ISSN 1806-6399

PERQUIRERE

Engenharias, Ciências Exatas e da Terra

Revista do Centro Universitário de Patos de Minas
vol. 22, n. 2 - maio/ago. de 2025

UNIPAM
Educação que transforma
Centro Universitário de Patos de Minas

Revista Perquirere

Revista do Centro Universitário de Patos de Minas

ISSN 1806-6399
Volume 22, número 2, maio/ago. 2025
Patos de Minas: Perquirere, UNIPAM, v. 22, n. 2, maio/ago. 2025: 1-255

Centro Universitário de Patos de Minas

Núcleo de Editoria e Publicações

UNIPAM | Centro Universitário de Patos se Minas

Reitor
Henrique Carivaldo de Mirando Neto

Pró-reitora de Ensino, Pesquisa e Extensão
Maria Marta do Couto Pereira Rodrigues

Pró-reitor de Planejamento, Administração e Finanças
Pablo Fonseca da Cunha

Coordenadora de Extensão
Adriana de Lanna Malta Tredezini

Diretora de Graduação
Mônica Soares de Araújo Guimarães

Coordenador do Núcleo de Editoria e Publicações
Geovane Fernandes Caixeta

A Revista **Perquirere** é uma publicação do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), de acesso gratuito, destinada, primordialmente, a divulgar a produção oriunda do programa de iniciação científica (PIBIC) mantido pela instituição.

P447 Perquirere [recurso eletrônico] / Centro Universitário de Patos de Minas. – Dados eletrônicos. – N. 1 (2004)-. – Patos de Minas : UNIPAM, 2004-

Anual: 2004-2009. Semestral: 2010-2016. Trimestral: 2017-
Disponível em: <https://revistas.unipam.edu.br>
ISSN 1806-6399

1. Periódicos – interdisciplinar. 2. Ciências biológicas. 3. Saúde. 4. Engenharia. 5. Letras – artes. I. Centro Universitário de Patos Minas. II. Título.

CDD 056.9

Centro Universitário de Patos de Minas
Rua Major Gote, 808 – Caiçaras
38702-054, Patos de Minas - MG, Brasil

NEP | Núcleo de Editoria e Publicações
Telefone: (34) 3823-0341
http://nep.unipam.edu.br

Revista Perquirere © Revista do Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere
E-mail: perquirere@unipam.edu.br

EDITOR
Geovane Fernandes Caixeta

CONSELHO EDITORIAL

Ciências Biológicas e da Saúde
Adriana Cristina de Santana (UNIPAM)
Bethânia Cristhine de Araújo (UNIPAM)
Célio Marcos dos Reis Ferreira (UFVJM)
Daniela Resende de Moraes Salles (UNIPAC – Araguari)
Franciele Maria Caixeta (UNIPAM)
Gilson Caixeta Borges (UNIPAM)
Isa Ribeiro de Oliveira Dantas (UNIPAM)
José Alfredo Dixini (UNIPAM)
Juliana Ribeiro Gouveia Reis (UNIPAM)
Karyna Maria de Mello Locatelli (UNIPAM)
Luciana de Almeida França (UNIPAM)
Luiz Henrique dos Santos (UNIPAM)
Marilene Rivany Nunes (UNIPAM)
Maura Regina Guimarães Rabelo (UNIPAM)
Milce Burgos Ferreira (UNIPAM)
Nádia Camila Rodrigues Costa Caixeta (UNIPAM)
Natália de Fátima Gonçalves Amâncio (UNIPAM)
Norma Aparecida Borges Bittar (UNIPAM)
Odilene Gonçalves (UNIPAM)
Priscila Capelari Orsolin (UNIPAM)
Roane Caetano de Faria (UNIPAM)
Rosiane Gomes Silva Oliveira (UNIPAM)
Rosiane Soares Saturnino (UNIPAM)
Rossana Pierangeli Godinho Silva (UNIPAM)
Sandra Soares (UNIPAM)
Talita Marques da Silva (UNIPAM)

Engenharias, Ciências Exatas e Ciências da Terra
Alice Pratas Glycério de Freitas (UNIPAM)
Bruno Batista Gonçalves (UNIPAM)
Bruno Sérgio Vieira (UFU)
Carlos Henrique Eiterer de Souza (UNIPAM)
Eduardo Pains de Morais (UNIPAM)
Everaldo Antonio Lopes (UFV – Campus Rio Paranaíba)
Fábio de Brito Gontijo (UNIPAM)
Fernando Correa de Mello Junior (UNIPAM)
Fernando Dias da Silva (UNIPAM)
Guilherme Nascimento Cunha (UNIPAM)

Janaina Aparecida Pereira (UNIPAM)
Lucas Mendes da Silva (UNIPAM)
Mariana Assunção de Souza (UNIPAM)
Paulo Eduardo Silva Martins (UNIT)
Renata Nepomuceno da Cunha (UNIPAM)
Renato Ianhez (UNIPAM)
Sady Alexis Chavauty Valdes (UNIPAM)
Sandro de Paula Matias (UNIPAM)
Vinicius de Morais Machado (UNIPAM)
Walter Vieira da Cunha (UNIPAM)

Ciências Humanas, Ciências Sociais, Letras e Artes
Consuelo Nepomuceno (UNIPAM)
Elizete Maria da Silva Moreira (UNIPAM)
Frederico de Sousa Silva (UFU)
Gabriel Gomes Canedo Vieira de Magalhães (UNIPAM)
Guilherme Caixeta Borges (UNIPAM)
Helen Corrêa Solis Neves (UNIPAM)
Jarbas Menezes (UNIPAM)
Joana Darc dos Santos (UNIPAM)
João Paulo Alves de Faria (UNIPAM)
Laércio José Vida (UNIPAM)
Luís André Nepomuceno (UFV)
Marcos Antônio Caixeta Rassi (UNIPAM)
Maria Marta do Couto Pereira Rodrigues (UNIPAM)
Mônica Soares de Araújo Guimarães (UNIPAM)
Morisa Martins Jajah (UNIPAM)
Pedro Henrique de Sousa Ferreira (UNIPAM)
Sandro Ângelo de Andrade (UNIPAM)
Sueli Maria Coelho (UFMG)
Thiago Henrique Ferreira Vasconcelos (UNIPAM)
Valério Nepomuceno (UNIPAM)
Vidigal Fernandes Martins (UFU)

REVISÃO
Geovane Fernandes Caixeta
Rejane Maria Magalhães Melo

DIAGRAMAÇÃO E FORMATAÇÃO
Jordana Bastos Mesavila

SUMÁRIO

Criação massal da broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), em laboratório **9**
Maria Eduarda Sousa Caixeta
Walter Vieira da Cunha

Desenvolvimento inicial do algodoeiro em função de diferentes dosagens de fertilizante organomineral **16**
Maria Luiza de Oliveira Vasconcelos
Wellington Ferrari da Silva

Difusão de fósforo no solo a partir de fertilizantes fosfatados cogranulados com óxido de grafeno **26**
Pedro Paulo Andrade de Souza Melo
Victor Gustavo Soares Ribeiro
Sandra Lúcia Nogueira

Doses e fontes de adubação fosfatada no desenvolvimento do algodoeiro **38**
Flávia Marina Sousa Corrêia
Diego Henrique da Mota

Efeitos de fontes e doses de boro em plantas de soja **48**
Maycon Douglas Silva de Assis
Carlos Henrique Eiterer de Souza

Estimativa de produtividade de silagem de milho por meio de imagem NDVI **58**
Muriel Cardoso Rosa
Rodrigo Mendes de Oliveira

Fitotoxidade em soja por protioconazol e atenuação de estresse oxidativo pelo uso de mancozeb e micronutrientes **65**
Ana Cecília de Lima Pereira
Luís Henrique Soares

Identificação de tolerância ao glifosato e ao glufosinato em linhagens de milho (*Zea mays*) **74**
Daniela Liboredo e Souza
Guilherme Mateus de Andrade
Walter Vieira da Cunha

Larva de *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) na biodegradação do Poliestireno Expandido **81**
Rafaela Camila Bontempo
Elisa Queiroz Garcia

Tolerância do trigo submetido a diferentes teores de alumínio em solução nutritiva **92**
Laysa Cristina de Melo Silva
Mauricio Antônio de Oliveira Coelho

Umidade e temperatura dos solos sob restos culturais **100**
Almir Fernandes Oliveira
Luis Henrique Soares

Qualidade fisiológica de sementes de milho, soja e trigo tratadas com o micronutriente vanádio **111**
Laureane Verissimo Soares
Wellington Ferrari da Silva

Uso de nematicidas em mudas de café no controle do nematoide *meloidogyne exigua* **127**
Afonso de Andrade Oliveira
Carlos Henrique Eiterer de Souza

Desenvolvimento de placa de aquisição de sinais trifásicos de tensão e corrente para uso nos laboratórios do UNIPAM **134**
Murilo Machado de Matos
Victor Henrique da Cunha Faria

Projeto e desenvolvimento de sistema de automação industrial com sistema supervisório e plano de manutenção integrado para uma unidade de beneficiamento de sementes **156**
Heric Santos Pereira
Gaspar Eugênio Oliveira Ramos

Comparativo entre soldagem GTAW e SMAW na soldagem de ferro fundido **174**
Clanderson Henrique da Silva
Janaína Aparecida Pereira

Inovação no desempenho de fluidos de corte: nanopartículas de prata e de óxido de zinco como aditivos multifuncionais **195**
Sarah Cristina Magalhães Machado
Hugo Campos Lima Silva
Sandra Lúcia Nogueira

Modelagem numérica do coeficiente de transferência de calor por convecção em sistemas aletados segundo ondas quadradas aleatórias **211**
João Vitor Pereira
Bruno Batista Gonçalves

Torra de café: proposta de automação do sistema de aquecimento a gás **227**

Nathan Brennier de Lima Caetano
Guilherme Antonio Moreira de Faria
Sandra Lúcia Nogueira

Investigação do DNA de *brucella abortus* em sêmen de touros de centrais de inseminação artificial 248
Tiago Henrique Gonçalves
Mariana Assunção de Souza
Luiz Flávio Nepomuceno do Nascimento

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 09-15, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Criação massal da broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), em laboratório

Mass rearing of the coffee berry borer, Hypothenemus hampei (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), in the laboratory

MARIA EDUARDA SOUSA CAIXETA
Discente de Agronomia (UNIPAM)
mariasousa1@unipam.edu.br

WALTER VIEIRA DA CUNHA
Professor orientador (UNIPAM)
walter@unipam.edu.br

Resumo: O Brasil destaca-se na produção de café e para isso é necessário manter altas produtividades. No entanto, a broca-do-café é uma das principais pragas que afetam a cultura, trazendo prejuízos qualitativos e quantitativos. A criação do inseto em laboratório é uma alternativa para desenvolver pesquisas de controle dessa praga. O objetivo deste trabalho foi estabelecer dieta artificial para criação massal de H. *hampei* em laboratório. O experimento foi conduzido no Laboratório GENEB do UNIPAM. Primeiramente, foi feita dieta para colocar as brocas que foram retiradas de frutos de café desinfestados. Posteriormente, foram feitas quatro dietas diferentes para as avaliações; após sete dias, foram acrescentadas 20 brocas adultas e incubadas em ambiente climatizado. Aos 80 dias de incubação, foram quantificados os indivíduos obtidos. Alcançou-se uma média de 307, 237, 57 e 36 indivíduos totais nas dietas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. As dietas 1 e 2 modificadas obtiveram estatisticamente maior número de indivíduos de H. *hampei*. Concluiu-se que foram estabelecidas duas dietas artificiais para criação massal de broca-do-café (*Hypothenemus hampei*) em laboratório.
Palavras-chaves: *Coffea arabica*; criação de insetos; dietas artificiais.

Abstract: Brazil stands out in coffee production, which requires maintaining high productivity levels. However, the coffee berry borer is one of the main pests affecting the crop, causing both qualitative and quantitative losses. Laboratory rearing of this insect is an alternative for developing control strategies. This study aimed to establish an artificial diet for the mass rearing of H. *hampei* under laboratory conditions. The experiment was conducted at the GENEB Laboratory of UNIPAM. Initially, a base diet was prepared, and borers were collected from disinfested coffee berries. Subsequently, four different diets were formulated for evaluation. After seven days, 20 adult borers were introduced and incubated in a controlled environment. After 80 days of incubation, the number of individuals was recorded. An average of 307, 237, 57, and 36 total individuals were obtained in diets 1, 2, 3, and 4, respectively. Diets 1 and 2 showed a statistically higher number of H. *hampei* individuals. It was concluded that two artificial diets

were successfully established for the mass rearing of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in the laboratory.
keywords: *Coffea arabica*; insect rearing; artificial diets.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café (*Coffea arabica*). Nesse viés, o café da espécie arábica é o mais importante na comercialização mundialmente. Na safra de 2023, a produção total foi de aproximadamente 39 milhões de sacas beneficiadas, sendo cerca de 19% superior à safra do ano anterior, com destaque dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná (CONAB, 2023).

O agronegócio cafeeiro tem vínculo com o desenvolvimento do país, visto que influenciou fortemente a estruturação de diversas regiões, consolidando o produto como uma das mais importantes bebidas, exercendo papel fundamental na economia. Embora a sua agregação no valor às exportações apresente dificuldades, tem relativa importância para a balança comercial e para a estrutura produtiva do agronegócio brasileiro (Soares *et al*., 2021). No entanto, há empecilhos que afetam a produtividade e a qualidade do café produzido, como doenças e pragas.

Entre as principais pragas causadoras de prejuízos na cultura, encontra-se a broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae, Scolytidae), que provoca danos aproximados de 500 milhões de dólares em todo o mundo anualmente. Seu primeiro prejuízo ocasionado na planta é a queda de frutos, enquanto os frutos brocados que permanecem na planta sofrem com a diminuição de peso do grão. Assim, os danos econômicos provocados pela broca-do-café iniciam-se quando a infestação atinge 3 a 5% nos frutos da maior florada (Reis *et al*., 2010; Reis; Souza; Melles, 1984), tornando-se necessário o controle da praga.

Para controlar o inseto, são utilizados inseticidas químicos que causam problemas no ecossistema e contaminam os alimentos e os agricultores quando usado de forma indevida (Santos *et al*., 2013; Molina *et al*., 2014). Outra dificuldade encontrada no uso de químicos para o controle da broca-do-café é o desequilíbrio que tais produtos provocam, como as explosões populacionais de pragas, a eliminação de insetos benéficos e a perda da eficiência de inseticidas, uma vez que, com o tempo, há a seleção de populações resistentes aos compostos químicos usados repetidas vezes (Santos *et al*., 2013).

Como alternativa viável para o controle da broca do cafeeiro, estudos de métodos de controle e da biologia do inseto precisam ser feitos, sendo importante que técnicas de criação e de multiplicação sejam estabelecidas. Contudo, definir uma metodologia para estabelecer a criação massal desse inseto é um obstáculo. Atualmente, a criação em laboratório através de dieta artificial vem possibilitando manter gerações sucessivas de broca-do-café. Entretanto, as dietas existentes não são eficientes; por esse motivo, é preciso que seja aperfeiçoado o sistema de criação desse inseto, modificando dietas, podendo, assim, dar continuidade a pesquisas de controle dessa importante praga da cafeicultura (Celestino, 2014). Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi estabelecer dieta artificial para a criação massal de H. *hampei* em laboratório.

2 METODOLOGIA

2.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO E ORIGEM DO MATERIAL

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Genética e Biotecnologia (GENEB), do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM). Para instalação do experimento foi utilizada sala de ambiente climatizado com temperatura de 25 ± 3° C e umidade relativa de 70 ± 15%, no escuro. Os frutos contendo brocas-do-café foram obtidos por meio de coletas em cafeeiros localizados na lavoura de café da Fazenda Canavial, Campus II, do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM).

2.2 ASSEPSIA DO MATERIAL

Para minimizar contaminações, os frutos obtidos foram desinfestados superficialmente através da imersão em álcool 70% por um minuto, depois em hipoclorito de sódio (NaClO) 5% por três minutos, e, por último, lavados em água corrente. Finalmente, para eliminar o excesso de umidade, eles foram secos com papel toalha e deixados na sombra por 24 horas.

Após isso, os frutos de café foram colocados em recipiente de coleta, conforme demonstrado no trabalho de Ferreira (2022), para facilitar a coleta dos insetos. Esse recipiente contava com uma tela fixada na parte de baixo, onde os insetos caiam em outro recipiente para serem realizadas as coletas. A cada três dias, as brocas-do-café encontradas no fundo do recipiente foram transferidas para dieta artificial, para seguir com o experimento.

2.3 CRIAÇÃO DA BROCA-DO-CAFÉ E AVALIAÇÃO DAS DIETAS ARTIFICIAIS

Foram preparadas quatro dietas artificiais com composições diferentes (Tabela 1), para ser feita a avaliação do número de descendentes da broca-de-café, de acordo com metodologia de Ferreira (2022).

Tabela 1: Composição das dietas artificiais utilizadas no ensaio

Ingredientes	Quantidade			
	Dieta 1*	Dieta 2*	Dieta 3**	Dieta 4**
Água	1 L	1 L	1 L	1 L
Ágar	13 g	13 g	18,4 g	18,4 g
Café cru moído	180 g	100 g	154 g	154 g
Café torrado moído	-	80 g	-	-
Sacarose	10 g	10 g	9,2 g	9,2 g
Caseína	15 g	15 g	15,4 g	15,4 g
Levedo de cerveja	15 g	15 g	15,4 g	15,4 g
Etanol	10 mL	10 mL	16 mL	16 mL
Ácido benzoico	1 g	1 g	-	1 g
Vitaminas de Vanderzant	0,5 g	0,5 g	-	0,5 g

Sais de Wesson	0,8 g	0,8 g	-	0,8 g
Formaldeído 37%	3,2 mL	3,2 mL	3,2 mL	3,2 mL
Nipagin	1,6 g	1,6 g	1,6 g	1,6 g
Sorbato de Potássio	-	-	1,6 g	1,6 g

*Dietas 1 e 2: Portilla (1999), modificada. **Dietas 3 e 4: Villacorta e Barrera (1996), modificada.

