



aeration time for different heights of the grain mass. To achieve this objective, through the Octave programming language, adjustments were made to polynomial curves of data found in a study by Oliveira, Khatchatourian and Bihain (2007), which provides information on the cooling behavior of grains in four traces of an experimental silo built by the researchers, located at different heights of the stored grain mass. The results demonstrated that, among the tests performed, the adjustment of polynomial curves of degree 4 represents the experimental data well, thanks to the significant results of the determination coefficients, except for the case of the section of the silo located at a height of 0.15 meters, which presented a determination coefficient of 95.33%. In addition, the studies presented that the statements of the silos located at a lower height had faster and that, for all the heights evidenced, the cooling starts slowly, passing to a sharp drop in temperature and ending the process with a slow cooling, again. In view of the above, it is concluded that the regression used was partially satisfactory for this study and that, in fact, the grain concentrate is not uniform at the different heights of the mass of grains stored in a silo.

Keywords: Grain Aeration. Grain Cooling. Mathematical Modeling.

INTRODUÇÃO

Além dos cuidados com o processo de plantio e colheita, a produção de grãos exige controles rigorosos nos processos que sucedem estas etapas, onde destaca-se o armazenamento de grãos. No processo de armazenamento de grãos, a aeração tem papel fundamental, evitando a deterioração dos grãos, causada por níveis inadequados de temperatura e umidade. Neste processo de pós-colheita, a massa de grãos é resfriada, com o objetivo de manter os grãos com temperatura adequada e homogênea, o que ocorre através do funcionamento de ventiladores que forçam a passagem do ar ambiente pela massa de grãos (FAORO, 2018).

Apesar de a aeração ser um sistema eficiente, fatores físicos impedem que o resfriamento ocorra de forma uniforme em toda massa de grãos armazenada no silo. Segundo Khatchatourian et. al. (2017), a falta de uniformidade de temperatura em um silo pode ocorrer tanto verticalmente como horizontalmente. Assim, para que o processo de aeração seja totalmente compreendido é ideal entender como se comporta o resfriamento dos grãos nas diferentes seções da massa de grãos armazenada no silo, podendo-se evitar problemas no grão causados pelo mal resfriamento, como é o caso do surgimento de fungos.

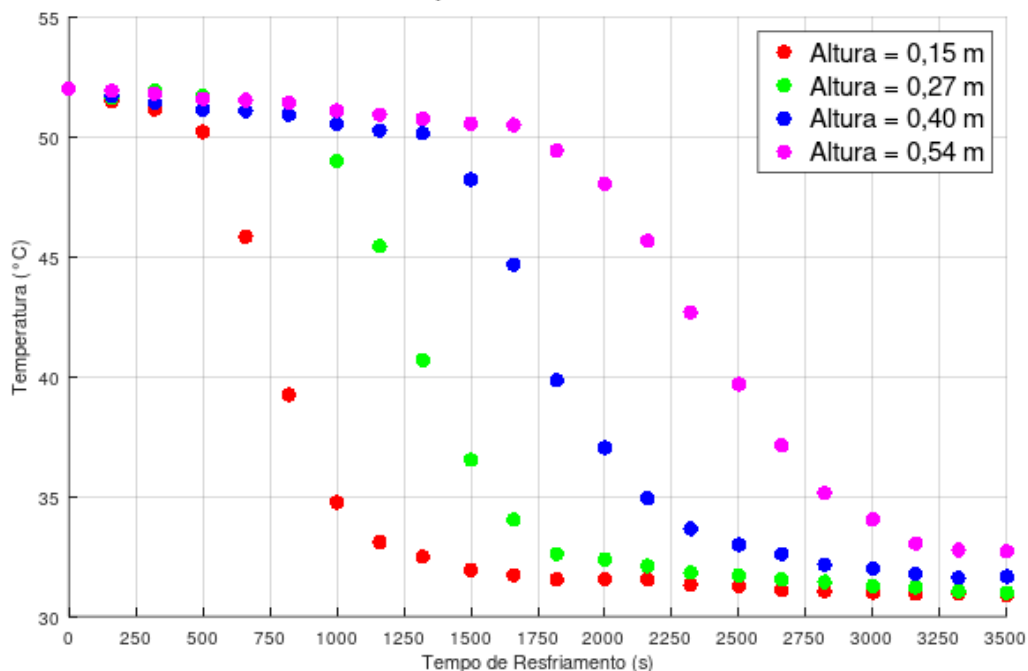
Uma das formas de compreender o comportamento do resfriamento dos grãos em diferentes seções de um silo, é por meio da modelagem matemática. Dessa forma, este trabalho tem o objetivo de modelar matematicamente o resfriamento de grãos de soja em



