

MODELAGEM MATEMÁTICA DO RESFRIAMENTO DE GRÃOS COM BASE NO TEMPO DE AERAÇÃO PARA TRÊS DIFERENTES VELOCIDADES DO AR¹

Graziela Zorzo², Maurício de Campos³, Airam Teresa Zago Romcy Sausen⁴, Marcia de Fatima Brondani Binelo⁵, Manuel Osorio Binelo⁶

¹Trabalho realizado na disciplina de Modelagem Matemática do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijuí

² Estudante do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijuí

³ Prof. Dr. do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijuí

⁴ Profa. Dra. do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijuí

⁵ Profa. Dra. do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijuí

⁶ Prof. Dr. do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijuí

RESUMO

A ventilação de ar ambiente para resfriamento de grãos é comumente empregada na etapa final de secagem e no controle subsequente da temperatura de armazenamento. Com o aumento significativo na produção mundial de grãos, a preservação eficaz nos locais de armazenamento se torna crucial. Portanto, torna-se imperativo garantir a integridade dos grãos, impedindo o desenvolvimento de insetos e conservando suas propriedades físico-químicas. Nesse contexto, técnicas como a aeração desempenham um papel fundamental ao manter as condições ideais de temperatura e umidade nos locais de acolhimento. Desse modo, neste trabalho tem-se como objetivo modelar matematicamente o resfriamento de grãos com base no tempo de aeração. Para isso, foram obtidos dados experimentais sobre o resfriamento de massa pré-aquecida de grãos de soja para diferentes velocidades do ar, retirados de um estudo realizado por Oliveira, Khatchatourian e Bihain (2007), através da utilização do aplicativo Automeris. Assim, realizou-se um ajuste de curvas utilizando a linguagem Python no ambiente colaborativo Google Colaboratory, tendo como base a regressão polinomial, onde foi possível encontrar modelos que mostraram valores notáveis para o R^2 , sendo de 99,39%, 99,16% e 98,69% para as seguintes velocidades do ar, respectivamente, $0,23 \text{ m s}^{-1}$, $0,41 \text{ m s}^{-1}$ e $0,53 \text{ m s}^{-1}$, mostrando concordância satisfatória com os dados experimentais.

Palavras-chave: Armazenagem de grãos. Aeração. Resfriamento de grãos.

ABSTRACT

The ventilation of ambient air for grain cooling is commonly employed in the final stages of drying and subsequent control of storage temperature. With the significant increase in global grain production, effective preservation in storage facilities becomes crucial. Therefore, ensuring the integrity of grains, preventing the development of insects, and preserving their physical and chemical properties becomes imperative. In this context, techniques like aeration play a fundamental role in maintaining optimal temperature and humidity conditions in storage locations. Thus, this study aims to mathematically model grain cooling based on aeration time. For this purpose, experimental data on the cooling of preheated soybean grains for different air velocities were obtained from a study conducted by Oliveira, Khatchatourian, and Bihain (2007) using the Automeris application. Accordingly, a curve fitting was performed using the Python language in the collaborative Google Colaboratory environment, based on polynomial regression. This approach led to the identification of models that exhibited notable R^2 values:



99.39%, 99.16%, and 98.69% for air velocities of 0.23 m/s, 0.41 m/s, and 0.53 m/s, respectively, indicating satisfactory agreement with experimental data.

Keywords: Grain storage. Aeration. Grain cooling.

INTRODUÇÃO

A preservação de produtos agrícolas, especialmente grãos, é de suma importância para garantir a qualidade e evitar perdas econômicas. Sabe-se que a produção mundial de grãos tem testemunhado um crescimento constante ao longo dos anos, o que tem gerado a necessidade de implementar estruturas de armazenagem que preservem a qualidade dos grãos até o momento de sua comercialização (Ziegler, Paraginski e Ferreira, 2021).

Desta forma, no que se refere a armazenagem de grãos, têm-se uma preocupação muito grande em conseguir diminuir danos causados por insetos, ácaros e fungos, e evitar processos de oxidação que resultam em perda de sabor, descoloração e até mesmo na presença de micotoxinas prejudiciais (Navarro, 2012). Nesse contexto, a aeração surge como uma importante técnica para a manutenção da qualidade e segurança dos grãos.