Os grãos de café beneficiados usados na dieta foram moídos em moinho de martelo com peneira de 0,2 mm. Para o preparo da dieta, em primeiro lugar, o café cru moído e o ágar foram misturados à água e esterilizados em autoclave, por 30 minutos. Quando morno, antes de ocorrer a solidificação do ágar, os ingredientes esterilizados e os demais ingredientes sólidos foram homogeneizados em liquidificador por um minuto; já os ingredientes líquidos foram acrescentados por último e a dieta homogeneizada por mais um minuto no liquidificador.

Logo após, a dieta foi vertida em vasilha plástica, previamente exposta à luz UV por 20 minutos e seca em estufa a 55°C por aproximadamente 8 horas. Durante esse tempo, a umidade da dieta foi verificada regularmente em analisador de umidade até atingir cerca de 63 a 68% de umidade, finalizando o processo de secagem. Em seguida, a dieta foi cortada em cubos por volta de 1 cm3 e a umidade foi verificada novamente.

Quando os cubos do meio da dieta não atingirem a umidade apropriada, eles foram colocados na estufa a 55°C por mais 30 minutos. Posteriormente, os cubos da dieta foram expostos à luz UV em câmara de fluxo laminar por 20 minutos e acondicionados na mesma vasilha plástica com tampa em temperatura ambiente. Após sete dias de descanso, para dispersão prévia dos conservantes, 10 cubos de dieta (aproximadamente 10 g) foram colocados em potes plásticos de 30 mL com tampa. Foram acrescentadas 20 brocas-do-café adultas, sendo 19 fêmeas e um macho, por pote plástico e, após 80 dias de incubação, foi realizada a quantificação dos indivíduos obtidos, separando-os por estádios de ovo, larva, pupa e adulto, sendo os últimos quantificados pelo sexo, machos ou fêmeas.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com quatro tratamentos e seis repetições. Cada pote plástico com 20 brocas adultas constituiu uma parcela. Os dados foram transformados em $\sqrt{x}$ + 1 para atender as pressuposições da análise de variância (ANAVA); quando homogêneas, as médias do experimento foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2014).

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

Ao analisar a Tabela 2, aos 80 dias de incubação, alcançou-se uma média de 307, 237, 57 e 36 indivíduos totais nas dietas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Verificou-se também que houve maior número de ovos na dieta 3; já as demais dietas tiveram números inferiores estatisticamente iguais. Em relação ao número de larvas, as dietas 1 e 2 sobressaíram sobre as demais, visto que nas outras não foram encontradas nenhuma larva. Observando-se o número de pupas, somente a dieta 1 e 2 obtiveram mais indivíduos e nas outras dietas não foram encontrados. No que se refere aos adultos, para o número de fêmeas, as dietas 1 e 2, obtiveram maiores populações, aproximadamente

11 e 8 vezes a mais que nas demais dietas, respectivamente. Para o número de machos, a dieta 1 obteve maior população, com 22 machos a mais que a dieta 2 e 35 machos a mais que as dietas 3 e 4.

Tabela 2. Número de ovos, larvas, pupas, fêmeas e machos de broca-do-café, após 80 dias de incubação em diferentes dietas artificiais. Patos de Minas, MG, 2024.

Tratamentos	Ovos1		Larvas1		Pupas1		Adultos1				Total1	
							Fêmea		Macho			
Dieta 1	20	b	36	a	6	a	209	a	36	a	307	a
Dieta 2	23	b	35	a	2	ab	163	a	14	b	237	a
Dieta 3	37	a	0	b	0	b	19	b	1	b	57	b
Dieta 4	16	b	0	b	0	b	19	b	1	b	36	b
CV2 (%) =	12,9		20,5		34,53		27,13		28,72		18,8	

1Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
2Valores transformados em √x+1.

Muitos trabalhos estão sendo realizados com o objetivo de padronizar dietas artificiais para a criação massal da broca-do-café, como o de Ferreira (2022), que utilizou as mesmas dietas para a criação do inseto; o resultado obtido foi que as dietas 1 e 2 constituíram-se nas melhores fontes nutricionais, sobressaindo-se nos parâmetros avaliados em relação às dietas 3 e 4. Esses resultados são similares ao presente estudo, visto que, ao se analisarem os dados, as dietas 1 e 2 sobressaíram-se em relação às outras em quase todos os parâmetros avaliados.

De certa forma, esse resultado pode estar relacionado com fatores como temperatura e umidade, uma vez que, para a criação da broca-do-café, são necessários ambientes com temperatura e umidade controlados, 25°C e 85% respectivamente (Bustillo *et al*., 1996). Além disso, a umidade da dieta é importante para conseguir a multiplicação dos insetos, e o ambiente que não tem umidade adequada pode ocasionar em ressecamento rápido das dietas, sendo necessário fazer reposição ou trocas mais frequentes (Ferreira, 2022). A similaridade nos resultados é importante, pois através dela é possível validar a eficácia das dietas estudadas.

Outro trabalho que testou a criação de broca-do-café foi o de Celestino (2016), que utilizou dieta natural com café arábica em coco, arábica com pergaminho e robusta em coco, variando assepsia e armazenamento. Dos tratamentos testados, o mais adequado para a criação foi o café robusta em coco, sem assepsia, produzindo em média 464 brocas. No final do estudo, após 70 dias de infestação, obtiveram-se 11 indivíduos descendentes por broca. Tais resultados corroboram os deste estudo, visto que, ao estimar a quantidade de descendentes por broca, esse valor fica em torno de 14 indivíduos, assim como no trabalho citado.

Enquanto a dieta apresentar condições nutricionais e umidade necessárias para o processo, serão encontrados indivíduos em diversos estágios de desenvolvimento, como ovos, larvas, pupas e adultos. Esse fator acontece devido ao processo de superposição, pois as fêmeas que nascem são fecundadas e já começam a oviposição de imediato (Villacorta; Prela; Possagnolo, 2000).

As dietas 1 e 2 se sobressaíram sobre as demais dietas avaliadas neste experimento. No entanto, ainda são necessários mais estudos com essas dietas para avaliar o número de gerações de H. *hampei* que é possível conseguir ao longo do tempo. Nesse mesmo sentido, também se torna necessário avaliar a importância da renovação de insetos a longo prazo, ou seja, renovar a genética da criação, pois a criação de insetos sempre com os mesmos indivíduos, sem adição de indivíduos selvagens, pode ocasionar gerações fracas e com problemas. Nesse contexto, é mencionado que a população de brocas vindas de dietas se multiplica 1,06 vez por semana, ao mesmo tempo que as vindas do campo, multiplica 1,09 vez (Villacorta; Silva; Possagnolo, 2001).

4 CONCLUSÃO

Foram estabelecidas duas dietas artificiais para criação massal de broca-do-café (*Hypothenemus hampei*) em laboratório.

REFERÊNCIAS

BUSTILLO, A. E. *et al.* Producción masiva y uso de parasitoides para el control de la broca del café, Hypothenemus hampei, en Colombia. **Cenicafé**, Manizales, v. 47, n. 2, p. 215-230, jul./dic. 1996.

CELESTINO, F. N. *et al.* Adaptação de técnicas de criação da broca-do-café [*Hypothenemus hampei* (Ferrari)]. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 2, p.161-168, jun. 2016.

CELESTINO, F. N. **Técnica de criação e associação de métodos de controle da broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari)**. 2014. Tese (Doutorado em produção vegetal) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufes.br/handle/10/4882.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café**, v. 10 – Safra 2023, n. 4, dez. 2023 – Quarto Levantamento, 2023.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciênc. agrotec**., 2014, vol. 38, n. 2, p. 109-112.

FERREIRA, J. S. **Metodologia de criação massal da broca-do-café com novas dietas artificiais, e potencial de controle com fungos entomopatogênicos.** 2022. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

MOLINA, D. *et al*. Effects of the aspartic protease inhibitor from Lupinus bogotensis seeds on the growth and 100 development of *Hypothenemus hampei:* an inhibitor showing high homology with storage proteins. **Phytochemistry,** Pullman, v. 98, p. 69-77. 2014.

PORTILLA, M. Mass rearing technique for *Cephalonomia stephanoderis* (Hymenoptera: Bethylidae) on *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) developed using Cenibroca artificial diet. **Revista Colombiana de Entomología**, v. 25, p. 57-66, 1999.

REIS, P. R. *et al*. Manejo integrado das pragas do cafeeiro. *In*: REIS, P. R.; CUNHA, R. L. da (ed.). **Café arábica**: do plantio à colheita. Lavras: EPAMIG Sul de Minas, 2010. p. 573-688.

REIS, P. R.; SOUZA, J. C.; MELLES, C. C. A. Pragas do cafeeiro. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 10, n. 109, p. 3-57, 1984.

SANTOS, M.R.A. *et al*. Composição química e atividade inseticida do óleo essencial de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae) sobre a broca-do café (*Hypothenemus hampei*) Ferrari. **Revista Brasileira Plantas Medicinais**, Campinas, v.15, n.4, p.757-762. 2013.

SOARES, L. dos S. *et al*. Export behavior of the Brazilian coffee agribusiness and interactions with production elements. **Research, Society and Development**, [*S. l.*], v. 10, n. 3, p. e39210313503, 2021. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/13503.

VILLACORTA, A.; BARRERA, J. Mass rearing, using a meridic diet, of *Cephalonomia stephanoderis* (Hymenoptera: Bethylidae), parasitoid of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae). **Technical Article**. ECOSUR. Tapachula (México), 1996. 7 p.

VILLACORTA, A.; PRELA, A.; POSSAGNOLO, A. F. Redução dos custos na dieta artificial para a broca-do-café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) para a criação de seus inimigos naturais. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, I, 2000, Poços de Caldas, MG. **Resumos expandidos.** Brasília: Embrapa Café: Minasplan. v. 2, p. 1273-1275, 2000. Disponível em: http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/713.

VILLACORTA, A.; SILVA, R. Z. da; POSSAGNOLO, A. F. Uso de análise demográfica na avaliação de dietas artificiais para a criação massal da broca do café (Hypothenemus hampei) Ferrari. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL. **Anais**. Brasília, DF: Embrapa Café, 2001. Disponível em: http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/1056.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 16-25, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Desenvolvimento inicial do algodoeiro em função de diferentes dosagens de fertilizante organomineral

Initial development of cotton plants under different doses of organomineral fertilizer

MARIA LUIZA DE OLIVEIRA VASCONCELOS
Discente de Agronomia (UNIPAM)
marialov@unipam.edu.br

WELLINGTON FERRARI DA SILVA
Professor orientador (UNIPAM)
wellingtonferrari@unipam.edu.br

Resumo: O cultivo de algodão é uma atividade de grande relevância econômica para o Brasil. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar o desenvolvimento inicial do algodoeiro submetido a diferentes dosagens de fertilizante organomineral. O experimento foi instalado e conduzido em casa de vegetação, situada na Fazenda Experimental Canavial do Centro Universitário de Patos de Minas. O delineamento experimental foi de blocos casualizados constituídos por quatro tratamentos (0; 50%; 75% e 100% a dose recomendada do produto) com cinco repetições. As avaliações biométricas foram realizadas aos 60 dias após a semeadura, analisando as variáveis altura das plantas, número de capulhos, massa fresca e seca da raiz e da parte aérea. Para as variáveis altura das plantas e massa seca da raiz e da parte aérea, os resultados não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. No entanto, para as variáveis número de capulhos, massa fresca da raiz e massa fresca da parte aérea, observou-se divergência significativa entre os tratamentos. Concluiu-se que a aplicação de 75% da dose recomendada de fertilizante organomineral proporcionou os melhores resultados em relação ao número de capulhos por planta, bem como à massa fresca das raízes e da parte aérea.
Palavras-chave: *Gossypium hirsutum*; fertilidade; produtividade.

Abstract: Cotton cultivation is an economically significant activity in Brazil. Thus, the objective of this study is to evaluate the initial development of cotton plants subjected to different doses of organomineral fertilizer. The experiment was established and conducted in a greenhouse located at the Experimental Farm "Canavial" of the University Center of Patos de Minas. A randomized block design was used, consisting of four treatments (0%, 50%, 75%, and 100% of the recommended dose of the product) with five replications. Biometric evaluations were carried out 60 days after sowing, analyzing plant height, number of bolls, fresh and dry mass of roots and shoots. For the variables plant height and dry mass of roots and shoots, no significant differences were observed among treatments. However, for the number of bolls, root fresh mass, and shoot fresh mass, significant differences were identified. It was concluded that the application of 75% of the recommended dose of organomineral fertilizer resulted in the best outcomes regarding the number of bolls per plant, as well as the fresh mass of roots and shoots.
Keywords: *Gossypium hirsutum*; soil fertility; yield.

1 INTRODUÇÃO

O algodão é uma cultura versátil, da qual se obtêm vários produtos, como óleo, alimento animal e fibra têxtil. Em média, 35 milhões de hectares de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) são plantadas anualmente em todo o planeta (ABRAPA, 2022). O algodoeiro tem grande importância socioeconômica para o Brasil, pois, além de ser a mais importante fonte natural de fibras, garante ao país lugar privilegiado no cenário internacional, que nos últimos anos tem se mantido entre os cinco principais produtores de algodão do mundo, ficando ao lado da China, Índia, Estados Unidos e Paquistão. Além disso, o Brasil também se encontra entre os maiores exportadores mundiais de algodão (AGROPÓS, 2022).

O estado do Mato Grosso e o da Bahia têm se destacado na produção de algodão; juntos representam 90% da produção nacional nas últimas safras, segundo dados divulgados pela Associação dos Produtores de Algodão (ABRAPA, 2022). A produção de algodão em pluma é estimada em 2,92 milhões de toneladas na safra 2022/23, o que corresponde a um incremento de 12% em relação ao ano anterior, o que deve dar sustentação ao avanço de 4% nas exportações, projetadas em 1,97 milhão de toneladas (Silva, 2023).

Alcançar maior produtividade é a meta dos produtores. Para isso, é necessário utilizar técnicas de manejo adequadas para a cultura, fornecendo à planta melhores condições para que ela alcance todo o seu potencial produtivo; assim é de extrema importância conhecer a fisiologia do algodoeiro. A fotossíntese, a fotorrespiração, a clorofila e as condições edafoclimáticas relacionam-se com o adubo utilizado para implantação da cultura, pois esse adubo oferece as condições e concentrações de nutrientes para a absorção das plantas (Figueiredo, 2020). A baixa disponibilidade natural de fósforo nos solos brasileiros faz se necessária à sua reposição em grandes quantidades, além de que a fixação do fósforo no solo também é um problema limitante de produção, que ocorre pela rápida formação de complexos insolúveis com cátions, especialmente alumínio e ferro em condições ácidas, tornando-o indisponível para a planta (Carvalho *et al*., 2005). Os fertilizantes organominerais podem melhorar a eficiência agronômica das adubações, por reduzirem o processo natural de fixação de fósforo lábil fornecido ao solo, estando disponíveis às plantas por mais tempo (Figueiredo, 2020).

O setor de fertilizantes organominerais se expandiu nos últimos anos em um ritmo decorrente das demandas e dos custos dos adubos fertilizantes. De acordo com a legislação brasileira, os fertilizantes organominerais são produtos que combinam um componente mineral com um componente de material orgânico. Desse modo, esses fertilizantes necessitam apresentar quantidades mínimas de nutrientes e carbono orgânico e uma parcela mínima de matéria orgânica originada de fontes diferentes, vindos do reaproveitamento de resíduos orgânicos e inorgânicos (Ritzinger *et al*., 2008). Tal fertilizante apresenta alguns benefícios sustentáveis como a redução da acidificação do solo, a liberação gradativa de nutrientes móveis no solo. como boro e nitrogênio, consequentemente, influencia na menor fixação de fósforo nos coloides do solo, no desenvolvimento radicular e maior absorção de água, melhorando, assim, o desenvolvimento e a produtividade das plantas.

Considerando-se a nutrição e as necessidades da cultura do algodão, este trabalho tem como objetivo avaliar o desenvolvimento inicial do algodoeiro submetido a diferentes dosagens de fertilizante organomineral.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado e conduzido em casa de vegetação, situada na Fazenda Experimental Canavial do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), cujas coordenadas geográficas são 18º36'34"S e 46º29'16"W, a uma altitude de 891 metros em relação ao nível do mar. Segundo o método de Köppen, o clima da região é tropical, com estação seca e precipitação anual superior a 750 mm.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados (DBC), constituídos por quatro tratamentos com cinco repetições, totalizando 20 unidades experimentais, em que foram avaliadas diferentes dosagens de fertilizante organomineral. As dosagens utilizadas foram de 50%, 75% e 100% da dose recomendada para a cultura, além do tratamento controle em que não houve aplicação de fertilizante.

As unidades experimentais foram compostas por vasos de 11 litros preenchidos com solo corrigido com calcário, na dosagem recomendada para a cultura do algodão, além de 160 kg ha-1 de N, 120 kg ha-1 de P2O5 e 120 kg ha-1 de K2O, sendo utilizada a formulação para o fertilizante organomineral de 05-26-00. A cultivar utilizada foi a TMG 44 B2RF e as aplicações foram feitas na semeadura.

Para as avaliações biométricas, foram coletados dados sobre a morfologia na fase vegetativa e reprodutiva, que foram realizadas com 60 DAE (dias após a emergência), com quatro plantas de cada parcela.

Os parâmetros avaliados foram altura de plantas, que foi registrado entre a base e a gema apical com o auxílio de uma fita métrica, número de capulhos por planta, massa fresca e seca da parte aérea e de raiz. Para determinar a massa fresca e seca da parte aérea e raiz, as plantas foram coletadas e colocadas em sacos de papel e adicionadas em estufa para secagem a uma temperatura de 65ºC durante 24 horas.

