrícola, torna-se indispensável o investimento em novas tecnologias para a produção e armazenamento de grãos.

A produção de grãos é armazenada em armazéns, os quais são responsáveis por manter a qualidade do grão, sendo a aeração o principal processo empregado para esse fim. A aeração tem a finalidade de preservar a massa de grãos, obtendo uma armazenagem segura

---

<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>toniazzo@unijui.edu.br

e eficaz. Um 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 [12].

Existem vários fatores que afetam a distribuição do fluxo de ar em armazéns de grãos, por exemplo o método de enchimento, a profundidade da massa de grãos, porosidade e umidade dos grãos, entre outros. Nos trabalhos de [1, 4, 5, 11, 12] o fluxo de ar através da massa de grãos sob a influência de algumas destas características foi estudada. Em grandes armazéns, a não homogeneidade foi estudada por [6] e anisotropia da massa de grãos por [3, 9].

Os principais objetivos do presente trabalho foram: *a)* coletar dados de um sistema real de armazenagem de grãos (objeto de estudo); *b)* contribuir com a implementação de um modelo matemático e software capaz de fazer a simulação da distribuição do fluxo de ar em armazéns graneleiros horizontais, sob condições não homogêneas e anisotrópicas; *c)* incorporar no software o critério de avaliação do sistema de aeração e o critério de otimização do sistema de aeração; *d)* avaliar o desempenho do sistema de aeração do armazém estudado e propor um perfil otimizado de entrada de ar;

## 2 Materiais e Métodos

Neste estudo, utilizou-se o modelo matemático de [6] que descreve o fluxo de ar em meio particulado, consistindo em um sistema de duas equações:

$$\operatorname{div}V = 0 \tag{1}$$

$$\operatorname{grad}P = aV + b|V|V \tag{2}$$

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

A proporcionalidade  $K$  é expressa pelo coeficiente de permeabilidade para meio anisotrópico:

$$K = \frac{\exp(\{[\ln(1 + U^2) - 2U \operatorname{artan}(U)]\} \pi + 3U) / 4a + C}{|\operatorname{grad}P|} \tag{3}$$

Substituindo a Equação 3 na Equação 1 de continuidade, obtém-se a Equação diferencial parcial não linear para pressão, dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -K_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -K_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -K_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \tag{4}$$

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

A Equação 4, juntamente com as condições de contorno Dirichlet e Neumann, descrevem a distribuição do fluxo de ar em armazéns graneleiros com sistema de aeração, sob condições não uniformes e anisotrópicas da massa de grãos.

Para aplicar o modelo matemático proposto assume-se que: a) o coeficiente  $K_z$  corresponde à direção vertical é dada pela Equação 3; b) os coeficientes do plano horizontal são iguais, isto é,  $K_x = K_y$ ; c) a relação entre os coeficientes na direção vertical e horizontal (grau de anisotropia) é constante em todos os pontos da massa de grãos. Em grandes armazéns, o coeficiente  $K$  e o gradiente de pressão varia de acordo com a profundidade em que está localizada a camada de grãos. Os coeficientes  $a$  e  $b$  e de anisotropia foram obtidos de acordo com o trabalho [7].

O método dos elementos finitos ([10]) foi utilizado para resolver a Equação 4. A matriz de coeficientes de permeabilidade  $K$  foi calculada em cada nó da malha de elementos finitos por meio de 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 encontrada em [6].

## 2.1 Descrição do Objeto de Estudo

O objeto de estudo deste trabalho é um sistema real de armazenagem de grãos horizontal de propriedade da Empresa Três Tentos Agroindustrial localizado em Ijuí, RS, Brasil. A Tabela 1 apresenta as características do armazém graneleiro. O armazém possui três sistemas de aeração: 1) Aeração Central, 2) Aeração Lateral, e 3) Aeração nas Extremidades. A Figura 1 mostra a localização das entradas de ar do sistema de aeração.

Tabela 1: Características do objeto de estudo.