A abordagem da aeração envolve o resfriamento dos grãos por meio da passagem controlada do ar ambiente através da massa de grãos, desempenhando um papel vital na regulação das condições de temperatura e umidade dos grãos (Oliveira, Khatchatourian e Bihain, 2007). Nesse contexto, o resfriamento de grãos por meio da ventilação de ar ambiente tem recebido grande atenção devido à sua eficácia em manter condições ideais de armazenamento.

A previsão das taxas de resfriamento dos grãos é fundamental para elaborar estratégias eficientes de armazenamento e prevenir deteriorações. Uma abordagem para alcançar isso é por meio da modelagem matemática, que pode fornecer informações valiosas sobre o complexo processo de resfriamento de grãos com base no tempo de aeração e na velocidade do fluxo de ar. Este trabalho tem como objetivo explorar a modelagem matemática do resfriamento de grãos usando o tempo de aeração para três diferentes velocidades do fluxo de ar, lançando luz sobre suas implicações para a gestão do armazenamento de grãos.

METODOLOGIA

Para modelar matematicamente o resfriamento dos grãos com base no tempo de aeração foram utilizados dados experimentais de um estudo realizado por Oliveira, Khatchatourian e Bihain (2007). Para extração dos dados presentes nos gráficos deste estudo, utilizamos o aplicativo Automeris. Após conhecimento destes dados, foram realizados ajustes de curvas através da regressão polinomial.

Os autores Oliveira, Khatchatourian e Bihain (2007) conduziram seu estudo experimental usando um 'silo' baseado em tubo de PVC com isolamento térmico em suas laterais. Para os experimentos, grãos de soja com um teor médio de água de 12% (base úmida) foram cuidadosamente selecionados, limpos e pré-aquecidos em um forno para atingir uma temperatura aproximada de 52°C (temperatura inicial - T_0) por cerca de 8 horas. Esse pré-aquecimento garantiu temperatura uniforme em toda a massa de grãos.

O resfriamento dos grãos pré-aquecidos foi realizado ventilando uma camada de grãos de soja com 0,60 m de altura usando ar ambiente. Um ventilador centrífugo, acionado por um motor elétrico de $\frac{3}{4}$ hp, foi usado para induzir o fluxo de ar. A velocidade do ventilador foi controlada por um inversor de frequência, e o fluxo de ar foi direcionado por um tubo de 0,05 m de diâmetro. A diferença de pressão do ar através da placa foi medida usando um manômetro de pressão diferencial conectado a uma placa de orifício, permitindo o cálculo da taxa de fluxo de ar.

As medições de temperatura foram feitas usando termopares do tipo K (modelo MTK) colocados dentro da massa de grãos ao longo do tubo em seções específicas: $y = 0,15$ m, $y = 0,27$ m, $y = 0,40$ m e $y = 0,54$ m. Esses termopares estavam conectados a uma unidade de aquisição de dados do tipo LR 7018, permitindo até dez leituras por segundo. A temperatura do ar entrante usada para aeração (temperatura ambiente - T_a) foi medida na entrada da câmara.

Diferentemente das condições reais, onde as diferenças de temperatura entre os interiores dos silos e o ar ambiente raramente excedem 10°C, os experimentos realizados no resfriamento de grãos de soja mantiveram uma diferença de temperatura entre 20°C e 25°C. Isso foi feito para aumentar a sensibilidade das medições e reduzir o erro relativo.

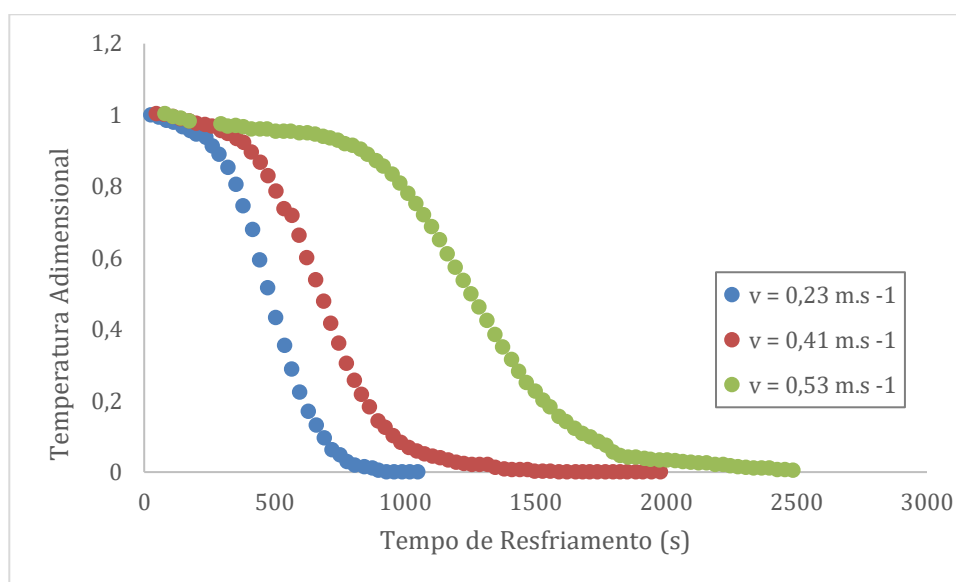
Para obter um modelo matemático que descrevesse o resfriamento dos grãos, empregou-se a técnica de ajuste de curvas através da utilização da linguagem Python no ambiente colaborativo Google Colaboratory. Essa abordagem visa encontrar uma função que