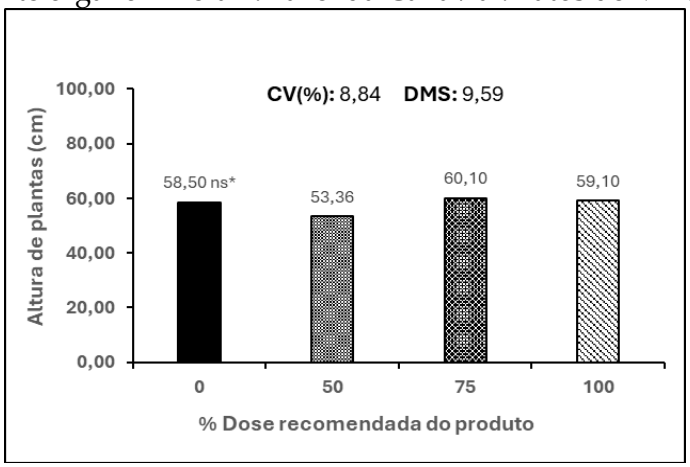
As médias foram submetidas à análise de variância através do programa computacional SISVAR e posteriormente submetidas ao teste de Tukey, a nível de 5% de significância (Ferreira, 2014).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da altura das plantas de algodoeiro indicou a ausência de diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos aplicados. Embora não tenha sido observada essa diferença, nota-se uma leve tendência de incremento nas alturas das plantas nos tratamentos com 75% e 100% da dose recomendada de fertilizante, em comparação ao grupo controle. Por outro lado, o tratamento 2, que consistiu na aplicação de 50% da dosagem do fertilizante organomineral, resultou em um desempenho inferior ao controle.

O tratamento com 75% da dosagem recomendada de fertilizante organomineral propiciou o crescimento de plantas mais altas, conforme evidenciado na Figura 1.

Figura 1: Resultado da altura de plantas do algodoeiro após 60 dias após emergência (DAE): "Desenvolvimento inicial do algodoeiro em função de diferentes dosagens de fertilizante organomineral". Fazenda Canavial. Patos de Minas (MG)

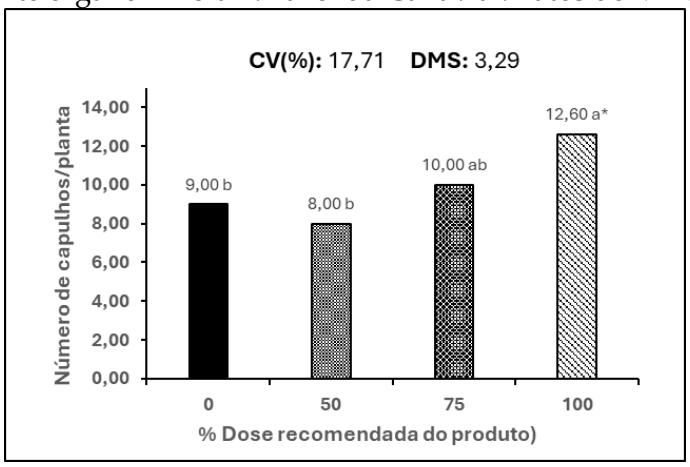


*NS = não significativo pelo Teste Tukey a 5%.

A relação entre a aplicação de fertilizantes organominerais e o crescimento das plantas é amplamente discutida. Diversos estudos apontam que a utilização de fertilizantes organominerais pode influenciar positivamente a altura das plantas, devido à combinação de nutrientes minerais e matéria orgânica, que promove uma liberação gradual de nutrientes, favorecendo o desenvolvimento das plantas ao longo do ciclo de cultivo (Silva *et al*., 2019). A tendência observada neste estudo, com maior altura das plantas nos tratamentos com 75% e 100% da dosagem recomendada, pode ser atribuída à maior disponibilidade de nutrientes, em especial nitrogênio e fósforo, que são essenciais para o crescimento vegetativo. Contudo, o tratamento com 50% da dosagem recomendada não foi eficiente, possivelmente devido à insuficiência nutricional para suportar o crescimento ideal das plantas (Silva *et al*., 2019).

A estimativa da produtividade das plantas de algodoeiro foi realizada por meio do registro do número de capulhos por planta, sendo observada uma diferença estatística significativa entre os tratamentos. A maioria dos tratamentos, com exceção do tratamento 2 (50% da dosagem recomendada), apresentou valores superiores aos do controle. No entanto, as plantas que receberam 100% da dosagem recomendada de fertilizante organomineral produziram um número significativamente maior de capulhos, com uma média de 4 capulhos a mais em comparação ao controle, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Resultado do número de capulhos/planta após 60 dias após emergência (DAE): "Desenvolvimento inicial do algodoeiro em função de diferentes dosagens de fertilizante organomineral". Fazenda Canavial. Patos de Minas (MG)

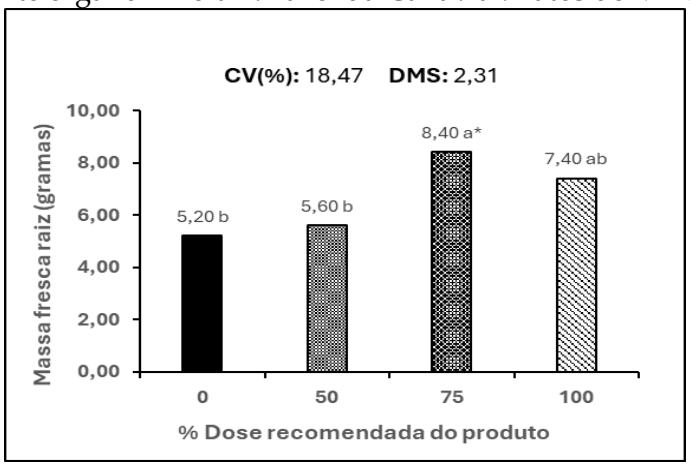


*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si no teste Tukey a 5%.

A relação entre a aplicação de fertilizantes e a produtividade do algodoeiro foi observada por Constable e Bange (2015), que afirmam que, para atingir altas produtividades no cultivo de algodão, é fundamental haver um maior número de ramos reprodutivos e de maçãs por metro quadrado. Estudos demonstram que a densidade da população de plantas exerce influência direta na produção de capulhos, com uma maior densidade favorecendo a competição entre plantas e diminuindo a produtividade individual (Constable; Bange, 2015). Neste estudo, a condução das plantas em vasos e a aplicação do fertilizante organomineral contribuíram significativamente para o aumento da produção de maçãs, uma vez que favoreceu o crescimento e desenvolvimento das plantas, especialmente nos tratamentos com doses mais elevadas de fertilizante.

Para os parâmetros massa fresca da raiz (Figura 3) e massa fresca da parte aérea (Figura 4), observou-se que o tratamento correspondente a 75% da dose recomendada de fertilizante se destacou em relação aos demais tratamentos. Esse resultado é corroborado por Lançoni (2018), em estudo que avaliou a massa fresca das raízes de algodoeiro submetidas a diferentes dosagens de fertilizantes organominerais.

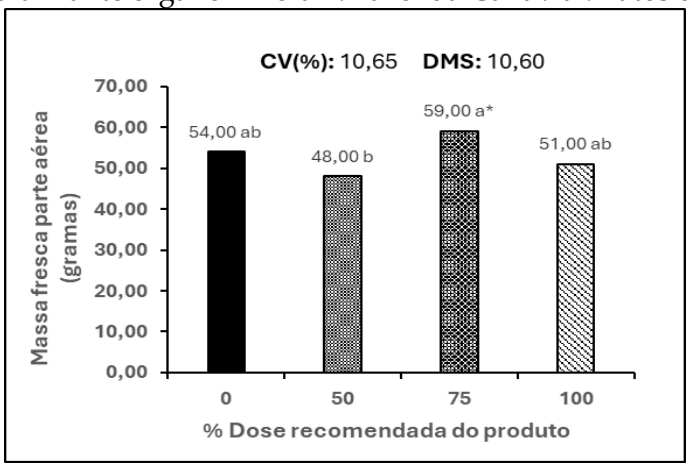
Figura 3: Resultado da massa fresca da raiz (gramas) após 60 dias após emergência (DAE): "Desenvolvimento inicial do algodoeiro em função de diferentes dosagens de fertilizante organomineral". Fazenda Canavial. Patos de Minas (MG)



*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si no teste Tukey a 5%.

A aplicação de fertilizantes organominerais tem sido amplamente discutida no contexto do crescimento e desenvolvimento das plantas, com ênfase no aumento da biomassa. Estudos mais recentes, como o de Silva *et al*. (2022), confirmam que a utilização de doses intermediárias de fertilizantes organominerais favorece o crescimento tanto da parte aérea quanto das raízes.

Figura 4: Resultado da massa fresca da parte aérea (gramas) após 60 dias após emergência (DAE): "Desenvolvimento inicial do algodoeiro em função de diferentes dosagens de fertilizante organomineral". Fazenda Canavial. Patos de Minas (MG)



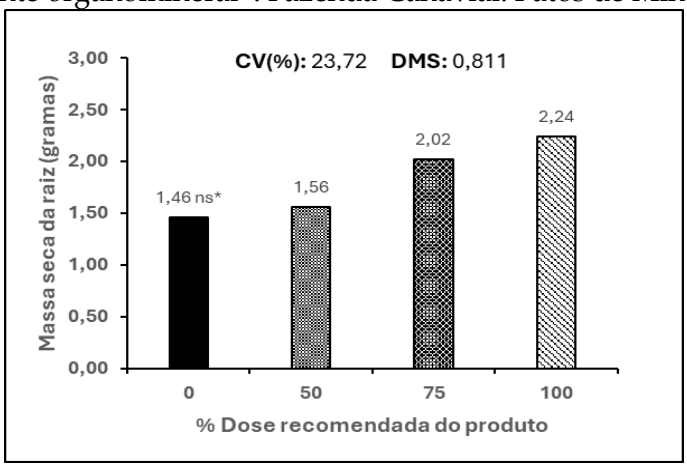
*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si no teste Tukey a 5%.

Trabalhos de Souza *et al*. (2023) demonstraram que a aplicação de fertilizantes organominerais resulta em um aumento significativo da parte aérea das plantas de algodoeiro, quando comparado a tratamentos com fertilizantes minerais. Os autores destacaram que a combinação de nutrientes orgânicos e minerais no fertilizante organomineral favorece uma liberação gradual de nutrientes, promovendo um melhor desenvolvimento das plantas e um aumento na produção de massa fresca. No contexto

deste estudo, o tratamento com 75% da dose recomendada pode ter contribuído para uma maior eficiência na utilização de nutrientes, o que resultou em maior crescimento da parte aérea, como observado na massa fresca das plantas (Souza *et al*., 2023).

Em relação à análise das variáveis massa seca da raiz (Figura 5) e massa seca da parte aérea (Figura 6), pôde-se observar que não houve diferença estatística entre os tratamentos.

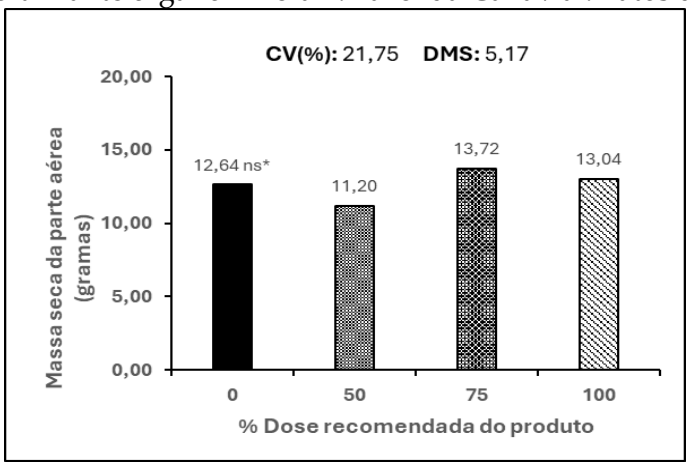
Figura 5: Resultado da massa seca da raiz (gramas) após 60 dias após emergência (DAE): "Desenvolvimento inicial do algodoeiro em função de diferentes dosagens de fertilizante organomineral". Fazenda Canavial. Patos de Minas (MG)



*NS = não significativo pelo Teste Tukey a 5%.

Corrêia e Mota (2024), em uma pesquisa, não encontraram diferenças entre os tratamentos, nas massas secas de raízes, quando utilizaram dosagens de fertilizante organomineral. Já Tavares e Beltrão (2020) observaram que, quando o sulfato de amônio foi utilizado em associação com a casca de mamona, os resultados foram superiores quanto à massa seca das raízes, devido à redução da relação C/N, o que promoveu maior crescimento da parte aérea e das raízes.

Figura 6: Resultado da massa seca da parte aérea (gramas) após 60 dias após emergência (DAE): "Desenvolvimento inicial do algodoeiro em função de diferentes dosagens de fertilizante organomineral". Fazenda Canavial. Patos de Minas (MG)



*NS = não significativo pelo Teste Tukey a 5%.

Segundo alguns estudos feitos por Lançoni (2018), doses maiores de fertilizantes podem diminuir os resultados dos parâmetros biométricos das plantas de algodão. Esse fator, segundo Rich *et al*. (1989), ocorre devido à fitotoxidez, pelo excesso da proteína ricina que contém nos organominerais. Ao testar doses e parcelamentos de adubo fosfatado em algodão cultivado em sequeiro e irrigado, Aquino *et al*. (2011) constataram que não houve distinção no efeito dos parcelamentos e doses, para as características vegetativas de massa de parte aérea do algodoeiro.

De acordo com Lima *et al*. (2022), a utilização de fertilizantes organominerais no algodoeiro não só favorece o aumento da biomassa, mas também melhora a resistência das plantas a condições de estresse, tornando a prática uma estratégia sustentável e eficiente para a produção de algodão.

4 CONCLUSÃO

Concluiu-se que, nas condições experimentais deste estudo, a aplicação de 75% da dose recomendada de fertilizante organomineral proporcionou os melhores resultados em relação ao número de capulhos por planta, bem como à massa fresca das raízes e da parte aérea.

REFERÊNCIAS

ABRAPA. **Algodão no mundo**. 2022. Disponível em: https://abrapa.com.br/Paginas/dados/Algod%C3%A3o%20no%20Mundo.aspx.

AGROPÓS. **Cultura do algodão**. 2022. Disponível em: https://agropos.com.br/cultura-do-algodao/.

AQUINO, J. L.; SILVA, M. C.; PEREIRA, F. R. Efeitos de doses e parcelamentos de adubo fosfatado no crescimento do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 1717-1725, 2011.

CARVALHO, M. C. S.; BARBOSA, K. A.; LEANDRO, W. M. Resposta do algodoeiro a doses e modos de aplicação de fósforo em sistemas de plantio direto e convencional no cerrado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 5., 2005, Salvador. **Algodão, uma fibra natural**: anais. [*S. l.*]: Abapa: EMBRAPA: Abrapa: Governo da Bahia, 2005.

CONSTABLE, G. A.; BANGE, M. P. The yield potential of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Field Crops Research**, v. 182, n. 1, p. 98-106, 2015.

CORRÊIA, J. P.; MOTA, L. F. Efeitos do uso de fertilizantes organominerais no crescimento radicular de plantas. **Revista Brasileira de Nutrição e Fertilidade do Solo**, v. 42, n. 3, p. 275-284, 2024.

FERREIRA. D. F. 2014. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciênc. Agrotec**., Lavras, v. 38, n. 2, p.109-112, mar./abr., 2014.

FIGUEIREDO, E. H. C. **Desenvolvimento e produtividade do algodoeiro em função de doses de adubo mineral e organomineral**. 2020. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

LANÇONI, R. **Produtividade de algodão herbáceo (*Gossypium hirsutum* L.) em função das adubações de plantio e foliar com fertilizante organomineral**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado) - Universidade Federal de São Carlos - Centro de Ciências Agrárias. Araras, 2018.

LIMA, A. G.; PEREIRA, S. M.; MARTINS, F. J. Eficiência de fertilizantes organominerais no crescimento e desenvolvimento do algodoeiro. **Revista Brasileira de Agricultura e Meio Ambiente**, v. 26, n. 2, p. 157-165, 2022.

RICH, J. W.; SMITH, D. E.; WILLIAMS, R. L. Fitotoxicidade e efeitos da ricina em fertilizantes organominerais. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 152, n. 3, p. 243-250, 1989.

RITZINGER, R. *et al*. **Utilização de resíduos de mamona em cobertura no manejo de Meloidogyne javanica em aceroleira**. XX Congresso Brasileiro de Fruticultura. Vitória: 6 p. 2008.

SILVA. S. **Safras e mercado**. SAFRAS revisa produção de algodão..., jan.2023. Disponível em: https://safras.com.br/safras-revisa-producao-de-algodao-do-brasil-2022-23-para-292-milhoes-de-toneladas/.

SILVA, J. L.; ALMEIDA, P. R.; COSTA, R. S. Efeitos da aplicação de fertilizantes organominerais no crescimento do algodoeiro: biomassa e desenvolvimento radicular. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 208, n. 4, p. 314-321, 2022.

SILVA, J. A.; PEREIRA, L. M.; SANTOS, R. F. Influência de fertilizantes organominerais no crescimento de plantas de algodoeiro. **Revista Brasileira de Agricultura**, v. 35, n. 4, p. 217-229, 2019.

SOUZA, F. A.; COSTA, D. M.; SILVA, P. F. Efeito de fertilizantes organominerais no crescimento e produção de massa fresca em algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, e0220211, 2023.

