



MODELAGEM MATEMÁTICA DO RESFRIAMENTO DE GRÃOS PARA DIFERENTES ALTURAS DA MASSA DE GRÃOS ¹

**Jeancarlo Fiorentini², Maurício de Campos³, Marcia de Fatima Brondani Binelo⁴,
Manuel Osorio Binelo⁵**

¹Trabalho desenvolvido 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 Professor do Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijuí

⁴ Professora do Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijuí

⁵ Professor do Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Unijuí

RESUMO

A aeração de grãos, que consiste na ventilação forçada de ar ambiente no interior dos silos para o resfriamento dos grãos e manutenção de uma temperatura adequada, é uma etapa indispensável do armazenamento de grãos, garantindo a qualidade do produto armazenado e evitando perdas por deterioração. Para melhorar a eficiência deste importante processo, é pertinente analisar como se comporta o resfriamento dos grãos nas diferentes partes do silo, o que pode ser feito através da Modelagem Matemática. Dessa forma, o presente trabalho tem o objetivo de modelar matematicamente o resfriamento de grãos de soja em função do tempo de aeração para diferentes alturas da massa de grãos. Para cumprir com esse objetivo, por meio da linguagem de programação Octave, foram feitos ajustes de curvas polinomiais de dados coletados em um estudo de Oliveira, Khatchatourian e Bihain (2007), que trazem informações sobre o comportamento do resfriamento dos grãos em quatro seções de um silo experimental construído pelos respectivos pesquisadores, seções essas, localizadas em diferentes alturas da massa de grãos armazenada. Os resultados demonstraram que, dentre os testes realizados, o ajuste de curvas polinomial de grau 4 representa bem os dados experimentais, graças aos resultados satisfatórios dos coeficientes de determinação, exceto para o caso da seção do silo localizada a 0,15 metros de altura, que apresentou um coeficiente de determinação de 95,33%. Além disso, os estudos demonstraram que as seções do silos localizadas em menor altura tiveram resfriamento mais rápido e que, para todas as alturas analisadas, o resfriamento inicia lentamente, passando para uma queda acentuada da temperatura e finalizando o processo com um resfriamento lento, novamente. Diante do exposto, conclui-se que a regressão utilizada foi parcialmente satisfatória para este estudo e que, de fato, o resfriamento dos grãos não é uniforme nas diferentes alturas da massa de grãos armazenada em um silo.

Palavras-chave: Aeração de Grãos. Resfriamento de Grãos. Modelagem Matemática.

ABSTRACT

Grain aeration, which consists of forced ventilation of the environment inside the silos to cool the grains and maintain an adequate temperature, is an unnecessary step in grain storage, ensuring the quality of the stored product and avoiding losses due to reserves. To improve the efficiency of this important process, it is pertinent to analyze how grain cooling behaves in different parts of the silo, which can be done through Mathematical Modeling. Thus, the present work aims to mathematically model the cooling of soybeans as a function of the



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.