melhor se ajuste aos pontos dos dados fornecidos (MOLUGARAM e RAO, 2017), minimizando a discrepância entre a curva e os pontos do gráfico.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, a partir dos dados extraídos através do aplicativo Automeris, analisou-se a temperatura adimensional $[(T - T_a)/(T_0 - T_a)]$ dos grãos em relação ao tempo de aeração para três diferentes velocidades do ar (Figura 1). Dessa forma, é possível perceber que inicialmente, a taxa de resfriamento é baixa. Isto ocorre porque “a temperatura do ar que retira o calor dos grãos das secções anteriores, mais próximas à entrada de ar, cresce e reduz a capacidade do ar de resfriar as camadas mais distantes.” (OLIVEIRA, KHATCHATOURIAN E BIHAIN, p.250, 2007). Em seguida, ocorre um aumento significativo na taxa de resfriamento, representando a fase principal do processo. Finalmente, ocorre um resfriamento lento à medida que a temperatura dos grãos converge para a temperatura inicial do ar, como observa-se na figura a seguir.

Figura 1 - Temperatura adimensional $[(T - T_a)/(T_0 - T_a)]$ dos grãos de soja para três diferentes velocidades do ar

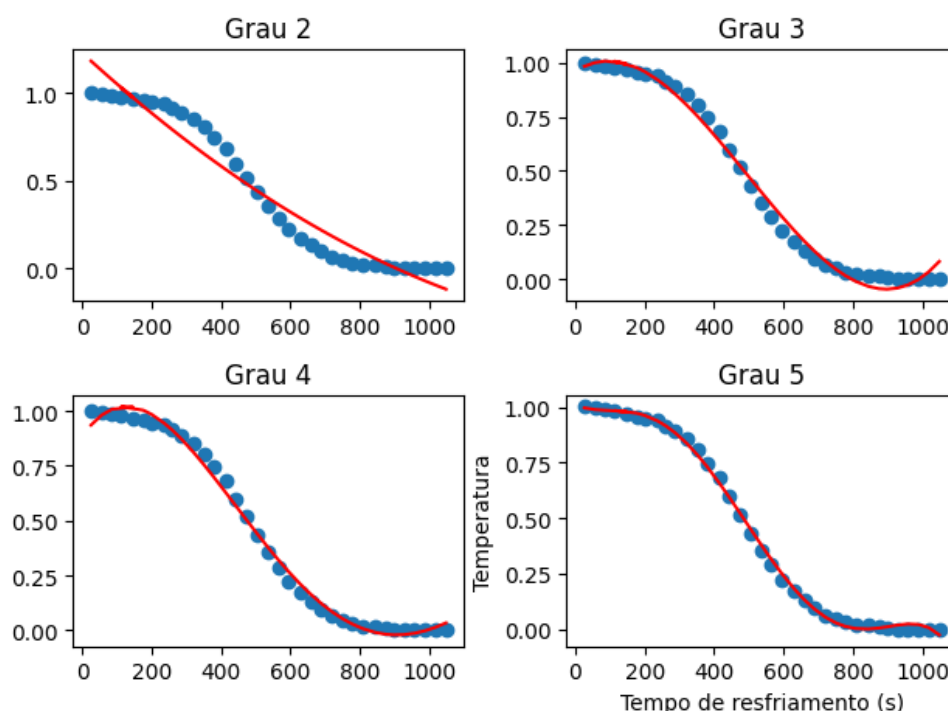


Fonte: Os autores, 2023.