TAVARES, A. L.; BELTRÃO, N. E. M. Efeito da associação de sulfato de amônio e casca de mamona no crescimento radicular e aéreo de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, n. 2, p. 345-354, 2020.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 26-37, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Difusão de fósforo no solo a partir de fertilizantes fosfatados cogranulados com óxido de grafeno

Phosphorus Diffusion in Soil from Phosphate Fertilizers Co-Granulated with Graphene Oxide

PEDRO PAULO ANDRADE DE SOUZA MELO
Discente de Agronomia (UNIPAM)
pedropasmelo@unipam.edu.br

VICTOR GUSTAVO SOARES RIBEIRO
Bacharel em Agronomia
victorgustavo.sr@gmail.com

SANDRA LÚCIA NOGUEIRA
Professora orientadora (UNIPAM)
sandraln@unipam.edu.br

Resumo: Na agricultura, a produtividade das culturas é afetada por doenças, mudanças climáticas, baixa eficiência dos fertilizantes e da fertilidade do solo. Um dos principais desafios no cerrado brasileiro é a baixa disponibilidade de fósforo (P) nos solos, que são altamente intemperizados e possuem baixa fertilidade natural. Assim, tecnologias emergentes têm sido exploradas para aumentar a eficiência da adubação, como o uso de polímeros associados. Nanocompósitos de carbono, como o grafeno e o óxido de grafeno (OG), estão sendo estudados visto sua alta capacidade de sorção e de carrear nutrientes, além de conferir dureza aos grânulos de fertilizante. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a zona de difusão de fertilizantes fosfatados cogranulados com óxido de grafeno em Latossolo Vermelho Argiloso, utilizando o método do papel filtro impregnado com óxido de Fe. O experimento foi montado em DBC. Foram formulados fertilizantes que continham 0, 0,5, 1,0, 1,5 e 0,06% de óxido de grafeno. O fertilizante com 0,06% de OG recebeu a mesma porcentagem do polímero Avail ®. Após tratados e colocados em contato com a placa de petri, de acordo com cada avaliação (2, 7, 14, 21, 32 e 60 dias), os papéis foram imersos em solução de molibidato de amônio 10 g L-1 e molibidato de amônio + HNO3 1 mol L-1. Posteriormente, 1,5 mL da solução de verde-malaquita 4 g L-1 em HCl 1 mol L-1 foi adicionado sobre a superfície do papel e depois foram imersos em H2SO4 1 mol L-1 para melhorar a visão da zona de difusão. Posteriormente, foram submetidos ao teste Tukey a 5% de probabilidade para fontes dos fertilizantes e ajuste ao modelo de regressão para as doses e tempos de avaliação. Por fim, foi possível observar que, para as fontes dos fertilizantes, o tratamento com 0,06% de OG e Avail ® apresentou o melhor desempenho comparando as médias; para doses e tempos de avaliação, não foram observadas diferenças significativas. Concluiu-se que o tratamento com Avail ® apresentou maior incremento em relação à zona de difusão de fósforo.
Palavras-chaves: latossolo; nanocompósitos; polímeros.

Abstract: In agriculture, crop productivity is affected by diseases, climate change, low fertilizer efficiency, and poor soil fertility. One of the main challenges in the Brazilian Cerrado is the low

availability of phosphorus (P) in highly weathered soils with naturally low fertility. Emerging technologies, such as the use of polymer-associated fertilizers, have been explored to improve fertilization efficiency. Carbon nanocomposites, such as graphene and graphene oxide (GO), are being studied due to their high sorption capacity and ability to carry nutrients, in addition to enhancing the hardness of fertilizer granules. The objective of this study was to evaluate the diffusion zone of phosphate fertilizers co-granulated with graphene oxide in clayey Red Latosol, using the filter paper method impregnated with iron oxide. The experiment was conducted in a randomized block design (RBD). Fertilizers were formulated with 0, 0.5, 1.0, 1.5, and 0.06% of graphene oxide. The fertilizer with 0.06% GO also contained the same percentage of the polymer Avail®. After treatment and contact with the Petri dish, at each evaluation interval (2, 7, 14, 21, 32, and 60 days), the papers were immersed in a 10 g L^{-1} ammonium molybdate solution and then in ammonium molybdate + 1 mol L^{-1} HNO_3. Subsequently, 1.5 mL of a 4 g L^{-1} malachite green solution in 1 mol L^{-1} HCl was added to the surface of the paper, followed by immersion in 1 mol L^{-1} H_2SO_4 to improve visualization of the diffusion zone. Data were analyzed using Tukey's test at 5% probability for fertilizer sources and regression analysis for doses and evaluation times. Results showed that the treatment with 0.06% GO and Avail® had the best performance among the sources, while no significant differences were observed for doses and times. It was concluded that the Avail® treatment resulted in a greater increase in the phosphorus diffusion zone.
Keywords: Latosol; nanocomposites; polymers.

1 INTRODUÇÃO

Na agricultura atual, existem algumas ameaças que interferem na produtividade final das culturas, como doenças, mudanças climáticas globais, baixa eficiência dos fertilizantes e diminuição da fertilidade do solo (Pereira *et al*., 2021). Estimativas mostram que a população mundial será 10 bilhões de pessoas até o ano de 2050, e isso significa incremento de 25 a 70% na demanda de alimentos em relação ao que é produzido atualmente (Scott *et al*., 2018), ou seja, será necessário produzir mais alimentos para suprir a necessidade mundial.

A adubação fosfatada figura entre as principais etapas do processo produtivo das culturas/alimentos principalmente em regiões de clima tropical (bioma Cerrado), onde há o predomínio da classe de solo denominada de latossolo. Estes, por sua vez, possuem baixa fertilidade natural e baixos teores de fósforo (P) no solo disponível para as plantas (Santos *et al*., 2018). O P desempenha funções como desenvolvimento das plantas, constituinte de ácidos nucleicos, proteínas, ATP, material genético, armazenamento e transferência de energia, fotossíntese, regulação de processos enzimáticos, desenvolvimento radicular e formação de sementes (Malavolta, 2006; Zambolim, 2001; Dechen; Nachtigall, 2007).

Os latossolos são solos altamente intemperizados, nos quais o P é considerado o nutriente mais limitante na produção de biomassa vegetal (Novais, 1999). Possuem predominantemente argilominerais do tipo 1:1 e óxidos de ferro (hematita e goethita) e de alumínio (gibsita), fatores que regem as reações de adsorção/fixação de P (Stauffer, 2016), contribuindo para a baixa concentração do nutriente na solução do solo (Fink *et al*., 2014) e interferindo negativamente no fluxo difusivo de P (FDP). Hopkins (2015) diz

que a capacidade de recuperação do P aplicado via fertilizante em solos tropicais varia entre 0,1 a 30%, dependendo do pH e tipo de argila.

Portanto, alternativas para elevar a eficiência do uso de fertilizantes fosfatados em solos de Cerrado é de suma importância quando pensamos em sustentabilidade da agricultura e produção de alimentos em escala mundial. Entre essas alternativas se encontram os polímeros de revestimento ou tecnologias associadas (aditivos) a fertilizantes fosfatados e os fertilizantes organominerais. As tecnologias associadas podem ser de liberação gradual ou controlada (Machado; Souza, 2012); polímeros com alta densidade de cargas negativas que sequestram cátions di ou trivalentes interferentes (Dunn; Stevens, 2008), ou uso de ácidos orgânicos (SAS *et al*., 2001), que são constituintes dos fertilizantes organominerais.

As tecnologias têm por finalidade atenuar a interferência de cátions e do tipo de argila na disponibilidade e difusão do P no solo, visando à elevação de P disponível na solução do solo para posterior absorção das plantas. Além dessas tecnologias, na atualidade, o uso de nanocompósitos de carbono, principalmente o Grafeno e Óxido de Grafeno, vem sendo estudado na agricultura para fins de produção de fertilizantes mais eficientes, tendo como principais objetivos elevar a absorção de nutrientes e produtividade das culturas (Solanki *et al*., 2015; Abdel-Aziz *et al*., 2021).

Tendo em vista todos os benefícios e potencialidades dos nanocompostos de carbono aplicados em fertilizantes, eles foram incluídos no Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) do Governo Federal Brasileiro (2021) como produtos de cadeias emergentes. Uma meta importante do PNF é a de reduzir em 70 a 90% a quantidade de macronutrientes exigidos pela lavoura com a utilização de nanotecnologia associada a fertilizantes. O óxido de grafeno possui característica hidrofílica e apresenta alta densidade de grupos funcionais oxigenados (carboxílico, hidroxílico, carbonílico e epóxi) na sua estrutura laminar. A alta densidade de grupos funcionais oxigenados, elevada superfície específica, resistência mecânica e física confere ao óxido de grafeno características desejáveis quando se fala em fertilidade do solo e fertilizantes, como elevada capacidade de sorção, carreador de nutrientes do solo para plantas, dureza/resistência aos grânulos e controle da liberação do nutriente dos fertilizantes (Kabiri *et al*., 2017, Abdel-Aziz *et al*., 2021).

Assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a zona de difusão de fertilizantes fosfatados cogranulados com óxido de grafeno ao longo do tempo em Latossolo Vermelho Argiloso, utilizando o método do papel filtro impregnado com óxido de Fe.

2 METODOLOGIA

O óxido de grafeno foi sintetizado no Laboratório de Química Analítica do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), de acordo com o método da esfoliação química do grafite (Nogueira; Xavier, 2019).

O experimento foi instalado no Laboratório de Engenharia Química, no UNIPAM. O solo para utilização no experimento foi coletado em barranco na fazenda Aragão, em Patos de Minas (MG), na profundidade de 0 - 20 cm. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho. Foi submetido à análise para caracterização química e física.

Tabela 1: Análise física e química do solo

pH	P rem	M.O	P meh	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC(t)	CTC (T)	V	m
H_2O	mg/L	dag/Kg	mg/dm³			cmol/dm³						%	
5,80	9,77	3,63	5,22	80,94	3,48	1,01	0,03	4,08	4,70	4,73	8,78	53,53	0,63

Areia	Silte	Argila	COT
g/Kg			dag/kg
200,00	250,00	550,00	2,11

P, K: Extrator Mehlich I
Ca, Mg, Al: Extrator KCl 1 mol/L
H+Al: Extrator SMP
CTC (t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0
V: Saturação por Bases
P-rem.: Fósforo remanescente, concentração de P da solução de equilíbrio após agitar durante 1h a TFSA com solução de CaCl2 10 mmol/L, contendo 60 mg/L de P, na relação 1:10 S: Extrator Fosfato monocálcico em ácido acético
Mat. Org.: Oxidação com Na2Cr2O7 4N + H2SO4 10N
COT: Carbono orgânico Total - Oxidação Na2Cr2O7 4N + H2SO4 10N

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Após a coleta, o solo foi seco ao ar e passado em peneira de 2,0 mm (TFSA). A análise de densidade do solo e capacidade de campo (CC) foram realizadas pelo método da proveta.

O experimento foi montado em esquema fatorial 5 x 6, sendo cinco aditivos e seis tempos de avaliação, seguindo o delineamento experimental blocos casualizados (DBC). Foram utilizados dois aditivos (Óxido de Grafeno (GO) e Avail T5®), sendo que os tratamentos apresentaram concentrações de 0, 0,5, 1,0, 1,5, 0,06% respectivamente do OG, e, no quinto tratamento, foi utilizado o aditivo Avail T5® também com 0,06% de concentração, seguindo a dose recomendada pelo fabricante do produto. Para a montagem do experimento, foram considerados sete tempos de incubação (2, 7, 14, 21, 32 e 60 dias). Na formulação dos fertilizantes, foi utilizado como matriz fosfato monoamônio (MAP) e cloreto de potássio (KCl). A dose de P e K utilizada (132 mg dm-3 de P e 15,12 mg dm- 3 de K) foi padrão para todos os tratamentos e o fechamento de fórmula dos fertilizantes foi feito com material inerte (Tabela 1).

O primeiro passo para a produção dos fertilizantes foi padronizar a umidade das matérias-primas (MAP e KCl); para isso, elas foram colocadas em estufa de secagem a 65 ºC durante o período de 24 horas. Feito isso, as matérias-primas foram submetidas à moagem em moinho multiuso modelo 630/1 e passadas em peneira com malha de 425 μm, com a finalidade de padronizar as partículas na forma de pó. Em seguida, as matérias-primas foram misturadas de acordo com as proporções (massa massa-1) apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2: Descrição das concentrações (%) de aditivos utilizados para cada tratamento

Tratamentos	OG	Avail ® %	Inerte
1	0	-	1,5
2	0,5	-	1
3	1	-	0,5
4	1,5	-	0
5	0,06	0,06	1,38

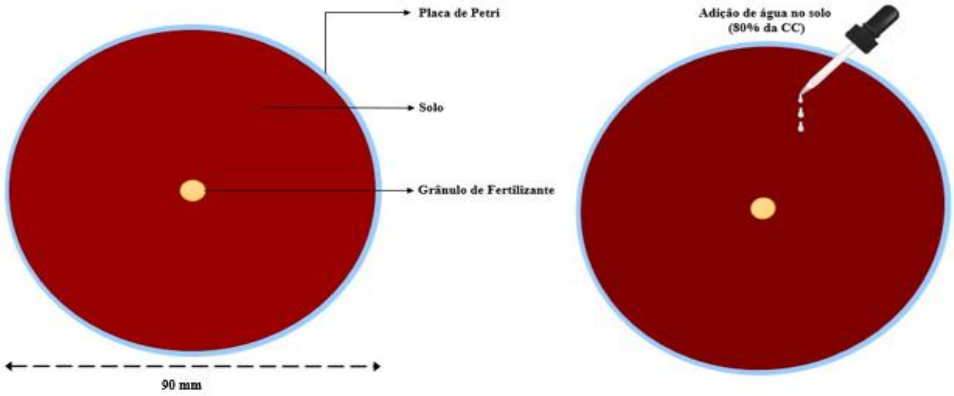
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

A homogeneização das misturas ocorreu por via úmida; adicionou-se uma solução de goma arábica 2% misturando até a formação de uma massa. A granulação dos fertilizantes foi realizada em tableteiro com diâmetro de furos de 2 mm. Os grânulos foram secos em estufa a 40 ºC por 24 horas e classificados por tamanho em peneira de 2 mm.

O experimento de incubação em placas de petri foi realizado seguindo a metodologia proposta por Lombi *et al*. (2004). Foram utilizadas placas de petri com dimensões de 9,0 cm de diâmetro e 1,2 cm de altura, adicionando um total de 80 g de solo seco, por placa, na tentativa de alcançar uma densidade de 1,3 g cm3 de solo. O solo foi mantido em 80% da capacidade de campo.

Posteriormente, as placas de petri foram tampadas, vedadas com plástico filme e embrulhadas com papel alumínio para uma pré-incubação por 24 horas. A pré-incubação tem como finalidade certificar a uniformidade da distribuição da água nas amostras de solo. Feito isso, foram abertas as placas e foi adicionado um grânulo dos fertilizantes avaliados no centro da placa, cuidadosamente colocado entre a superfície e o fundo da placa (César, 2016). Para padronizar o tamanho dos grânulos dos fertilizantes, eles foram passados em uma peneira de 2 mm e foram selecionados apenas os grânulos que transpassaram (Figura 1).

Figura 1: Esquema de montagem das placas de petri para visualização da zona de difusão de P



Fonte: elaboração dos autores, 2024.

Finalmente as placas foram devidamente identificadas, novamente vedadas com plástico filme e papel alumínio e incubadas em ambiente por 2, 7, 14, 21, 32 e 60 dias. No final de cada tempo de incubação, as placas de petri foram abertas para a visualização da zona de difusão, empregando o método não destrutivo, proposto por Degryse e McLaughin (2014), que consiste na utilização da mesma amostra para a quantificação da área ao longo do experimento, sem descartes após a avaliação. O método tem como princípio fazer uma espécie de "impressão digital" da difusão de P do fertilizante por meio da sua captura em papel filtro impregnado com óxido de ferro colocado sobre a superfície do solo.

Uma das principais vantagens desse método é ser não destrutivo, ou seja, permite avaliar a difusão do P ao longo dos tempos de incubação na mesma placa de petri. De acordo com esses autores (Degryse; Mclaughin, 2014), o método tem como princípio capturar o P do fluxo difusivo por meio de um papel filtro impregnado com óxido de ferro, que foi colocado sobre a superfície do solo e posteriormente feito a coloração para a visualização da zona de difusão.

No procedimento, foram utilizados papéis filtros do tipo Whatman® n.1 de 9,0 cm de diâmetro, inicialmente submersos em solução de Fe(NO3)3 0,37 mol L-1, por 15 minutos. Posteriormente, foram retirados da solução, removido o excesso e adicionados em uma solução de NH4OH 2,7 mol L-1, fazendo com que cada face do papel filtro ficasse em contato com a solução por 15 segundos. No final, o excesso da solução foi retirado dos papéis com jatos suaves de água deionizada, secos (ao ar) e armazenados.

Ao final de cada tempo de incubação, as placas foram abertas e o papel filtro impregnado com Fe colocado sobre o solo, assegurando um completo contato do papel com o solo. O tempo de contato do papel filtro com o solo variou de acordo com o tempo de incubação, sendo assim:

- tempos 2 e 7 dias: 5 minutos de contato;
- tempos 14, 21 dias: 10 minutos de contato;
- tempos 32 e 60 dias: 30 minutos de contato.

Encerrado o tempo de contato do papel filtro de cada tempo de incubação, esses foram retirados das placas de petri, e as partículas de solo excedentes retiradas com jatos suaves de água deionizada. Para coloração da zona de difusão do P capturado pelos papéis, eles foram submersos em solução de (NH4)6Mo7O24.4H2O 10 g L-1 por 30 minutos. Depois transferidos para a solução ácida de (NH4)6Mo7O24.4H2O 10 g L-1 + HNO3 1 mol L-1 por 15 minutos. O excesso de solução foi retirado dos papéis e colocados equidistantes em uma bandeja limpa com a parte que ficou em contato com o solo voltada para cima.

Posteriormente foi adicionado sobre a superfície de cada papel 1,5 mL da solução de verde-malaquita 4 g L-1 em HCl 1 mol L-1, garantindo uma distribuição uniforme. Os papéis foram deixados para reagir durante 15 minutos. O excesso da solução verde-malaquita foi lavado usando jatos suaves de água deionizada e os papéis transferidos para a solução de H2SO4 1 mol L-1 e deixados em contato por um período entre 7 a 15 minutos, com a finalidade de dissolver todo o Fe contido no papel e melhorar a visibilidade da zona de difusão. Por fim, os papéis foram lavados com água deionizada para retirar o excesso de ácido e colocados para secar.