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para iniciar o processo de modelagem matemática dos dados coletados no estudo de Oliveira, Khatchatourian e Bihain (2007) e extraídos na plataforma Automeris.io, analisou-se a variação da temperatura em função do tempo de resfriamento para as quatro alturas (h) da massa de grãos de soja em análise (Figura 1).

Figura 1 - Gráfico de Dispersão do Resfriamento (°C) dos grãos em função do Tempo (s) para uma velocidade de aeração de 0,23 m.s⁻¹.



Fonte: Os Autores, 2024.

Analisando-se o gráfico acima percebe-se que é possível dividir o resfriamento dos grãos em três fases: a primeira com um resfriamento lento, a segunda com um resfriamento rápido e a terceira novamente com um resfriamento lento.

No entanto, estas fases não são idênticas para todas as alturas da massa de grãos, visto que quanto menor a altura mais precocemente iniciará a segunda fase de resfriamento, já que os grãos estarão mais próximos da entrada de ar. É possível perceber isso, comparando as seções de menor e maior altura. Na seção localizada à altura de 0,15 metros, a temperatura começa a cair de forma acentuada próximo aos 500 segundos de aeração, enquanto que na



seção localizada à altura de 0,54 metros, essa queda da temperatura ocorre apenas após os 1750 segundos, aproximadamente.

Ao discorrerem sobre as três etapas mencionadas acima, Oliveira, Khatchatourian e Bihain (2007, p. 251) justificam este comportamento do resfriamento dos grãos, afirmando que,

No início, a camada considerada está sendo ventilada por ar aquecido pelas camadas anteriores, “esperando” a chegada do ar frio. À medida que ocorre o resfriamento das camadas anteriores, o ar que passa pela camada considerada possui a temperatura cada vez menor. A taxa de resfriamento dos grãos, que é proporcional à diferença entre as temperaturas do grão e do ar, aumenta. Posteriormente, essa diferença reduz-se devido à diminuição da temperatura do grão pelo resfriamento.

Os autores em questão, ainda colocam que a temperatura, em cada instante considerado, varia com o tempo de aeração e com a altura, influenciando a variação da difusividade térmica da massa de grãos.

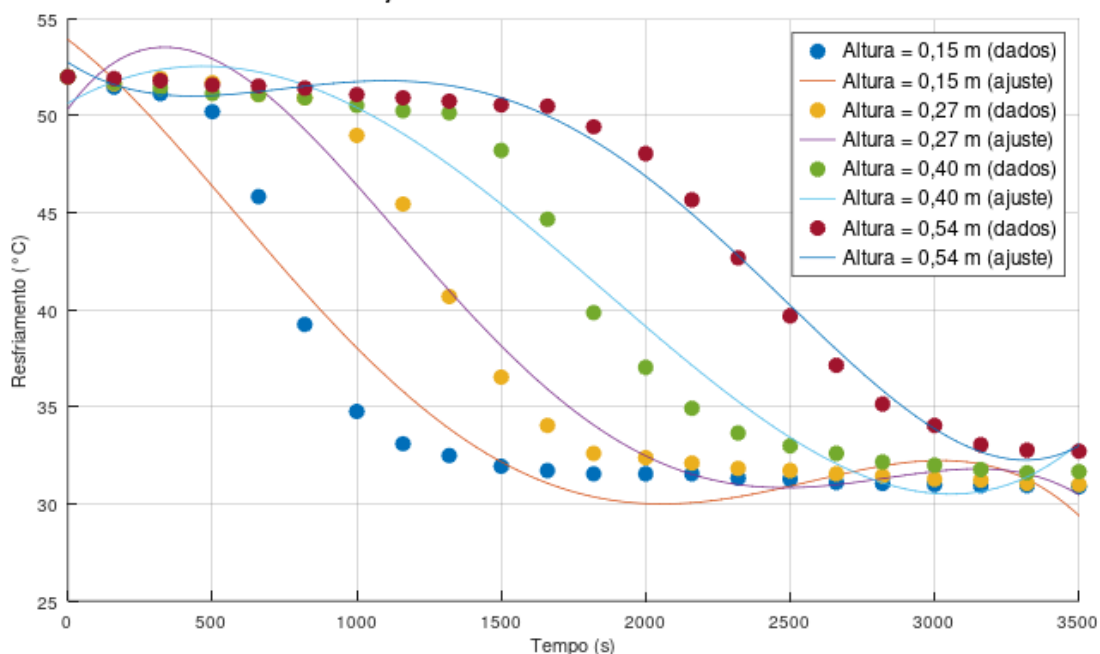
Considerando os diferentes comportamentos do resfriamento dos grãos em cada seção da massa de grãos, optou-se pela realização de Ajustes de Curvas Polinomiais, um para cada uma das quatro seções em análise, através da linguagem computacional Octave. A escolha do grau do polinômio foi feita por meio do Coeficiente de Determinação (R^2), sendo que foram realizados testes para os graus 2, 3 e 4. Segundo Guimarães e Azevedo (2020, p.357) o Coeficiente de Determinação, comumente chamado de R^2 , “permite indicar quão adequadas serão as previsões feitas com base na reta de regressão”.