A elevação da velocidade do ar intensifica o ritmo de resfriamento, proporcionando uma maior quantidade de ar frio à massa de grãos em um período específico. Tendo isto em vista, procurou-se fazer um ajuste de curvas através da regressão polinomial. Esta técnica de

análise estatística permite ajustar curvas mais complexas a dados que não podem ser representados por uma linha reta. Sendo assim, ao comparar regressões polinomiais de diferentes graus, é comum traçar os resultados em um gráfico, mostrando as curvas ajustadas junto com os dados reais, conforme observado na Figura 2.

Figura 2 – Ajuste de Curvas utilizando diferentes graus para a Regressão Polinomial acerca dos dados experimentais da temperatura adimensional para velocidade do ar de $0,23 \text{ m s}^{-1}$



Fonte: Os autores, 2023.

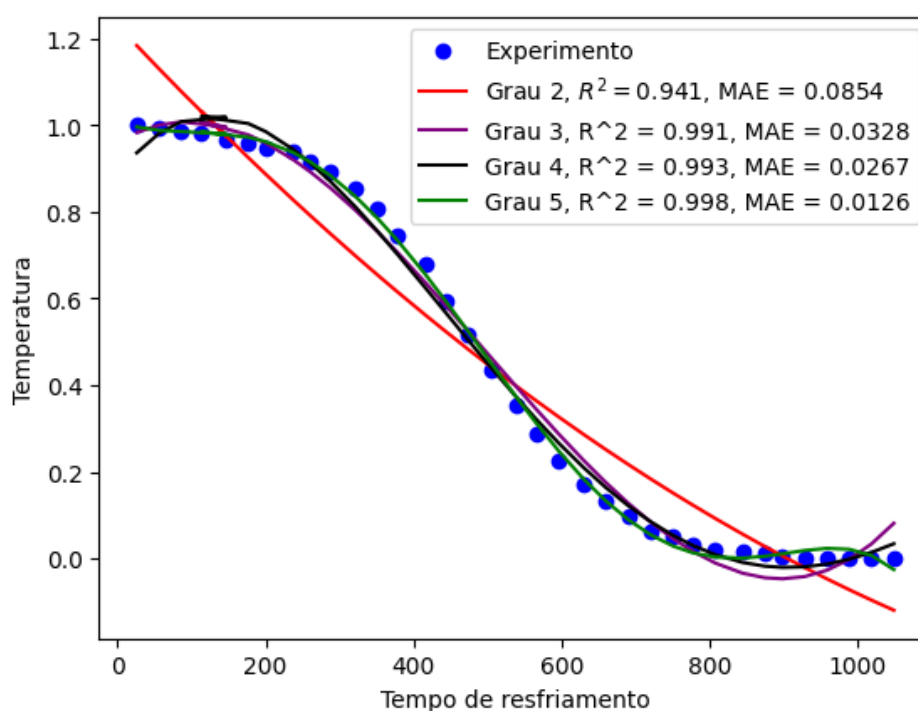
Conforme verificamos visualmente na Figura 2, as curvas ajustadas do grau 3, 4 e 5 demonstram proximidade aos dados originais, sendo a regressão polinomial de grau 2 o ajuste que menos se aproximou dos dados experimentais. Além da avaliação visual do ajuste e da complexidade das curvas, calcular e comparar tanto o Coeficiente de Determinação (R^2) quanto o Erro Absoluto Médio (MAE) ajuda a tomar uma decisão sobre qual grau de polinômio é mais apropriado aos dados.

Cada uma dessas métricas fornece informações complementares sobre o desempenho dos modelos em relação aos dados observados. O R^2 é uma medida que varia de 0 a 1 e indica a proporção da variabilidade total da variável dependente que é explicada pelo modelo. Um

valor próximo de 1 indica que o modelo se ajusta muito bem aos dados, explicando a maior parte da variação.

Já o erro absoluto médio (MAE) mede o tamanho médio dos erros entre as previsões do modelo e os valores reais. Quanto menor o MAE, melhor o modelo se ajusta aos dados, pois isso significa que as previsões estão mais próximas dos valores reais. Podemos observar estas duas métricas na figura a seguir.

Figura 3 - Comparação entre os diferentes graus de Regressão Polinomial, tendo em vista o R^2 e o MAE, acerca dos dados experimentais da temperatura adimensional para velocidade do ar de $0,23 \text{ m s}^{-1}$



Fonte: Os autores, 2023.