Para a quantificação da zona de difusão de P, os papéis foram escaneados utilizando o software AutoCAD, e a área de difusão medida pelo processamento das imagens. Após o processamento das imagens, a área da zona de difusão foi transformada para diâmetro utilizando a equação (César, 2016):

$$\frac{\sqrt{A}\ x\ 2}{\pi}$$

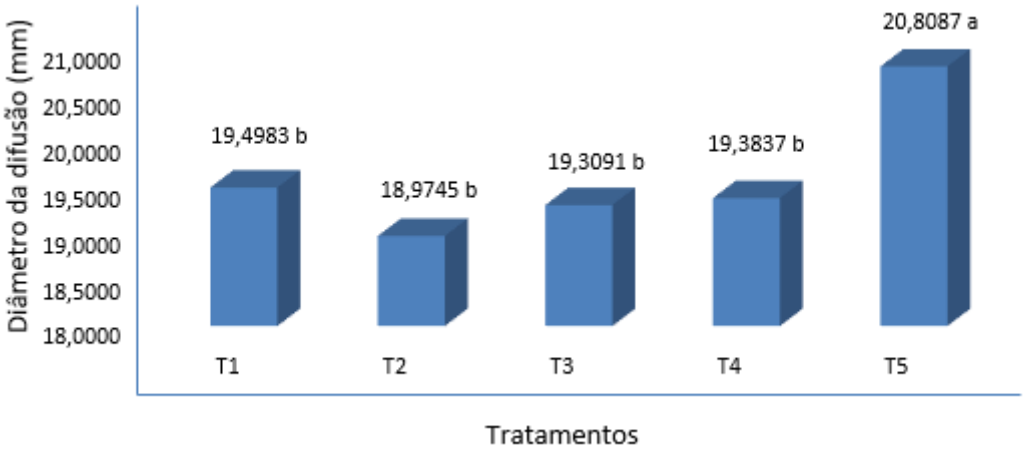
Onde:
- A é área difusão de P gerada pelo software

As médias foram submetidas à análise de variância e comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para os fertilizantes utilizados, e regressão para doses e tempos de incubação, utilizando o software Sisvar (Ferreira, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a coleta, tabulação e submissão dos dados aos testes estatísticos, os resultados obtidos foram dispostos em modelo gráfico para auxiliar a visualização. Os gráficos gerados representam a média da difusão das fontes dos fertilizantes utilizados (Gráfico 1) e a variação da zona para doses em função dos tempos avaliados (Gráfico 2).

Gráfico 1: Médias de difusão (mm) dos tratamentos em função dos fertilizantes utilizados

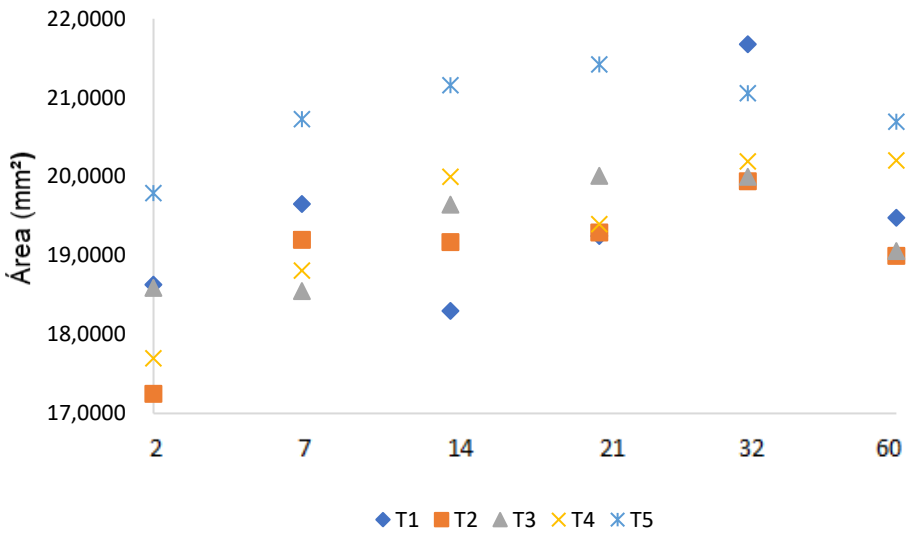


DMS: 1,06
CV(%): 5,88
Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Observando-se os valores médios dos tratamentos comparando os fertilizantes utilizados em cada um, nota-se que o tratamento cinco (T5) obteve raio de difusão 8% maior em relação aos demais. Embora o tratamento também contenha OG em sua composição, a sua associação ao polímero trouxe efeito significativo. Esse comportamento pode ser fundamentado em função da fonte utilizada na formulação do fertilizante, o qual foi o único tratamento que recebeu o polímero Avail ®.

Nesse tratamento, foi utilizada a dose recomendada pelo fabricante, e a mesma dose associada de OG. O polímero Avail ® é uma macromolécula compostas por subunidades repetitivas altamente ativas, e deste modo age como um escudo capturando os cátions que fixam o nutriente no solo e assim tornando-o disponível em solução e consequentemente gerando um aumento na difusão (Verdesian Life Sciences, 2015).

Gráfico 2: Área (mm) das doses dos fertilizantes em função das avaliações (2, 7, 14, 21, 32 e 60 dias)



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Analisando-se o gráfico, nota-se que, para a zona de difusão dos fertilizantes em função dos tempos de avaliação, não houve ajuste dos valores ao modelo de regressão. A hipótese para o ocorrido pode estar relacionada à heterogeneidade do fluxo difusivo em alguns tempos de avaliação. Notou-se que logo na primeira avaliação a difusão de todos os tratamentos atingiram entre 80% e 95% do total observado nas outras avaliações. Resultados semelhantes foram encontrados por César (2016) — a primeira avaliação aconteceu com 24 horas após a montagem do experimento e nesse período a zona atingiu 70 % a 80 % do máximo alcançado ao final do experimento.

Quanto à área total atingida, os resultados corroboram os de Andelkovic *et al*. (2018), os quais utilizaram MAP associado ou não ao OG. As fontes que não receberam óxido de grafeno em sua formulação difundiram por toda área da placa de petri a partir do primeiro dia, enquanto a fonte contendo OG teve liberação gradual alcançando em torno de 36% da área no mesmo intervalo de tempo.

Entre os principais fatores que podem afetar a difusão de P no solo estão: o teor de água no solo, a quantidade do elemento adicionado via fertilizantes que permanece na forma lábil após as reações químicas e a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) (Lehr *et al*. 1959; Degryse; Mclaughlin, 2014). Outro fator que também afeta a difusão de P, porém em menor proporção, é a granulometria das partículas do solo, pois, quanto menor forem as partículas do solo, maior será a tortuosidade dos poros. Visto isso, espera-se que a difusão de um solo argiloso seja menor quando comparado a um arenoso, considerando o parâmetro de tamanho das partículas (Lombi *et al*. 2004; César, 2016). Esse também é um possível fator que pode ter influenciado na zona de difusão, pois o solo trabalhado possui teor de argila de 55%.

Em relação ao fator de disponibilidade de água, McBeath *et al*. (2012), em seu trabalho, avaliou disponibilidade e difusão de P e zinco (Zn) de fertilizantes líquidos e

granulados, comparando aplicação em solo seco e úmido, com 80% da capacidade de campo. Embora não tenha alterado a disponibilidade dos nutrientes, a zona de difusão foi reduzida no solo seco. Outra hipótese para os resultados de difusão é a umidade do solo, pois, no período de condução do experimento (junho a agosto), a umidade relativa do ar foi quantificada, usando-se um termo-igroanemômetro Omega modelo HHF81, variando de 24,2 e 55,2%.

4 CONCLUSÃO

O tratamento com Avail® apresentou maior incremento comparando as médias de fontes dos fertilizantes utilizados. Na comparação das doses e tempos de avaliação, não houve diferença significativa.

REFERÊNCIAS

ABDEL-AZIZ, H. M. M.; SOLIMAN, M. I.; AL-SAOUD, A. M. A.; EL-SHERBENY, G. A.Waste-derived NPK Nanofertilizers Enhances Grownth and Productivity of capsicum annuum L. **Plants**, 10, 1144, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/plants10061144.

ANDELKOVIC, I. B.; KABIRI, S.; TAVAKKOLI, E.; KIRBY, J. K.; MCLAUGHLIN, M. J.; LOSIC, D. Graphene oxide-Fe (III) composite containing phosphate–A novel slow release fertilizer for improved agriculture management. **Journal of cleaner production**, 185, p. 97-104, 2018.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050**. Brasília: SAE, 2021.

CÉSAR, Fábio Ricardo Coutinho Fontes. **Eficiência agronômica de misturas no mesmo grânulo de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e enxofre elementar**. 2016. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, Roberto Ferreira *et al*. (ed.) **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 03, p. 91-132.

DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Phosphorus diffusion from fertilizer: visualizantions, chemical measurements, and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 78, p. 832-842, 2014.

DUNN, D. J.; STEVENS, A. N. D. G. Response of rice yields to phosphorus fertilizer rates and polymer coating. **Crop Management**, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1094/CM-2008-0610-01-RS.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Editores Técnicos: TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. 3 ed. rev. e ampl. Brasília, DF, 2017.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um sistema de análise estatística computacional. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, dez. 2011.

FINK J. R.; INDA A. V.; TORRENT J.; BARRÓN V.; Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Sci Agron**., 2014.

HOPKINS, B. G. Phosphorus in plant nutrition. *In*: PILBEAM, D. J.; BARKER, A. V. **Plant nutrition handbook**. 2nd ed., ch. 3, 65-26. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2015.

KABIRI, Shervin *et al*. Óxido de grafeno: um novo veículo para liberação lenta de micronutrientes vegetais. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 9, n. 49, p. 43325-43335, 2017.

LEHR, J. R.; BROWN, W. E.; BROWN, E. H. Chemical Behavior of monocalcium phosphate monohydrate in soils. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 23, n. 1, p. 3- 7, 1959.

LOMBI, E., McLAUGHLIN, M. J., JOHNSTON, C., ARMSRONG, R. D., HOLLOWAY, R. E. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. **Plant and Soil**. The Hague, v. 269, p. 25-34, 2004.

MACHADO, V. J. E.; SOUZA, C. H. E. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 1-7, 2012.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas.** São Paulo: Editora. 2006.

MCBEATH, T. M. *et al*. The effect of soil water status on fertiliser, topsoil and subsoil phosphorus utilisation by wheat. **Plant and Soil**, v. 358, p. 337-348, 2012.

NOGUEIRA, S. L., XAVIER, A. S. Obtenção, caracterização e funcionalização de nanolâminas de grafeno para remoção de turbidez de efluente têxtil. **Brazilian Journal of Development**, 2019. DOI:10.34117/bjdv5n10-234.

NOVAIS, Roberto Ferreira de. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Universidade Federal de Viçosa, 1999.

PEREIRA, E. S. do; OLIVEIRA, H. C.; FRACETO, L. F.; SANTELLA, C. Nanotechnology Potential in Seed Priming for Sustainable Agriculture. **Nanomaterials**, 11, 267, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/nano11020267.

RAGHOTAMA K. O.; KARTHIKEYAN A. S. Phosphate acquisition. **Plant Soil**, 2005.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B., CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF, EMBRAPA, 2018.

SAS, L.; RENGEL, Z.; TANG, C. Excess cation uptake and extrusion of próton and organic acid anions in Lupinus albus under P deficiency. **Plant Science**, 2001.

SCOTT, N.R.; CHEN, H.; CUI, H. Nanotechnology applications and implications of agrochemicals toward sustainable agriculture and food systems. **J. Agric. Food Chem**, 2018, 66, 6451-6456.

SOLANKI, P.; BHARGAVA, A.; CHHIPA, H.; JAIN, N.; PANWAR, J. Nano-fertilizers and Their smart delivery system. nanotechnologies in food and agrocultural. **Springer International Publishing Switzerland**, 2015.

STAUFFER, E. **Fertilizante de eficiência aumentada:** adsorção e fluxo difusivo de fósforo. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

VERDESIAN Life Sciences. **AVAIL phosphorus fertilizer booster**, 2015.

ZAMBOLIM, L. **Tecnologias de produção de café com qualidade**. Viçosa: UFV, 2001.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 38-47, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Doses e fontes de adubação fosfatada no desenvolvimento do algodoeiro

Phosphorus fertilization doses and sources in cotton development

FLÁVIA MARINA SOUSA CORRÊIA
Discente de Agronomia (UNIPAM)
flaviamarina@unipam.edu.br

DIEGO HENRIQUE DA MOTA
Professor orientador (UNIPAM)
diegoh@unipam.edu.br

Resumo: O algodão é uma cultura que apresenta elevada importância socioeconômica. O gasto elevado com fertilizantes e seus impactos ambientais têm estimulado novas alternativas ecologicamente corretas. Nesse sentido, este estudo teve o intuito de avaliar os efeitos de doses e fontes de adubação fosfatada no desenvolvimento vegetativo e reprodutivo do algodoeiro. O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC), com esquema fatorial 3 x 3 e quatro blocos, avaliando diferentes doses e fontes, respectivamente. As fontes usadas foram os fertilizantes mineral, organomineral e organomineral inoculado com *Bacillus* sp. nas doses de 50%, 75%, e 100%. Os parâmetros avaliados nas parcelas foram feitos após 100 dias da semeadura do algodoeiro, sendo avaliados, na parte vegetativa da planta, altura, número de ramos e comprimento de raiz e, na parte reprodutiva, número de botões florais, de flores e de maçãs. Concluiu-se que, nas condições deste experimento, para os parâmetros de altura, comprimento de raiz e número de ramos, os resultados não foram significativos. Para o desenvolvimento reprodutivo, a dose de 100% demonstrou resultados superiores para as variáveis avaliadas. Em relação às fontes, a fonte organomineral inoculada com *Bacillus* sp. obteve maior resultado em comparação às demais fontes utilizadas.
Palavras-chave: crescimento; *Gossypium hirsutum* L.; nutrição.

Abstract: Cotton is a crop of great socioeconomic importance. The high cost of fertilizers and their environmental impacts have encouraged the search for more environmentally friendly alternatives. In this context, the present study aimed to evaluate the effects of different phosphorus fertilization rates and sources on the vegetative and reproductive development of cotton plants. The experimental design adopted was a randomized block design (RBD), in a 3 × 3 factorial scheme with four replications, assessing different rates and sources, respectively. The phosphorus sources used were mineral fertilizer, organomineral fertilizer, and organomineral fertilizer inoculated with Bacillus sp., applied at 50%, 75%, and 100% of the recommended dose. Evaluations were performed 100 days after sowing. Vegetative parameters included plant height, number of branches, and root length, while reproductive parameters included number of floral buds, flowers, and bolls. It was concluded that, under the conditions of this experiment, the differences in plant height, root length, and number of branches were not statistically significant. However, for reproductive development, the 100% dose yielded superior results for the evaluated variables. Regarding the phosphorus sources, the organomineral fertilizer inoculated with Bacillus sp. showed better performance compared to the other sources.
Keywords: growth; *Gossypium hirsutum* L.; nutrition.

1 INTRODUÇÃO

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é uma cultura fibrosa de elevada relevância para o Brasil e para o mundo, tendo em vista sua ampla versatilidade, sendo matéria-prima para diversos produtos. Nesse viés, além de ocupar posição de destaque na produção natural de fibras, a cotonicultura é fonte para produção de óleo e farinha por meio do aproveitamento da semente, sendo a casca também utilizada na ração para gado leiteiro (Lançoni, 2018). A cultura do algodão tem grande importância socioeconômica devido à quantidade de geração de empregos e ao alto valor agregado que a atividade gera (Figueiredo, 2020).

O Brasil possui lugar privilegiado na produção mundial do algodoeiro, ocupando o terceiro lugar na safra de 2022/2023 com 3,23 milhões de toneladas produzidas, ficando atrás somente dos países China e Índia, respectivamente (ICAC, 2023). Segundo informações da Companhia Nacional de Abastecimento, na safra de 2023/2024, houve um aumento de 16,9% em área plantada quando comparada ao período anterior, sendo que a estimativa presume um novo recorde de 3,64 milhões de toneladas de pluma. As boas condições climáticas encontradas no país que favorecem o desenvolvimento do algodão são responsáveis por esses resultados progressivos de produtividade (CONAB, 2024).

No entanto, apesar da elevada produção e adaptabilidade da cultura, a alta demanda tecnológica investida no manejo e na implantação da lavoura torna o custo de produção oneroso, o que contribui para geração de riscos de perda de lucratividade (Vendruscolo *et al*., 2018). O aumento da produtividade do algodoeiro está diretamente relacionado com a utilização de técnicas adequadas no manejo da cultura, sendo importante conhecer a genética e a fisiologia da planta para que assim se alcance um maior potencial produtivo (Figueiredo, 2020).

A nutrição mineral no algodoeiro tem grande relevância no desenvolvimento da cultura, principalmente devido ao fato de os nutrientes influenciarem diretamente a qualidade da fibra. Nesse sentido, a fotossíntese, a clorofila, a fotorrespiração e as condições edafoclimáticas são fatores que estão relacionados com o fertilizante usado, uma vez que ele proporciona as condições e as concentrações que o nutriente será disponibilizado para as plantas (Figueiredo, 2020).

O fósforo é um nutriente que necessita ser aplicado em grandes quantidades nos solos brasileiros, tendo em vista a baixa disponibilidade natural e a afinidade da fração mineral pelo elemento, ocasionando os processos de adsorção e precipitação que retiram o nutriente da solução do solo. Além disso, a fixação de fósforo no solo também é um problema limitante de produção, que ocorre pela rápida formação de complexos insolúveis com cátions, especialmente alumínio e ferro em condições ácidas, tornando-o indisponível para a planta. O algodoeiro requer elevada demanda de fósforo durante quase todo seu ciclo, principalmente durante o início da formação dos botões florais até a maturação (Carvalho *et al*., 2005).

O gasto elevado com fertilizantes e seus impactos ambientais têm estimulado novas alternativas ecologicamente corretas. O fertilizante organomineral tem tido destaque na eficiência, economia e sustentabilidade das adubações, uma vez que sua composição apresenta fontes de compostos minerais e orgânicos. Ademais, a utilização

desse fertilizante proporciona vantagens ao solo, pois minimiza as perdas de nutrientes por lixiviação e fixação, favorece a liberação dos nutrientes para a planta, aumentando assim a produção das culturas. Outrossim, o fertilizante organomineral auxilia na redução da fixação do fósforo lábil fornecido ao solo, favorecendo a disponibilidade do nutriente por maior período de tempo (Lançoni, 2018).