Tipo de grão	Soja
Tipo do armazém	Abaixo do solo, em fundo V
Capacidade do armazém	60 mil toneladas
Número de entrada da aeração central	18 registros
Número de ventiladores da aeração central	18 ventiladores DYNT 04, 20 CV
Valor de pressão da aeração central	2060 Pa
Número de entrada da aeração lateral	8 registros
Número de ventiladores da aeração lateral	8 ventiladores centrífugo RLS 450, 4 CV
Valor de pressão da aeração lateral	1471 Pa
Número de entrada da aeração nas extremidades	8 registros
Número de ventiladores da aeração nas extremidades	2 ventiladores centrífugo RFS 800, 40 CV
Valor de pressão da aeração nas extremidades	3138 Pa
Profundidade do armazém estudado	13,4 m

## 2.2 Critério de Eficiência da Aeração

Para avaliar a eficiência do sistema de aeração em armazéns graneleiros com geometria complexa ou com a distribuição complexa das entradas de ar, foi utilizado o critério criado por [6], chamado de vazão específica local. Em [8] o critério mostrou-se um bom parâmetro para analisar a eficiência da aeração. Esse critério permite que seja avaliada a vazão específica em qualquer ponto interno do armazém com área de seção transversal variável a qualquer ponto interno  $X = X(x, y, z)$ . De acordo com [6] a vazão específica local é definida como:

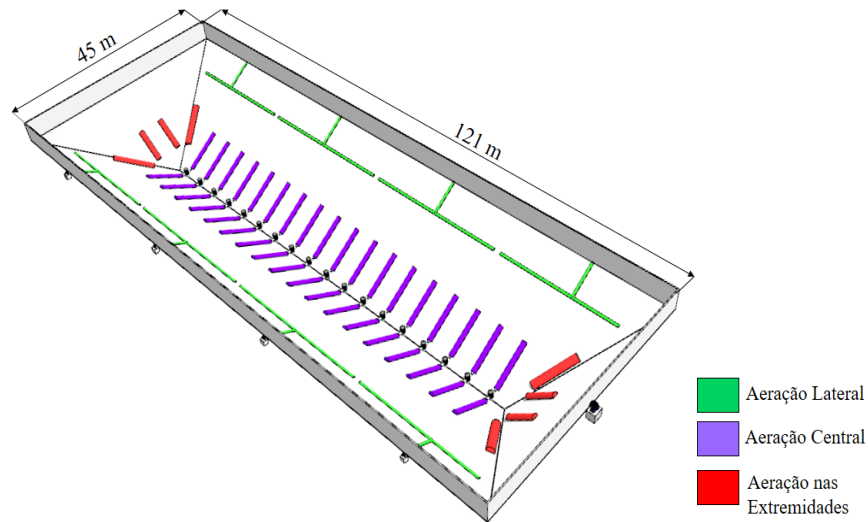


Figura 1: Localização do sistema de aeração do objeto de estudo.

$$q_L(X) = \frac{V(X)}{\rho(X)L_X} \quad (5)$$

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

### 2.3 Critério de Otimização do Fluxo de Ar

Para uma proposição de melhora na distribuição do fluxo de ar em armazéns graneleiros utilizou-se o critério criado por [8], que propõe um perfil da pressão otimizado, chamado pelos autores de “perfil recomendado”. O estudo mostra que os resultados quase ótimos correlacionam-se bem com uma função proporcional ao quadrado da profundidade da massa de grãos.

No perfil otimizado, todo o fundo do armazém é considerado uma entrada de ar com um perfil de pressão de variação contínua obedecendo a Equação:

$$p_x = \frac{h_x^2}{h_{max}^2} p_{max} \quad (6)$$

onde  $p_x$  é a pressão de entrada para o ponto  $x$  do fundo do armazém,  $h_x$  é a altura da camada de produto no ponto  $x$ ,  $h_{max}$  é a altura da camada de produto máxima do armazém e  $p_{max}$  é a pressão máxima necessária para manter a vazão de ar. Na prática, não é possível tecnicamente criar um sistema de entrada de ar com estas características já que as entradas são distribuídas em alguns pontos do armazém e possuem uma distribuição

discreta de pressões. No entanto, este perfil ideal pode servir de diretriz para o projeto do sistema de aeração.

### 3 Resultados e Discussão

Com as características do objeto de estudo e a execução das simulações, foi obtido como resultado a simulação do fluxo de ar do sistema de armazenagem de grãos estudado. A secção transversal no centro do armazém é mostrada nas Figuras 2, 3 e 4, representando o escoamento do ar na massa de grãos.

A Figura 2A mostra o sistema de aeração atual, onde podemos notar as entradas de ar central e lateral, onde a pressão é significativamente maior. A otimização do perfil recomendado é mostrado na Figura 2B, onde a aeração foi realizada em todo o fundo do armazém. No perfil otimizado nota-se que a pressão máxima é maior, para manter a mesma vazão do fluxo do perfil atual de  $Q = 8,12m^3h^{-1}t^{-1}$ .