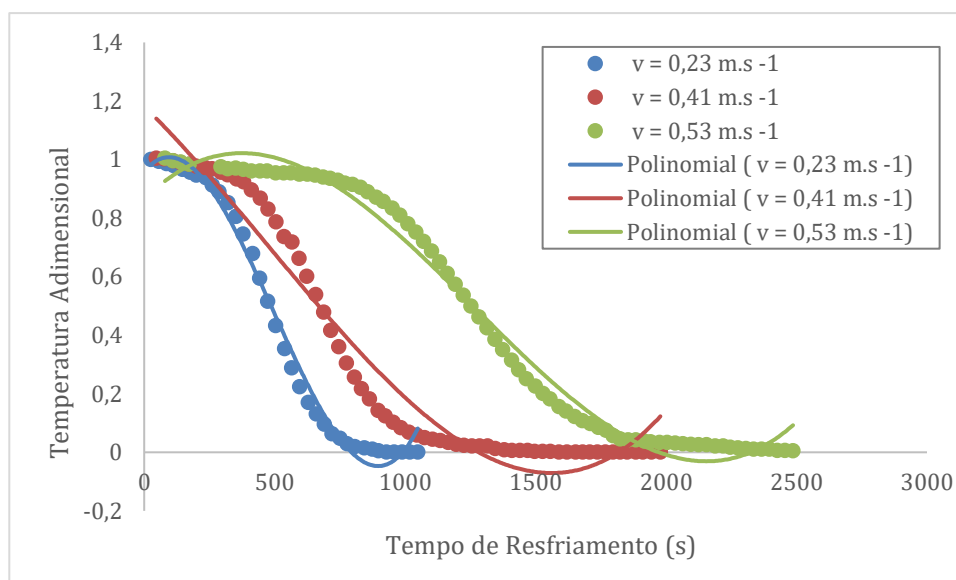
Com base nas métricas apresentadas na Figura 3, podemos fazer algumas considerações: percebe-se que o coeficiente de variação aumenta conforme aumentamos o grau do polinômio e que o erro médio absoluto diminui à medida que o grau do polinômio cresce. Desta forma, a regressão polinomial de grau 2 apresentou bom coeficiente de variação e um erro médio absoluto um pouco maior do que os outros ajustes. Entretanto, a regressão polinomial de grau 5 apresentou o mais alto R^2 e o menor MAE dentre os ajustes analisados.

Desta forma, com base no R^2 e no MAE, a regressão polinomial de grau 5 parece ser o ajuste mais preciso para os dados, já que tem o maior valor de R^2 (indicando um ajuste

excelente) e o menor valor de MAE (indicando um erro médio absoluto menor). Entretanto, modelos mais complexos (com graus mais altos) podem se ajustar bem aos dados de treinamento, mas podem ter um desempenho inferior em novos dados (*overfitting*).

Desta forma, assumindo uma preocupação com a capacidade do modelo de se ajustar a novos dados, optamos por testar um modelo de grau mais baixo (Figura 4), como a regressão polinomial de grau 3, que ainda tem um R^2 alto e um MAE bastante baixo.

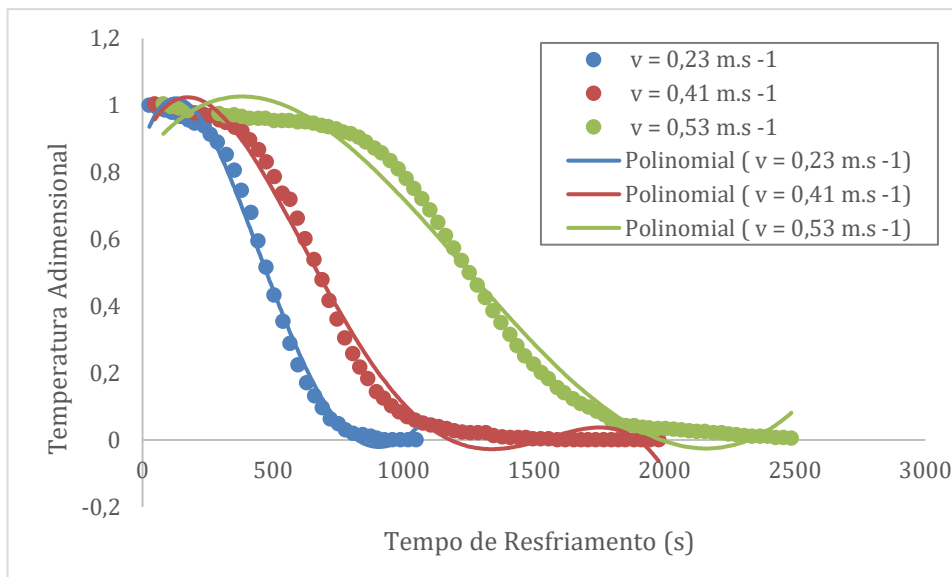
Figura 4 – Curva ajustada a partir dos dados experimentais da temperatura adimensional para três diferentes velocidades do ar, utilizando regressão polinomial de grau 3.