A inoculação de microrganismos solubilizadores de fosfato (MSF) é uma tecnologia que vem sido empregada como o intuito, principalmente, de aumentar a eficiência de fósforo e, por consequência, reduzir gastos e danos ambientais, como também proporcionar maior desenvolvimento das plantas pela melhor absorção de nutrientes e água (Ribeiro *et al*., 2018). As bactérias solubilizadoras de fosfato podem agir na mineralização do fósforo orgânico e na solubilização de fosfato em minerais, aumentando assim a absorção e a disponibilidade do nutriente (Kalayu, 2019). Entre essas bactérias, o gênero Bacillus sp. tem tido relevância pela alta capacidade de fixação nitrogênio, solubilização de fósforo e secreção de hormônios vegetais como a auxina, o que proporciona uma maior resistência a problemas fitossanitários, estresses e metais pesados (Mahanty *et al*., 2017).

Com efeito, a associação de bactérias do gênero Bacillus sp. com o fertilizante organomineral pode ser uma solução para o maior aproveitamento de fósforo nas lavouras agrícolas e minimizar os custos de produção na cultura do algodão. O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos de doses e fontes de adubação fosfatada no desenvolvimento do algodoeiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Fazenda Experimental Canavial, do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), cujas coordenadas geográficas são 18º36’34”S e 46º29’16”W, a uma altitude de 891 metros em relação ao nível do mar. Segundo o método de Köppen, o clima da região é tropical, com estação seca e precipitação anual superior a 750 mm. O período de condução do estudo foi de 100 dias, abrangendo os meses de outubro a janeiro.

2.1 ADUBAÇÃO E SEMEADURA

Anteriormente à semeadura, foram coletadas amostras de solo para a realização de análise química que foi utilizada na determinação da quantidade de fertilizante a ser aplicado, de acordo com a recomendação de adubação para a cultura do algodão. O solo foi peneirado e posteriormente usado para o preenchimento dos vasos para a semeadura. As características químicas do solo utilizado encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Análise química do solo usado no preenchimento de vasos no experimento de "Doses e fontes de adubação fosfatada no desenvolvimento do algodoeiro". Patos de Minas - MG, 2024

pH	M.O.	H+Al	Al	Ca	Mg	K	CTCT	SB	P-meh	V	m
H2O	dag kg-1	cmolc dm-3							mg dm-3	%	
5,44	1,95	1,9	0,02	3,42	1,26	0,24	6,84	4,94	1,30	72,2	0,4

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Foi utilizada a recomendação de adubação para a cultura do algodão conforme proposto em Ribeiro *et al*. (1999), sendo utilizada a formulação para os fertilizantes organominerais de 05-26-00 e para o fertilizante mineral de 11-51-00. Os fertilizantes foram distribuídos de maneira uniforme por todo vaso após o encobrimento da semente com solo. A semeadura foi realizada com 3 sementes por vaso com 3 centímetros de profundidade, usando a cultivar BRS 600B3RF. A irrigação foi feita por microaspersão diariamente.

A adubação de cobertura foi feita trinta dias após a semeadura, utilizando fertilizante polimerizado com formulação 28-00-18, em que foram aplicados 2,5 gramas por vaso, fornecendo assim 0,7 gramas de nitrogênio e 0,45 gramas de potássio por parcela. No mesmo dia, foi realizado o desbaste, deixando apenas uma planta por vaso.

2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados (DBC), com esquema fatorial 3 x 3 e quatro blocos, em que foram avaliadas diferentes doses e fontes, respectivamente. As fontes usadas foram os fertilizantes mineral, organomineral e organomineral com inoculação de Bacillus sp. nas doses de 50%, 75%, e 100% da dose recomendada para a cultura, totalizando 9 tratamentos (Tabela 2). A inoculação do fertilizante com o microrganismo foi feita na sua fabricação. As unidades experimentais foram compostas por vasos de 11 litros.

Tabela 2: Descrição dos tratamentos utilizados na cultura do algodoeiro no experimento de "Doses e fontes de adubação fosfatada no desenvolvimento do algodoeiro". Patos de Minas - MG, 2024

Tratamento	Descrição	Dose por parcela (g)
T1	Mineral 11-51-00 50%	1,3
T2	Mineral 11-51-00 75%	1,7
T3	Mineral 11-51-00 100%	2,6
T4	Organomineral 05-26-00 50%	2,6
T5	Organomineral 05-26-00 75%	4,5
T6	Organomineral 05-26-00 100%	5,3
T7	Organomineral Bacillus sp 05-26-00 50%	2,6
T8	Organomineral Bacillus sp 05-26-00 75%	4,5
T9	Organomineral Bacillus sp 05-26-00 100%	5,3

Fonte: dados da pesquisa, 2024

2.3 AVALIAÇÕES

Os parâmetros avaliados nas parcelas foram feitos após 100 dias da semeadura do algodoeiro, sendo avaliados, na parte vegetativa da planta, altura, número de ramos e comprimento de raiz e, na parte reprodutiva, número de botões florais, de flores e de maçãs. Foi avaliada a altura de plantas com o auxílio de uma trena graduada do nível do solo à inserção da última folha, bem como para comprimento de raiz em que foi medida a raiz principal abaixo do solo, em que, para isso, foram retiradas as plantas dos vasos, eliminando o excesso de solo das raízes. Pela contagem manual, determinou-se o número de ramos, de botões florais, de flores e de maçãs.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo software SISVAR e, para os resultados significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO

A análise de variância apontou que, para altura, comprimento de raiz e número de ramos, os resultados não foram significativos em relação às doses e fontes de adubação no desenvolvimento vegetativo do algodoeiro nas condições deste experimento (Tabela 3).

Sofiatti *et al*. (2011), testando doses de adubação residual fosfatada e nitrogenada, evidenciaram resultado similar em seu estudo, em que, na avaliação de crescimento de plantas de algodão, não se obteve resultado significativo pela análise de variância para a adubação fosfatada.

Kaneko *et al*. (2011), testando doses de P2O5 de 0, 60, 80, 100 e 120 kg ha-1, utilizando como fonte o superfosfato triplo, perceberam que não houve efeitos dos tratamentos altura de plantas de algodão.

Avaliando diferentes doses de fertilizante mineral e organomineral, Figueiredo (2020) concluiu, em seu experimento, que a resposta do algodoeiro não foi significativa à adubação com diferentes doses de fertilizantes organominerais na avaliação dos caracteres de população final de plantas por hectare, o número total de nós nas plantas e número total de nós reprodutivos. Contudo, para a avaliação de altura média das plantas, os tratamentos diferiram entre si, sendo que os tratamentos com 100 kg de MAP, Organomineral 400 kg ha-1 e Organomineral 500 kg ha-1 alcançaram os maiores resultados.

Tabela 3: Resumo de análise de variância para o desenvolvimento vegetativo em altura, comprimento de raiz e número de ramos em função de diferentes doses e fontes de adubação fosfatada no experimento de "Doses e fontes de adubação fosfatada no desenvolvimento do algodoeiro". Patos de Minas - MG, 2024

Pr>Fc	Altura	Comprimento de raiz	Número de ramos
Dose	0,2331	0,4771	0,1101
Fonte	0,4401	0,7402	0,2791
Interação dose e fonte	0,5331	0,4854	0,1612
Média geral	88,67	45,64	13,22
CV (%)	17,91	30,97	12,10

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

3.1 DESENVOLVIMENTO REPRODUTIVO

Os resultados estatísticos para o número de botões florais no algodoeiro evidenciou significância para as doses de fertilizante usados. De acordo com a Tabela 4, é possível verificar que a dose de 50% se diferenciou estatisticamente da dose de 100%, a qual apresentou resultado superior. A dose de 75% não se diferenciou das demais doses utilizadas. Com efeito, pode-se destacar que a dose de 75%, neste experimento, alcançou resultado estatístico semelhante ao da dose de 100% para este parâmetro avaliado.

Aquino *et al*. (2012) observaram o efeito da aplicação parcelada de doses de fósforo em algodoeiro irrigado, comparando a eficiência da adubação fosfatada com a aplicação tradicional, em semeadura. Desse modo, as doses de P ou parcelamento não aumentaram o teor e conteúdo de P, bem como o número de estruturas reprodutivas, aos 80 dias após a emergência das plantas.

Entretanto, Rosolem e Bastos (1997) afirmam que o fósforo possui grande importância para o pegamento e desenvolvimento da parte reprodutiva da planta, promovendo também aumento no crescimento de frutos e capulhos com maior massa, refletindo também no aumento de produtividade.

Tabela 4: Número de botões florais do algodoeiro em função de doses e fontes de adubação fosfatada no experimento de "Doses e fontes de adubação fosfatada no desenvolvimento do algodoeiro". Patos de Minas - MG, 2024

Doses	Número de botões florais
Dose 50%	6,75 b
Dose 75%	9,17 ab
Dose 100%	12,50 a
CV (%)	47,53
DMS	4,59

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (p>0,05).

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Os valores para o número de flores na cultura do algodão mostraram resultado significativo para a interação entre doses e fontes de adubação fosfatada, em que, em relação às doses utilizadas para os fertilizantes mineral e organomineral, não houve distinção entre os resultados obtidos. Em contrapartida, para a fonte organomineral inoculado com Bacillus sp., a dose 75% se diferenciou da dose de 100% que obteve maior resultado em comparação com essa dose; já para a dose de 50%, a dose de 100% obteve resultado estatístico semelhante (Tabela 5).

As fontes para as doses de 50% e 75% não se diferenciaram estatisticamente, como pode-se observar pela Tabela 5. Para a dose de 100%, houve uma diferença em que a fonte organomineral inoculada com Bacillus sp. mostrou resultado superior em relação às outras fontes usadas. Nessa mesma dose, as fontes mineral e organomineral não apresentaram diferenças estatísticas.

A disponibilidade do fósforo não lábil pode ser facilitada para as plantas pela diminuição da fixação do nutriente no solo, o que contribuirá com a maior eficiência da adubação fosfatada e consequentemente na redução dos custos de produção (Bortonio, 2023). Os microrganismos solubilizadores de fosfato, como a bactéria Bacillus sp., podem agir em todas as etapas que compõem o ciclo do fósforo: dissolução-precipitação, sorção-dessorção e mineralização-imobilização (Sharma *et al*., 2013).

Tabela 5: Número de flores no algodoeiro em função de doses e fontes de adubação fosfatada no algodoeiro no experimento de "Doses e fontes de adubação fosfatada no desenvolvimento do algodoeiro". Patos de Minas - MG, 2024

	Mineral	Organomineral	Organomineral Bacillus sp.
Dose 50%	2,25 Aa	2,50 Aa	2,75 Aab
Dose 75%	2,50 Aa	2,25 Aa	1,50 Ab
Dose 100%	1,75 Ba	2,25 Ba	5,0 Aa
CV (%)		54,5	
DMS - Doses dentro de Fontes		1,4	
DMS - Fontes dentro de Doses		2,4	

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey (p>0,05).

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

O resultado estatístico para as fontes usadas no algodoeiro foram significativos para o parâmetro avaliado de número de maçãs. Nesse sentido, a fonte organomineral inoculada com Bacillus sp. demostrou superioridade à fonte mineral nos resultados estatísticos observados na Tabela 6. A fonte organomineral convencional não se diferenciou das demais fontes utilizadas.

Em estudo similar, Leite (2020) observou que, em número de maçãs, de flores, de ramos reprodutivos e clorofila total, as maiores médias dessas quatro características foram alcançadas pela dose de 100% da recomendação para a cultura. Nessa mesma literatura, concluiu-se que o fertilizante organomineral tem grande potencial para substituição da adubação mineral na cultura do algodão.

Tabela 6: Número de maçãs no algodoeiro em função de fontes de adubação fosfatada no experimento de "Doses e fontes de adubação fosfatada no desenvolvimento do algodoeiro". Patos de Minas - MG, 2024

Fontes	Número de maçãs
Mineral	1,92 b
Organomineral	2,42 ab
Organomineral Bacillus sp.	4,12 a
CV (%)	73,33
DMS	2,12

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (p>0,05).

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

4 CONCLUSÃO

Concluiu-se que, nas condições deste experimento, para os parâmetros de altura, comprimento de raiz e número de ramos, os resultados não foram significativos. Para o desenvolvimento reprodutivo, a dose de 100% demonstrou resultados superiores para as variáveis avaliadas. Em relação às fontes, a fonte organomineral inoculada com *Bacillus* sp. obteve maior resultado em comparação às demais fontes utilizadas.

REFERÊNCIAS

AQUINO, L. A. de. *et al*. Parcelamento de fósforo em algodoeiro irrigado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 1, p. 1-8, 2012.

BORTONIO, N. S. **Associação de Bacillus sp. ao organomineral 06.30.00 na cultura do milho**. 2023. 39 f. TCC (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2023.

CARVALHO, M. da C. S.; BARBOSA, K. de A.; LEANDRO, W. M. Resposta do algodoeiro a doses e modos de aplicação de fósforo em sistemas de plantio direto e convencional no cerrado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 5., 2005, Salvador. **Algodão, uma fibra natural**: anais. [*S. l.*]: Abapa: EMBRAPA: Abrapa: Governo da Bahia, 2005.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**: safra 2023/24 décimo primeiro levantamento. Brasília, v. 11, n. 11, p.1-129, agosto 2024.

FIGUEIREDO, E. H. C. **Desenvolvimento e produtividade do algodoeiro em função de doses de adubo mineral e organomineral**. 2020. 34 f. TCC (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

ICAC – International Cotton Advisory Committee. ***Cotton Production*** **Data Portal**. 2023. Disponível em: https://icacdatabook.de.r.appspot.com/DataPortal/ChartsDetails?subGroupKey=SGK0001&chartKey=CHR0003.

KALAYU, G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. **International Journal of Agronomy**, [*S. l.*], v. 2019, p. 1-7, 2019.

KANEKO, F. H. Resposta do algodão adensado a doses de fósforo na "região dos chapadões". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 8.; COTTON EXPO, 1., 2011, São Paulo. **Evolução da cadeia para construção de um setor forte**: anais. Campina Grande, PB: Embrapa Algodão, 2011. p.1676-1681.

LANÇONI, R. **Produtividade de algodão herbáceo (*Gossypium hirsutum* L.) em função das adubações de plantio e foliar com fertilizante organomineral**. 2018. 81 f. TCC (Graduação em Agroecologia) - Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2018.

LEITE, M. A. S. **Fertilizante organomineral peletizado na cultura do algodoeiro**. 2019. 20 f. TCC (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2020.

MAHANTY, T. *et al*. Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. **Environmental Science and Pollution Research**, [*S. l.*], v. 24, n. 4, p. 3315- 3335, 2017.

RIBEIRO, A. C. *et al*. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG, CFSEMG/UFV, 1999.

RIBEIRO, V. P. *et al*. Endophytic Bacillus strains enhance pearl millet growth and nutrient uptake under low-P. **Brazilian journal of microbiology**, [*S. l.*], v. 49, p. 40-46, 2018.

ROSOLEM, C. A.; BASTOS, G. B. Deficiências minerais no cultivar de algodão IAC 22. **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 2, p. 377-387, 1997.

SHARMA, S. B. *et al*. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, [*S. l.*], v. 2, n. 587, p. 1-14, 2013.

SOFIATTI, V. *et al*. Crescimento e produção do algodoeiro irrigado em resposta a adubação fosfatada residual e nitrogenada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO & COTTON EXPO, 8., 2011, Campina Grande. Evolução da **cadeia para construção de um setor forte**: anais. São Paulo: Pb: Embrapa Algodão, 2011. p. 1835-1843.

VENDRUSCOLO, E. P. *et al*. Resposta do algodoeiro a diferentes doses de bioestimulante aplicado via semente. **Agrarian**, Dourados, v. 11, n. 39, p. 32-41, 25 maio 2018.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 48-57, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Efeitos de fontes e doses de boro em plantas de soja

Effects of boron sources and rates on soybean plants

MAYCON DOUGLAS SILVA DE ASSIS
Discente de Agronomia (UNIPAM)
mayconds@unipam.edu.br

CARLOS HENRIQUE EITERER DE SOUZA
Professor orientador (UNIPAM)
carloshenrique@unipam.edu.br

Resumo: A soja é a principal commodity de exportação do Brasil, sendo uma cultura amplamente cultivada em diversas regiões, com destaque para o Sul e o Centro-Oeste, responsáveis por 93% da produção. A produção de soja no Brasil tem crescido significativamente ao longo dos anos, com previsões otimistas para os próximos períodos. Investimentos em estudos e tecnologias são essenciais para aumentar a produtividade e a qualidade das sementes, reduzindo custos e perdas para os produtores. O boro (B) é um micronutriente essencial para as plantas, desempenhando funções importantes no desenvolvimento vegetal. Sua aplicação adequada é crucial para evitar deficiências ou toxicidade nas plantas. Diante desse cenário, o objetivo deste estudo foi avaliar fontes e doses de B na cultura da soja. O experimento foi instalado e conduzido em casa de vegetação, localizada no Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), situado na rua Rua Major Gote 808, em Patos de Minas (MG), em 27 de julho de 2024. O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 3 x 4 + 1, correspondente a três fontes de B (Ácido Bórico, Bórax e Boro 10) e quatro doses (1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 mg dm-3), em quatro repetições, mais tratamento controle sem adição de B. Foram utilizados vasos do tipo jardineira com solo de textura arenosa, foi feito sulcos de semeadura com profundidade de 5 cm e 42 cm de comprimento em que as fontes de B foram aplicadas. As plantas foram coletadas aos 69 dias após a semeadura e levadas para o laboratório CEFERT, onde foram realizadas as avaliações e análise de B foliar. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas ao teste de Tukey ao nível de 0,05% de significância. Os resultados obtidos demonstraram que doses de B acima de 2,0 mg dm-3 aplicadas via solo em plantas de soja cultivadas em vaso geraram depleção no desenvolvimento das plantas.
Palavras-chave: fertilizante; *Glycine max*; nutrição mineral, solos.