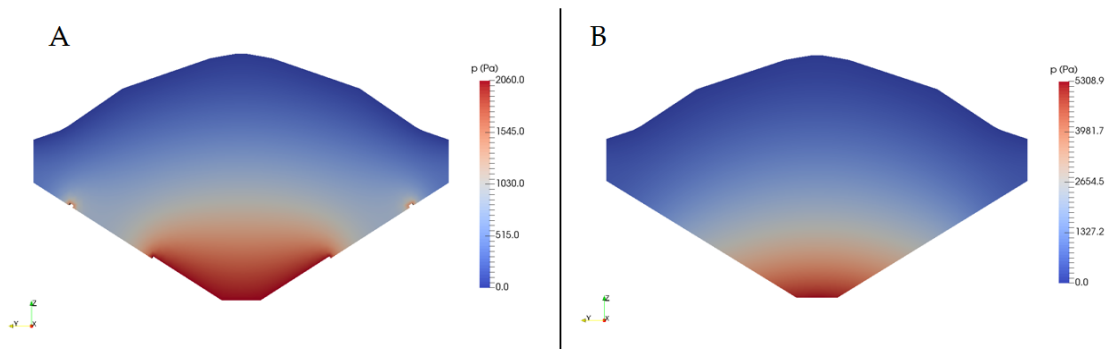


Figura 2: Simulação da distribuição do fluxo de ar em corte transversal do armazém. A: perfil atual; B: perfil recomendado.

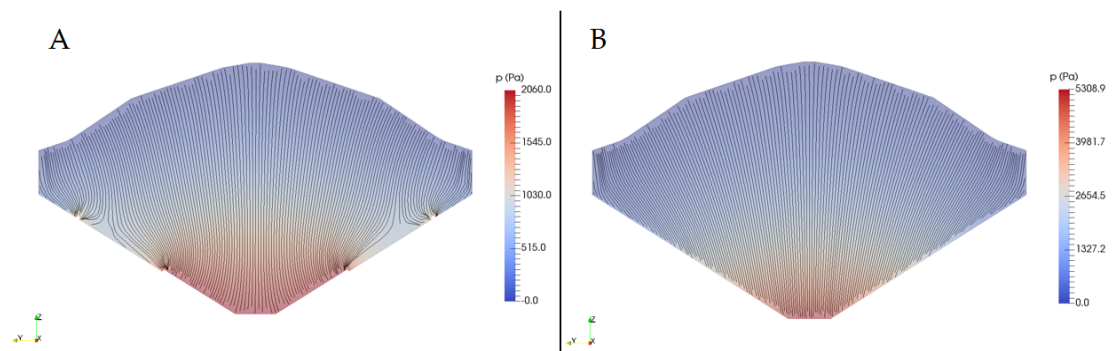


Figura 3: Linhas de fluxo do escoamento do ar em corte transversal do armazém. A: perfil atual; B: perfil recomendado.

A Figura 3 ilustra linhas de fluxo do trajeto percorrido pelo ar na massa de grãos. A Figura 3A mostra as linhas de fluxo do perfil atual e a Figura 3B mostra as linhas de fluxo do perfil otimizado. Fica claro que o perfil otimizado permite uma melhor distribuição do fluxo de ar.

Com o critério da vazão específica local ( $q_L$ ) é possível avaliar o fluxo de ar em  $m^3$  de ar a cada hora por tonelada de grão em todos os pontos da seção transversal central do armazém. O critério de otimização do fluxo de ar produziu uma melhora significativa nessa distribuição. A diferença entre o valor maior e menor de  $q_L$  do perfil atual (Figura 4A) é 6,8 vezes maior que do perfil recomendado (Figura 4B).