Dessa forma, através da análise do coeficiente de determinação, constatou-se que o grau 2 não é adequado para a modelagem desta situação, visto que o R^2 variou de 89,77% ($h = 0,4$ m) a 95,44% ($h = 0,54$ m) dentre as quatro alturas analisadas, percentuais que demonstram que os polinômios estão pouco ajustados aos dados experimentais. No caso do grau 3, a variação do R^2 foi de 93,41% ($h = 0,15$ m) a 97,10% ($h = 0,4$ m), o que são valores aceitáveis. Os polinômios de grau 4 foram, dentre os testes realizados, os que apresentaram maiores percentuais para o R^2 , variando de 95,33% ($h = 0,15$ m) a 99,34% ($h = 0,54$ m), que demonstram que a curva ajustada tem uma discrepância em relação aos dados experimentais, mas não tão elevada.

Diante disso, buscando-se maior confiabilidade no ajuste de curvas, optou-se apresentar os resultados do ajuste de curvas polinomial de grau 4. Na Figura 2 é apresentado o gráfico com as curvas ajustadas para cada uma das alturas analisadas.



Figura 2 - Ajuste de Curvas Polinomial de grau 4 do Resfriamento dos Grãos para quatro alturas da massa de grãos, a uma velocidade de aeração de 0,23 m.s⁻¹.



Fonte: Os autores, 2024.

Os modelos matemáticos resultantes deste ajuste de curvas estão apresentados no Quadro 1, com seus respectivos coeficientes de determinação (R²).

Quadro 1 - Modelos Matemáticos resultantes do ajuste de curvas polinomial de ordem 4

ALTURA	MODELOS MATEMÁTICOS	R ²
h = 0,15 m	$y = -1,3E-12x^4 + 8,197E-09x^3 - 1,156E-05x^2 - 0,0112x + 53,92$	95,33%
h = 0,27 m	$y = -1,975E-12x^4 + 1,571E-08x^3 - 3,832E-05x^2 + 0,0206x + 50,35$	98,14%
h = 0,40 m	$y = 2,45E-13x^4 + 8,163E-10x^3 - 9,687E-06x^2 + 8,395E-03x + 50,65$	97,16%
h = 0,54 m	$y = 1,525E-12x^4 - 9,860E-09x^3 + 1,696E-05x^2 - 9,622E-03x + 52,75$	99,34%

Fonte: Os autores, 2024



GUIMARÃES, L. M.; AZEVEDO, J. B. **Estatística Aplicada em Engenharia**. Santa Rita do Sapucaí: Publicação Independente, 2020.

KHATCHATOURIAN, O. *et al.* Models to predict the thermal state of rice stored in aerated vertical silos. **Biosystems Engineering**. v. 161, p. 14-23, 2017.

MOLUGARAM, K.; RAO, G. **Statistical Techniques for Transportation Engineering**. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2017. p. 281-292.

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.