Abstract: Soybean is Brazil's main export commodity, widely cultivated across several regions, with the South and Midwest accounting for 93% of total production. Soybean production in Brazil has increased significantly over the years, with optimistic forecasts for the coming periods. Investments in research and technology are essential to increase productivity and seed quality, while reducing costs and losses for producers. Boron (B) is an essential micronutrient for plants, playing important roles in plant development. Its proper application is crucial to avoid deficiencies or toxicity. In this context, the aim of this study was to evaluate B sources and application rates in soybean cultivation. The experiment was conducted in a greenhouse at the University Center of Patos de Minas (UNIPAM), located at Rua Major Gote 808, Patos de Minas (MG), on July 27, 2024. A randomized block design (RBD) was used in a 3 × 4 + 1 factorial scheme, corresponding to three B sources (Boric Acid, Borax, and Boron 10) and four rates (1.0, 2.0, 3.0,

and 4.0 mg dm^{-3}), with four replicates, plus a control treatment without B application. Planter-type pots with sandy-textured soil were used, and sowing furrows were made at 5 cm depth and 42 cm length, where the B sources were applied. Plants were collected 69 days after sowing and taken to the CEFERT laboratory for evaluation and foliar B analysis. Data were subjected to analysis of variance, and means were compared using Tukey's test at a 0.05 significance level. Results showed that B rates above 2.0 mg dm^{-3} applied via soil in potted soybean plants led to depletion in plant development.
Keywords: fertilizer; *Glycine max*; mineral nutrition; soils.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max L. Merril*) é cultivada em todas as regiões do Brasil, embora com predominância nas Regiões Sul e Centro-Oeste, que respondem por 93% da produção e 78,2% de área cultivada de soja. A soja é a principal *commodity* do agronegócio brasileiro e a principal oleaginosa anual produzida e consumida em todo o mundo. O Brasil continua em constante aumento de produtividade e exportação da cultura, assegurando assim o crescimento de 2,9% do PIB do país e garantindo a sustentabilidade social e ambiental (SECOM/PR, 2023).

A produção de grão de soja no Brasil pode atingir 166.143,4 mil toneladas no período 2024/25, um aumento de 12,5% comparados com a safra 2023/24. Esse aumento se deve às condições climáticas favoráveis para o plantio em todas as regiões produtoras. Em Minas Gerais, as chuvas iniciadas no mês de outubro se destacam pela sua excelente distribuição evitando precipitações concentradas, entretanto o plantio segue com um pequeno atraso semelhante ao ocorrido na safra 2023/24; as altas temperaturas e escassez de chuva fizeram com que vários produtores adiassem o plantio (CONAB, 2024).

Para aumentar a produção, são essenciais investimentos contínuos na a realização de pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias nas áreas de nutrição do solo e de plantas, plantabilidade das culturas, tratamento de sementes, controle biológico, defensivos e suas aplicabilidades, sempre visando à sustentabilidade ambiental e minimizando os custos de produção e perdas para o produtor rural.

O boro (B) é um micronutriente e é absorvido pelas plantas na forma de ácido bórico (H_3BO_3). Na planta, ele se comporta como pouco móvel ou imóvel. Sua deficiência ocorre em tecidos de crescimento, enquanto que os sintomas de toxidez aparecem de tecidos mais velhos. O teor de toxicidade varia de acordo com a espécie vegetal, 200 mg kg^{-1} nas folhas de café, e está associado com os sintomas de clorose malhada (Malavolta, 2006).

O B desempenha um papel essencial na divisão celular das plantas, participando ativamente na produção de enzimas e no transporte de açúcares através das membranas celulares. Além disso, é fundamental na síntese de ácidos nucleicos e contribui diretamente para o processo de germinação do grão de pólen, possibilitando a fecundação e o desenvolvimento dos frutos. O B também influencia o crescimento das raízes, estruturas essenciais para a absorção de água e nutrientes necessários ao desenvolvimento vegetal. O B é encontrado na natureza em forma sólida vindo de rochas sedimentares marinhas e ou vulcânicas, normalmente encontradas perto de vulcões,

pode também estar presente em rochas encontradas submersas em água do mar (Saldanha *et al* 2016).

Fageria (1999), estudando arroz, feijão, milho, soja e trigo, concluiu que o peso da matéria seca da parte aérea e das raízes das culturas testadas foram afetadas com resultados significativos pelas doses de B. Foi feita avaliação levando em conta os níveis tóxicos de B calculado em 10% a diminuição da produtividade; os níveis de B adequados na planta variam de 10 a 75 mg kg^{-1} e os tóxicos de 20 a 153 mg kg^{-1}, dependendo da cultura.

Como na planta a faixa entre deficiência e toxidez para B é muito estreita, a adubação com esse nutriente deve ser realizada com cautela para evitar a toxidez. O efeito residual esperado é de quatro a cinco cultivos tanto para a adubação a lanço como para aquela feita parceladamente no sulco. No entanto, recomenda-se fazer análise foliar e do solo a cada dois cultivos, para verificar se há necessidade de reaplicação desses nutrientes (Sousa; Lobato, 2004).

Em solos não cultivados, quando não se dispõe de resultados da análise do solo, recomenda-se aplicar, a lanço, a seguinte adubação: 2,0 kg ha^{-1} de boro + 2,0 kg ha^{-1} de cobre + 6,0 kg ha^{-1} de manganês + 0,4 kg ha^{-1} de molibdênio + 6,0 kg ha^{-1} de zinco. Em áreas de Cerrado, as deficiências mais comuns de micronutrientes são boro (B), cobre (Cu) e zinco (Zn). No caso de B, por ser móvel no solo, sua aplicação poderá ser feita em cobertura. Dependendo-se da quantidade aplicada, o efeito residual da aplicação de micronutrientes para correção do solo é longo (4 a 6 anos), portanto muito cuidado deverá se dar às doses dos fertilizantes, uma vez que o limite entre deficiência e toxidez é muito estreito, principalmente, no caso de B (Sousa; Lobato, 2004).

Este trabalho tem por objetivo avaliar fontes e doses de Boro (B) na cultura da soja.

2 METODOLOGIA

2.1 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO

O experimento foi instalado e conduzido em casa de vegetação, localizada no Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), na Rua Major Gote 808, em Patos de Minas (MG), com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 18º 34′ 46′′ sul, longitude 46º 31′ 6″ oeste, com altitude de 842 m. O clima predominante da região é o tropical com estação seca no inverno e chuva no verão. O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 3 x 4 + 1, correspondente a três fontes de B (Ácido Bórico (17%), Bórax (11%) e Boro 10 (10%) e quatro doses (1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 mg dm^{-3}), em quatro repetições, mais tratamento controle sem adição de B.

Foram utilizados vasos do tipo jardineira com capacidade para 7 L. Para enchimento dos vasos, foi utilizado solo de textura arenosa coletado no Distrito de Veredas (MG). Uma amostra do solo foi enviada ao laboratório Terrena, onde foi feita a análise química do solo, cujos resultados foram: pH Água: 4,22 mg L^{-1}; Ca: 0,32; Mg: 0,16; Al: 2,78; H + Al: 7,51; K: 0,04; CTC(T): 8,03 $cmol_c$ dm^{-3}; P-rem: 20,22 mg L^{-1}; P-Melich: 1,79 mg dm^{-3}; S: 3,11; B: 0,38 mg dm^{-3}; Cu: 0,43; Fe: 438,12; Mn: 2,19; Zn: 0,53 mg dm^{-3}.

A obtenção e pesagem do corretivo de solo e dos fertilizantes foi realizada utilizando a infraestrutura do Laboratório e Central de Análises de Fertilidade do Solo (CEFERT) – Bloco H, UNIPAM. Para correção do pH do solo, foram pesados 21,2 g vaso^{-1} de calcário dolomítico. A aplicação do calcário foi realizada no dia 12 de julho de 2024. Os vasos foram irrigados diariamente com 300 mL água^{-1}, mantendo a umidade para que o calcário realizasse a neutralização do Alumínio (Al). A adubação de plantio foi realizada com 160 mg vaso^{-1} de P_20_5 via supersimples; 315 mg vaso^{-1} de N via ureia e 2500 mg vaso^{-1} de K via cloreto de potássio.

A semeadura foi realizada no dia 27 de julho de 2024. Foram utilizadas sementes de soja, cultivar CZ 37B39I2X com tecnologia Intacta2 *Xtend*, inoculadas com *Bradyrhizobium* na dose de 2 mL kg^{-1} sementes. Foram feitos sulcos de plantio com profundidade de 5 cm e 42 cm de comprimento (Figura 1). Após isso, o B foi aplicado juntamente com os fertilizantes de plantio. Feita a cobertura dos sulcos, foram semeadas doze sementes vaso^{-1} 4x3, espaçadas em 0,045 m, sendo que destas oito foram seccionadas 23 dias após a germinação, deixando apenas quatro plantas vaso^{-1}. A irrigação foi realizada diariamente com 300 mL de água vaso^{-1} nos estádios vegetativos VE para V1. De V2 para R1 a irrigação foi ajustada para 500 mL vaso^{-1} e, devido ao aumento da temperatura, foi reajustada para 1000 mL vaso^{-1}.

Figura 1: (A) Esquematização do sulco de plantio no vaso,
(B) esquematização da aplicação do B e sementes
UNIPAM. Patos de Minas - 2024

A **B**

Fontes: arquivo dos autores (A) e elaboração dos autores (B), 2024.

Nos dias 16 e 28 de agosto de 2024, foram realizadas adubações de cobertura, utilizando fertilizante mineral misto, com garantias de 08% de N, 53% de P, 8% de K, 1,8% de Mg e 2,4% de S. Foram dissolvidos 10,4 g deste fertilizante em 10 L de água e aplicados 200 ml vaso^{-1}. No dia 06 de setembro, foi realizada adubação foliar, utilizando 4 g de MAP foliar, 3g de ureia e 2g de sacarose dissolvidos em 1 L de água. Essa solução foi aplicada com o auxílio de uma bomba costal com capacidade para 5 L.

Com o objetivo de controlar a proliferação de *Frankliniella schultzei* (trips), foram realizadas, com o auxílio da bomba costal supracitada, 2 pulverizações, utilizando o

inseticida Pirate, na dose de 1,5 mL para cada 2 L de água. A primeira aplicação ocorreu no dia 08 e a segunda no dia 15 setembro de 2024.

2.2 AVALIAÇÕES

Aos 63 dias após a semeadura (DAS), foram realizadas as avaliações de níveis de clorofila foliar (SPAD), diâmetro do colmo e altura de parte aérea (HPA); em seguida, as plantas foram coletadas para realizar as avaliações de massa seca de raiz (MSR), massa seca de parte aérea (MSPA) e o teor de B foliar (TBF). Utilizando-se o equipamento de SPAD da Konica Minolta, foi realizada a leitura do índice SPAD, do folíolo central do terceiro trifólio completo, selecionado da parte apical para o caule. Com o auxílio do paquímetro, foram realizadas as medidas do DC com uma fita métrica; também foi coletada a HPA de cada planta; em seguida, as plantas foram cortadas rente ao solo e colocadas em sacos de papel, identificados com o tratamento e a repetição. Utilizando-se uma peneira e um balde com água, as raízes foram separadas e colocadas também em sacos de papel, seguindo o mesmo padrão de identificação.

As plantas e raízes acondicionadas em sacos foram levadas ao laboratório CEFERT, onde foram colocadas em estufa de ar quente para a secagem do material. Após a secagem, foi realizada a pesagem da MSPA e MSR. Em seguida, a parte aérea das plantas foi triturada individualmente em um moinho de facas, e o material resultante foi armazenado em sacos plásticos devidamente identificados com o tratamento e a repetição.

O material resultante do processo de trituração das plantas foi utilizado para a determinação do teor de B em cada amostra. Para isso, foram transferidos 30 g de amostra, individualmente, para cadinhos de porcelana. Em seguida, os cadinhos foram colocados em uma mufla e submetidos à temperatura de 500°C por um período de oito horas. Após o resfriamento, foram obtidas amostras que continham somente minerais que não volatilizam com a alta temperatura.

O B reage com a azometina-H formando um uma mistura de cor amarelada, que absorve a luz na região de 460 nm (Tedesco *et al*. 1995). Para a determinação do teor de B no material vegetal, foi utilizado o método com azometina-H. Pipetou-se 1,0 mL de cada amostra (extrato nitroperclórico) em copos plásticos de 30 mL devidamente identificados. Em seguida, foram adicionados 2 mL da solução tampão e 2 mL da solução de azometina-H. As amostras ficaram em descanso por 30 minutos; após isto, foram analisadas, utilizando-se o espectrofotômetro. Os resultados obtidos da leitura do espectrofotômetro foram submetidos à fórmula B mg kg^{-1} = mg L^{-1} x 50 (Meneghetti, 2018). Os resultados obtidos com as avaliações foram submetidos à análise de variância, e as médias comparadas ao teste de Tukey ao nível de 5% de significância, utilizando-se o software Sisvar (Ferreira, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as variáveis analisadas, houve interação significativa para doses de B dentro de cada nível de fonte (Tabela 1). Também se observou que, independentemente da fonte utilizada, o aumento da dose de B acima de 2 mg dm^{-3} acarretou nas plantas de

soja a redução do diâmetro do colmo, da altura de parte aérea (HPA), da massa seca de raiz (MSR), da massa seca de parte aérea (MSPA) e do índice SPAD. Contudo, o incremento das doses de B promoveu aumento dos níveis de teor de B foliar (TBF) (Figura 2).

Tabela 1: Médias de diâmetro colmo, altura de parte aérea (HPA), massa seca de raiz (MSR) massa seca de parte aérea (MSPA), índice SPAD e o teor de B foliar (TBF), de plantas de soja cultivadas em vaso em função da aplicação de doses de B via solo, UNIPAM. Patos de Minas, 2024

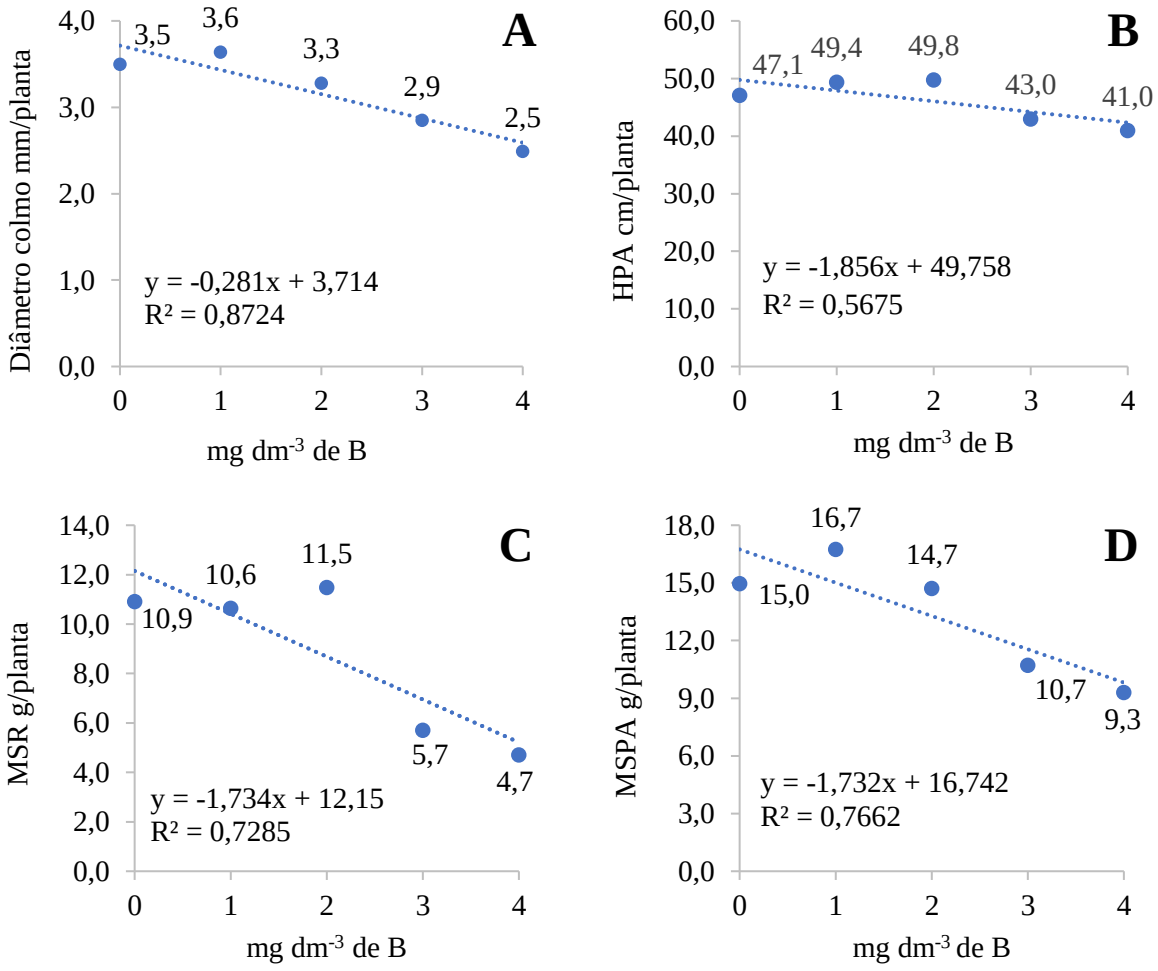
Fontes	Diâmetro do Colmo				
	mg dm^{-3} de B				
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0
Borax	3,5 a	3,7 a	3,1 a	2,7 a	2,4 a
Boro 10	3,5 a	3,7 a	3,5 b	2,8 a	2,5 a
Ácido Bórico	3,5 a	3,6 a	3,3 a b	3,1 b	2,6 a
DMS: 0,28					
Fontes	HPA				
	mg dm^{-3} de B				
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0
Borax	47,1 a	48,2 a	49,9 a	42,9 a	41,3 a
Boro 10	47,1 a	48,3 a	51,6 b	43,1 a	41,8 a
Ácido Bórico	47,1 a	51,6 b	47,9 c	46,0 b	42,2 a
DMS: 1,23					
Fontes	MSR				
	mg dm^{-3} de B				
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0
Borax	10,9 a	11,7 a	10,4 a	7,0 a	4,8 a
Boro 10	10,9 a	10,7 b	11,1 a	5,1 b	4,6 a
Ácido Bórico	10,9 a	9,6 c	12,9 b	5,3 b	4,6 a
DMS: 0,73					
Fontes	MSPA				
	mg dm^{-3} de B				
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0
Borax	15,0 a	16,4 a	14,6 a	9,6 a	8,7 a
Boro 10	15,0 a	15,8 a	15,5 b	10,6 b	9,5 b
Ácido Bórico	15,0 a	18,0 b	14,0 a	11,9 c	10,0 b
DMS: 0,70					
Fontes	Índice SPAD				
	mg dm^{-3} de B				
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0
Borax	32,1 a	32,1 a	33,7 a	31,6 a	25,5 a
Boro 10	32,1 a	34,8 b	34,7 a	27,8 b	28,9 b