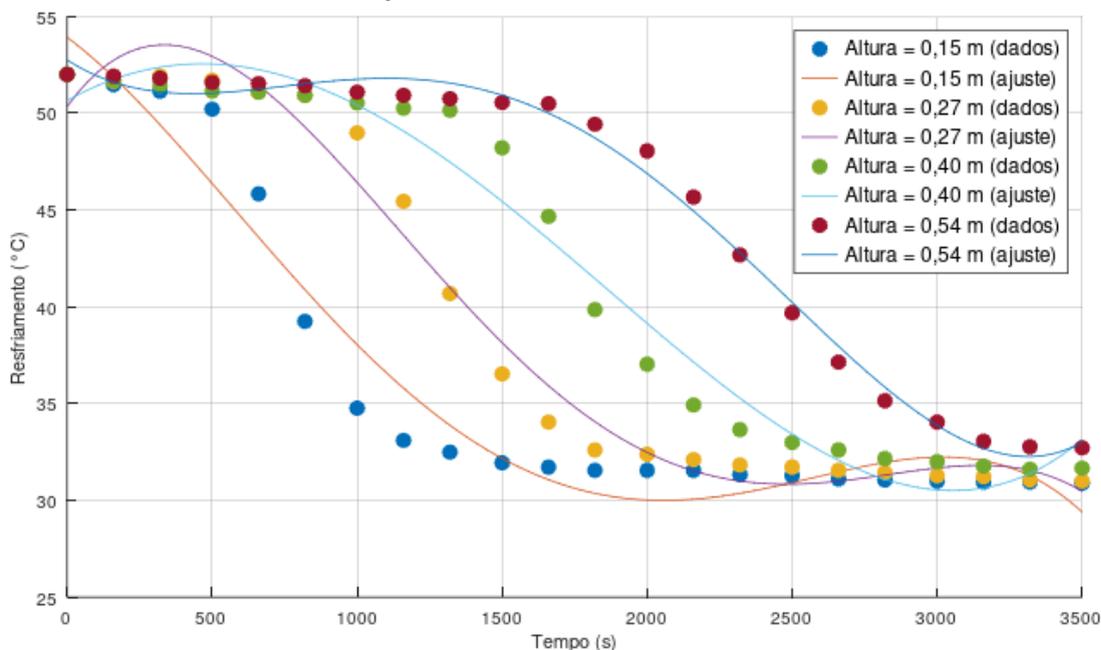
Considerando os diferentes comportamentos do resfriamento dos grãos em cada seção da massa de grãos, optou-se pela realização de Ajustes de Curvas Polinomiais, um para cada uma das quatro seções em análise, através da linguagem computacional Octave. A escolha do grau do polinômio foi feita por meio do 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 predições 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



Analisando-se o Quadro 1, percebe-se que a altura de 0,54 metros foi a que teve seus dados melhor representados pelo ajuste de curvas, visto que o modelo resultante alcançou um R^2 de 99,34%. A altura de 0,15 metros foi a que teve seus dados menos representados pelo modelo matemático resultante do ajuste de curvas, apresentando um R^2 de 95,33%.

Para finalizar as análises, é importante ressaltar que apesar de este estudo ter optado por realizar o processo de modelagem matemática por meio de ajuste de curvas do tipo polinomial, outras formas de ajuste de curvas provavelmente representam melhor os dados experimentais que foram analisados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, pode-se afirmar que o objetivo de modelar matematicamente o resfriamento de grãos de soja para diferentes seções da massa de grãos foi atingido. Por meio de um ajuste de curvas polinomial de ordem 4, realizado por meio da linguagem computacional Octave, encontrou-se os modelos matemáticos que representam o comportamento do resfriamento de grãos de soja para quatro alturas do silo experimental.

Os modelos apresentaram coeficiente de determinação (R^2) de 95,33%, 98,53%, 97,16% e 99,14% para as alturas de 0,15 metros, 0,27 metros, 0,40 metros e 0,54 metros, respectivamente. Estes percentuais demonstraram que o ajuste de curvas foi muito eficiente para a seção localizada a altura de 0,54 metros, o que não aconteceu com a seção do silo localizada a altura de 0,15 metros, onde o modelo matemático não representou os dados experimentais de forma tão satisfatória.

Uma solução para que o ajuste de curvas se mostrasse mais eficiente, seria aumentar o grau do polinômio. No entanto, regressões com graus muito elevados podem ocasionar outros problemas, como é o caso da dificuldade do modelo se adaptar a novos dados. Dessa forma, conclui-se que para que o ajuste de curvas venha a resultar em modelos confiáveis para todas as alturas analisadas, seria necessário substituir a regressão polinomial por outros tipos, mais complexos e eficazes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FAORO, V. **Modelagem Matemática e Otimização do Fluxo de Ar em Armazéns Graneleiros**. Tese de Doutorado. Ijuí, RS: Unijuí, 2018.



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.