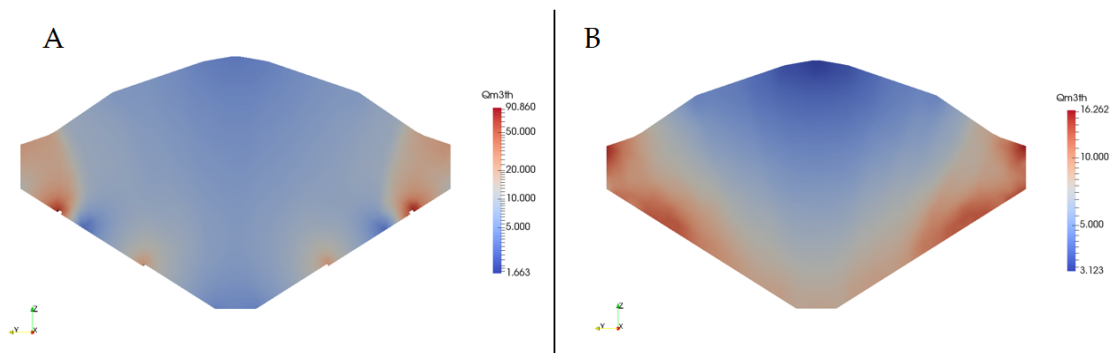


Figura 4: Distribuição da vazão específica local em corte transversal do objeto de estudo. A vazão específica global é de  $Q = 8,12m^3h^{-1}t^{-1}$ .

## 4 Conclusões

Este trabalho apresentou a implementação de um modelo matemático e software capaz de fazer a simulação da distribuição do fluxo de ar em armazéns graneleiros horizontais, sob condições não homogêneas e anisotrópicas. A simulação foi realizada em um sistema real de armazenagem de grãos, a visualização dos resultados através do critério da vazão específica do ar demonstrou que fluxo de ar que pode ser otimizado fazendo que a energia gasta na aeração traga um melhor benefício para a armazenagem. Foi utilizado o critério de otimização e realizada uma avaliação do desempenho do fluxo de ar do perfil atual e do perfil recomendado (otimizado), no qual verificou-se, através do critério da vazão específica do ar, que a distribuição do fluxo de ar foi significativamente melhorada. Embora o perfil recomendado não possa ser tecnicamente implementado, pode servir de diretriz para o projeto de um sistema de aeração mais eficiente.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Unijuí pelo apoio e a Empresa Três Tentos Agoindustrial pela ajuda e disponibilidade dos dados.

## Referências

- [1] D. B. Brooker, F. W. Bakker-Arkema, C. W. Hall. *Drying Cereal Grains*. AVI Publishing Co., Inc., Westport, CT., 1982.
- [2] Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), Março, 2017, disponível em <http://www.conab.gov.br>.
- [3] T. J. Hood, G. R. Thorpe, PThe effects of the anisotropic resistance to airflow on the design of aeration systems for bulk stored grains, *Agricultural Engineering Australia*, 21:18–23, 1992.
- [4] D. S. Jayas, S. Sokhansanj, E. B. Moysey, E. B. Barber, The effect of airflow direction on the resistance of canola (rapeseed) to airflow, *Canadian Agricultural Engineering*, 29:189–192, 1987.
- [5] O. A. Khatchatourian, F. A. Oliveira, A. Bihain, Estado térmico de produtos armazenados em silos com sistema de aeração: estudo teórico e experimental, *Engenharia Agrícola*, 27:247–258, 2007.DOI:10.1590/S0100-69162007000100019.
- [6] O. A. Khatchatourian, M. O. Binelo, Simulation of three-dimensional airflow in grain storage bins, *Biosystems Engineering*,101:225–238, 2008. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2008.06.001.
- [7] O. A. Khatchatourian, N. A. Toniazzo, Y. F. and Gortyshov, Simulation of airflow in grain bulks under anisotropic conditions, *Biosystems Engineering*, 104:205–215,2009. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.023.
- [8] O. A. Khatchatourian, M. O. Binelo, V. Faoro, and N. A. Toniazzo, Three-dimensional simulation and performance evaluation of air distribution in horizontal, *Biosystems Engineering* , 142:42–52, 2016. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2015.12.009.
- [9] S. Neethirajan, D. S. Jayas, N. D. G. White, H. Zhang, Investigation of 3D geometry of bulk wheat and pea pores using X-ray computed tomography images, *Computers and Electronics in Agriculture*, 63:104–111, No. 2, 2008.DOI: .org/10.1016/j.compag.2008.01.019.
- [10] L. J. Segerlind. *Applied Finite Element Analysis*, J. Wiley and Sons Inc, New York, USA, 1976.
- [11] C. K. Shedd, Resistance of grains and seeds to air flow, *Agricultural Engineering*, St Joseph, Michigan, 34:616–619, No. 9, 1953.
- [12] E. A. Weber. *Excelência em Beneficiamento e Armazenagem de Grãos*, Salles, Kepler Weber Industrial , Canoas, RS, 2005.