Fonte: Os autores, 2023.

Podemos perceber, conforme a Figura 4, que a regressão polinomial de grau 3, quando comparada aos dados obtidos nas outras duas velocidades do ar ($0,41 \text{ m s}^{-1}$ e $0,53 \text{ m s}^{-1}$), visualmente, não se ajusta tão bem quanto a regressão de grau 4 (Figura 5).

Figura 5 – Curva ajustada a partir dos dados experimentais da temperatura adimensional para três diferentes velocidades do ar, utilizando regressão polinomial de grau 4.



Fonte: Os autores, 2023.

Desta forma, optando-se pela utilização da regressão polinomial de grau 4, devido ao seu melhor ajuste aos dados, obteve-se as seguintes funções polinomiais para as diferentes velocidades do ar: para $v = 0,23 \text{ m s}^{-1}$, $y = -4\text{E-}12x^4 + 1\text{E-}08x^3 - 1\text{E-}05x^2 + 0,0024x + 0,8816$; para $v = 0,41 \text{ m s}^{-1}$, $y = -1\text{E-}12x^4 + 4\text{E-}09x^3 - 6\text{E-}06x^2 + 0,0016x + 0,8944$; para $v = 0,53 \text{ m s}^{-1}$, $y = -3\text{E-}14x^4 + 5\text{E-}10x^3 - 2\text{E-}06x^2 + 0,001x + 0,8425$.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o objetivo definido para esta pesquisa, foi possível estabelecer um modelo matemático para o processo de resfriamento, tendo como base o tempo de aeração para três velocidades diferentes de ar. Mediante a aplicação do ajuste de curvas, especificamente a Regressão Polinomial, os coeficientes dos modelos matemáticos foram identificados, resultando em valores notáveis para o R^2 , sendo de 99,39%, 99,16% e 98,69% para as seguintes velocidades do ar, respectivamente, $0,23 \text{ m s}^{-1}$, $0,41 \text{ m s}^{-1}$ e $0,53 \text{ m s}^{-1}$.

A regressão polinomial permite modelar relações mais flexíveis e curvas mais complexas, mas é importante ter em mente que o uso de graus polinomiais muito altos pode levar a problemas de sobreajuste, onde o modelo se adapta muito bem aos dados de treinamento,



mas não generaliza bem para novos dados. Portanto, a escolha do grau do polinômio deve ser feita com cuidado e pode envolver algumas métricas como o R^2 e o MAE.

Ademais, a exploração e a formulação de modelos que delineiem o processo de resfriamento dos grãos dentro de um silo detêm grande relevância, uma vez que assegurar condições ideais de temperatura e umidade é essencial para mitigar riscos como ataques de insetos e degradação das propriedades físico-químicas dos grãos. Desta forma, fica clara a importância da aeração como técnica indispensável para preservar os grãos em boas condições até a sua comercialização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MOLUGARAM, K.; RAO, G. Curve fitting. In: ____ (org.). Statistical Techniques for Transportation Engineering. Butterworth-Heinemann, 2017. p. 281-292.
- NAVARRO, S. Advanced grain storage methods for quality preservation and insect control base don aerated or hermetic storage and ipm. J.Agric. Eng., v. 49, p. 13–20, 2012.
- OLIVEIRA, F. A. de; KHATCHATOURIAN, O. A.; BIHAIN, A. Estado térmico de produtos armazenados em silos com sistema de aeração: estudo teórico e experimental. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 247-258, 2007.
- ZIEGLER, V.; PARAGINSKI, R. T.; FERREIRA, C. D. Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality - a review. Journal of Stored Products Research, v. 91, p. 1-9, 2021.