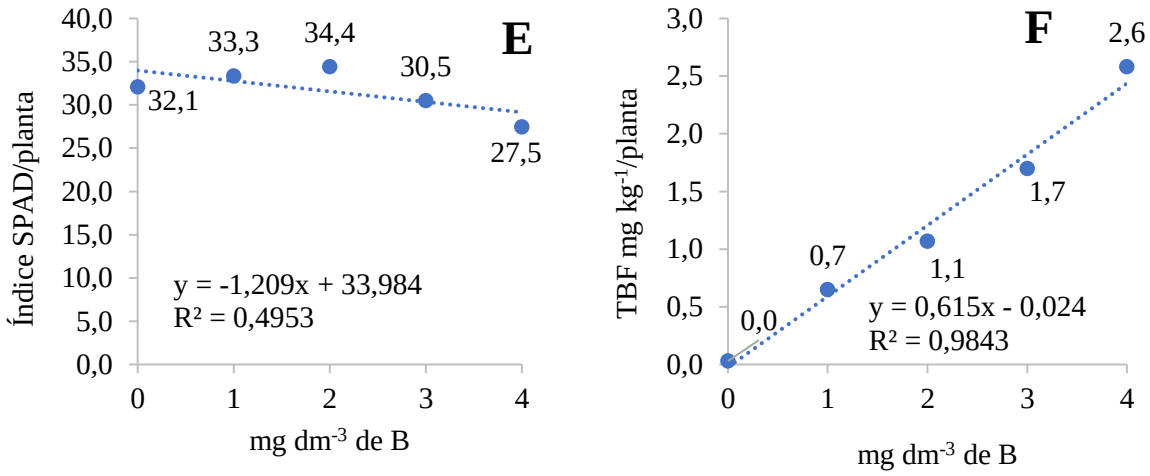
Ácido Bórico	32,1 a	33,1 a	34,9 a	32,2 a	28,1 b
DMS: 1,36					
Fontes	TBF				
	——— mg dm^{-3} de B ———				
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0
Borax	0,0 a	0,8 a	1,1 a	2,3 a	2,8 a
Boro 10	0,0 a	0,6 b	1,2 a	1,5 b	2,3 b
Ácido Bórico	0,0 a	0,6 b	0,9 b	1,3 b	2,6 c
DMS: 0,21					

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05% de significância.

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Figura 2: Modelo ajustado para (A) diâmetro de colmo, (B) altura de parte aérea (HPA), (C) massa seca de raiz (MSR), (D) massa seca de parte aérea (MSPA), (E) índice SPAD e (F) teor de B foliar (TBF), de plantas de soja cultivadas em vaso em função da aplicação de doses de B via solo, UNIPAM. Patos de Minas – MG, 2024





Fonte: dados da pesquisa, 2024.

A redução do diâmetro do colmo (Figura 2A) e a da altura de parte aérea (Figura 2B) com o aumento das doses de B também foram observadas por Raimundi *et al* (2013) quando aplicaram ácido bórico em sulco de plantio — o tratamento controle se diferenciou positivamente quando comparado aos demais tratamentos. Resultado diferente quanto à altura de parte aérea foi constatado em um estudo realizado por Somavila *et al* (2022), ao aplicarem ulexita com 10% de B, no sulco de plantio; relataram que não houve diferença significativa na altura de parte aérea. Esse resultado foi atribuído à baixa solubilidade da ulexita em água, resultando em uma liberação lenta de B. Devido a essa característica, o efeito de fitotoxidez foi minimizado, permitindo o desenvolvimento normal das plantas.

Observou-se a redução de massa seca de raiz (Figura 2C) e massa seca de parte aérea (Figura 2D) para os tratamentos com dose acima de 2 mg dm^{-3} de B. Trautmann *et al*. (2014) conduziram um estudo em casa de vegetação localizada no Núcleo de Estações Experimentais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Ao aplicarem ácido bórico e ulexita em sulco de plantio nas doses de 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 mg dm^{-3}, em um solo de textura argilosa com teor inicial de B de 0,6 mg dm^{-3}, não notaram interação significativa entre fonte e dose para a variável massa seca de parte aérea. No entanto, para a variável massa seca de raiz, foi evidenciada uma interação significativa, mostrando que o aumento das doses de B, independentemente da fonte, influenciaram negativamente no volume radicular. Furlani *et al* (2001) conduziram um experimento em casa de vegetação, localizada no Núcleo Experimental de Campinas, do Instituto Agronômico de Campinas (IAC). Aplicaram solução nutritiva em vasos nas doses de 0,00; 0,05; 0,20; 0,80; 2,00 mg L^{-1} de B; posteriormente semearam as sementes de soja. Como resultado constataram que as doses mais altas de B acarretaram em diminuição da massa seca de parte aérea e massa seca de raiz.

O incremento das doses de B resultaram na diminuição do Índice SPAD (Figura 2E). Segundo Sfredo e Borkert (2004), a fitotoxidez de B em plantas de soja é caracterizada pelo surgimento de manchas de coloração parda nas bordas das folhas. Essas manchas podem progredir para necrose nas margens e pontuações entre as nervuras. Além disso, observa-se o encarquilhamento das folhas mais velhas, o

encurtamento dos internódios e a morte da gema apical. Furlani *et al.* (2001) reportaram sintomas de fitotoxidez foliar em plantas de soja submetidas a aplicações de B via solo em doses de 0,80 e 2,00 mg L^{-1}. As plantas apresentaram clorose em folhas mais velhas, além de manchas necróticas de coloração avermelhada a preta.

Com o incremento das doses de B aplicadas, houve aumento nos teores de B nas folhas (Figura 2F). Resultados semelhantes foram observados por Buzatto (2023), ao utilizar ácido bórico como fonte de B, nas doses de 0; 1,5; 3,0; 4,0 e 6,0 kg ha^{-1}, aplicadas via solo em campo experimental no município de Chapadão do Sul (MS); constataram que o aumento das doses de B resultaram em maior teor de B foliar em plantas de soja. Trautmann *et al*. (2014) também observaram uma interação significativa entre fontes e doses de B; ao avaliarem o teor de B foliar em plantas de soja, constataram que o aumento das doses (0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 mg dm^{-3}) resultou no aumento contínuo da concentração de B no tecido foliar. David (2019) conduziu um experimento para avaliar os efeitos de doses de B em plantas de soja, ao aplicar via sulco de plantio ácido bórico e ulexita, nas doses de 0,0; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 mg dm^{-3}; constatou-se que o aumento das doses de B acarretaram no aumento linear nos teores foliares de B.

5 CONCLUSÕES

Concluiu-se que doses de B acima de 2,0 mg dm^{-3} aplicadas via solo em plantas de soja cultivadas em vaso geraram depleção no desenvolvimento das plantas.

REFERÊNCIAS

BUZATTO, J. V. L. **Efeito da aplicação de boro na nutrição e na produtividade da soja**. TCC (Graduação em Agronomia) - Campus Chapadão do Sul, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul, 2023.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 12, safra 2024/25, n. 2, segundo levantamento, novembro 2024.

DAVID, C. H. **Nutrição boratada na cultura da soja**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Câmpus de Chapadão do Sul, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul, 2019.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de boro na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo. **R. Bras. Eng. Agric. Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 30-33, 1999.

FERREIRA, D. F. **Sisvar**: um sistema de análise estatística computacional. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, dez. 2011. p. 1040, 2024.

FURLANI, A. M. C.; TANAKA, R. T., TARALLO, M.; VERDIAL, M. F., MASCARENHAS, H. A. A. Exigência a boro em cultivares de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 4, p. 929-937, 2001.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ed. Agr. Ceres. 2006.

MENEGHETTI, Adriana. M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise química de plantas, solo e fertilizantes**. Curitiba: EDUTFPR, 2018. *E-book*.

RAIMUNDI, D. L.; MOREIRA, G. C.; TURRI, L. T. Modos de aplicação de boro na cultura da soja. **Revista Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 6, n. 2, p. 112-121, 2013.

SALDANHA, C. B.; EMRICH, E. B.; NEGRÃO, E. N. M.; CASTIONI, G. A. F. **Ciência do solo**: fertilidade do solo e nutrição mineral de plantas. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S. A., 2016.

SFREDO, G. J.; BORKERT, M. B. **Deficiências e toxicidades de nutrientes em plantas de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2004.

SOMAVILA, J. *et al*. Influência da aplicação de boro no sulco de plantio na cultura da soja. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, v. *8*, n. 3, p. 21950-21960, 2022.

SOUSA, Djalma Martinhão Gomes de; LOBATO, Edson (ed.) **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

TEDESCO, M. J. *et al*. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

TRAUTMANN, R. R. *et al*. Potencial de água do solo e adubação com boro no crescimento e absorção do nutriente pela cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 240-251, 2024.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 58-64, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Estimativa de produtividade de silagem de milho por meio de imagem NDVI

Estimation of corn silage productivity using ndvi image

MURIEL CARDOSO ROSA
Discente de Agronomia (UNIPAM)
murielcr95@gmail.com

RODRIGO MENDES DE OLIVEIRA
Professor orientador (UNIPAM)
rodrigomo@unipam.edu.br

Resumo: O objetivo deste estudo foi avaliar a relação entre os valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e a produtividade da cultura do milho para silagem. O experimento foi conduzido na Escola Agrotécnica Afonso de Queiroz, durante a safra agrícola de 2024/2025. Utilizaram-se imagens do satélite Sentinel-2, obtidas em dezembro de 2024, com os tratamentos definidos por diferentes níveis de NDVI (0,60; 0,65; 0,70; 0,74; 0,74; 0,83). Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. A estimativa da produtividade foi realizada no estádio fenológico R5 das plantas. Os dados foram submetidos à análise de variância e ajustados por modelos de regressão. Os resultados indicaram um coeficiente de determinação próximo de 0,78, porém sem diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos. Conclui-se que o NDVI apresenta potencial como ferramenta para o estudo da variabilidade espacial, embora sua correlação com a produtividade do milho para silagem ainda necessite de investigações mais aprofundadas.
Palavras-chave: agricultura de precisão; índice de vegetação; sensoriamento remoto.

Abstract: The objective of this study was to evaluate the relationship between Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) values and the yield of corn crops for silage. The experiment was conducted at the Afonso de Queiroz Agricultural School during the 2024/2025 growing season. Satellite images from Sentinel-2, obtained in December 2024, were used, with treatments defined by different NDVI levels (0.60; 0.65; 0.70; 0.74; 0.74; 0.83). A randomized block design with four replications was adopted. Yield estimation was performed at the R5 phenological stage of the plants. Data were subjected to analysis of variance and fitted to regression models. The results indicated a coefficient of determination close to 0.78, but no statistically significant differences were found among treatments. It is concluded that NDVI shows potential as a tool for studying spatial variability, although its correlation with corn silage yield still requires further investigation.
Keywords: precision agriculture; vegetation index; remote sensing.

---

1 INTRODUÇÃO

Segundo os autores Ortiz *et al*. (2025), o milho é um dos cereais mais cultivados e consumidos no mundo, devido principalmente ao seu alto valor nutritivo e à elevada produtividade, assumindo, assim, grande relevância social e econômica. De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção de milho na safra 2024/2025 no Brasil foi de 122.760,3 mil toneladas, com 21.143,8 mil hectares de área plantada e produtividade média de 5.495 kg/ha (CONAB, 2025).

A crescente demanda por alimentos, impulsionada pelo aumento populacional, tem exigido maior eficiência na produção agrícola, tornando o uso de ferramentas e tecnologias um importante aliado do produtor rural para garantir altas produtividades. A Agricultura de Precisão (AP) teve seu desenvolvimento inicial vinculado, sobretudo, ao georreferenciamento de dados nas lavouras, por meio de tecnologias como o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Com o avanço tecnológico, consolidou-se o conceito de AP como a gestão agrícola baseada em informações detalhadas, que considera a variabilidade espacial e temporal de atributos específicos da lavoura (Molin; Amaral; Colaço, 2015).

Dentro dos temas abordados na AP, destaca-se o sensoriamento remoto (SR), técnica que consiste na obtenção de informações por meio de sensores que não mantêm contato direto com o objeto analisado, utilizando imagens georreferenciadas (Molin; Amaral; Colaço, 2015). Na AP, o SR é comumente aplicado por meio de sensores multiespectrais, os quais permitem inferir a densidade da cobertura vegetal. Essa aplicação baseia-se no princípio de que cada material possui comportamentos distintos de absorção e reflexão em diferentes faixas do espectro eletromagnético, possibilitando a associação desses dados a características fisiológicas das plantas, como área foliar e acúmulo de biomassa (Molin; Amaral; Colaço, 2015).

De acordo com Lima, Cunha e Oliveira (2023), programas computacionais são empregados no processamento dessas imagens, e, por meio de equações matemáticas, são gerados os Índices de Vegetação (IV), os quais variam conforme o parâmetro de interesse, como a estimativa de teor de clorofila ou a eficiência da fotossíntese. Dentre os IVs disponíveis, destaca-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), amplamente utilizado em estudos voltados à avaliação nutricional das plantas, à correlação com estádios fenológicos e à estimativa da produtividade agrícola (Shiratsuchi *et al*., 2014).

Diversos estudos têm evidenciado a relação entre Índices de Vegetação (IV) e a produtividade de culturas agrícolas. Vian *et al*. (2018) demonstraram correlação significativa entre os valores de NDVI obtidos em diferentes estádios fenológicos e a produtividade das parcelas. Bredemeier *et al.* (2013), por sua vez, utilizaram valores de NDVI capturados por sensor óptico ativo para estimar a produtividade de distintas cultivares de trigo em variados estádios de desenvolvimento, obtendo correlações estatisticamente relevantes. Embora o NDVI apresente forte correlação com a produtividade de determinadas culturas, ainda são escassos os estudos que abordam sua aplicação na estimativa da produção de milho para silagem. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo relacionar os valores do Índice de Vegetação por

Diferença Normalizada (NDVI) com classes de potencial produtivo do milho destinado à produção de silagem.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Escola Estadual Agrotécnica Afonso Queiroz, situada no município de Patos de Minas – MG, nas coordenadas geográficas 18°36'32" S de latitude e 46°29'10" O de longitude, no período compreendido entre novembro de 2024 e fevereiro de 2025. A área experimental correspondeu a um talhão destinado ao cultivo de milho para silagem, totalizando 14,50 hectares. O clima local é classificado como Aw, segundo a classificação climática de Köppen, caracterizado como tropical com estação seca no inverno, apresentando temperatura média no mês mais frio superior a 18 °C e precipitação anual variando entre 750 mm e 1800 mm. A cultura implantada foi o milho híbrido Pioneer 4285, com densidade populacional de 70.000 plantas por hectare e espaçamento de 0,50 m entre linhas. A adubação de base consistiu na aplicação de 300 kg ha^{-1} de MAP no plantio, enquanto a adubação de cobertura foi realizada no estádio fenológico V4, com 400 kg ha^{-1} do fertilizante formulado NPK 30-00-20.

Os tratamentos foram organizados segundo o delineamento em blocos casualizados (DBC), com cinco tratamentos (Tabela 1) distribuídos em quatro blocos, totalizando 20 parcelas experimentais. Os blocos foram constituídos por faixas de terra com área total de 1.575,00 m² cada. A área de cada parcela correspondeu a 5 m², sendo considerada como área útil as duas linhas centrais da parcela, com 1 metro de comprimento, totalizando 2 m² por unidade experimental.

Tabela 1: Descrição dos tratamentos. Patos de Minas - MG, 2025

Tratamentos	NDVI
T_1	0,60
T_2	0,65
T_3	0,70
T_4	0,74
T_5	0,83

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Os níveis de NDVI foram determinados conforme a metodologia descrita por Lima, Cunha e Oliveira (2023). Para isso, utilizou-se uma imagem obtida por meio da plataforma Sentinel Hub, proveniente do satélite Sentinel-2. A imagem selecionada corresponde à segunda semana de dezembro de 2024, período em que as plantas de milho estavam no estádio fenológico V4.

O NDVI foi calculado por meio da Equação 1, em que *RNIR* representa a refletância no infravermelho próximo e *RR* a refletância no vermelho. Foram utilizadas, respectivamente, as bandas 8 (infravermelho próximo) e 4 (vermelho) do satélite. O processamento e o tratamento das imagens foram realizados no software QGIS, versão 3.16.3.

Equação 1 - $NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_R)}{(R_{NIR} + R_R)}$

A imagem gerada no formato NDVI foi composta por pixels com resolução espacial de 30 × 30 metros. Após a geração do mapa, foram selecionados os pontos correspondentes a cada tratamento dentro dos blocos experimentais. As coordenadas desses pontos foram extraídas e inseridas em um receptor GPS Garmin eTrex 10. Por meio do recurso de navegação por satélite do equipamento, foi possível localizar com precisão cada ponto para a realização da amostragem em campo.

A avaliação final foi realizada no mês de fevereiro, quando as plantas de milho encontravam-se no estádio fenológico V4. A estimativa de produtividade de cada parcela foi obtida por meio da contagem do número de plantas presentes na área útil (2 m^2). Em seguida, as plantas foram coletadas, sendo cortadas a 30 cm do solo com o auxílio de uma foice e uma trena para aferição da altura de corte. As plantas foram então fragmentadas em porções menores e acondicionadas em sacos devidamente identificados.

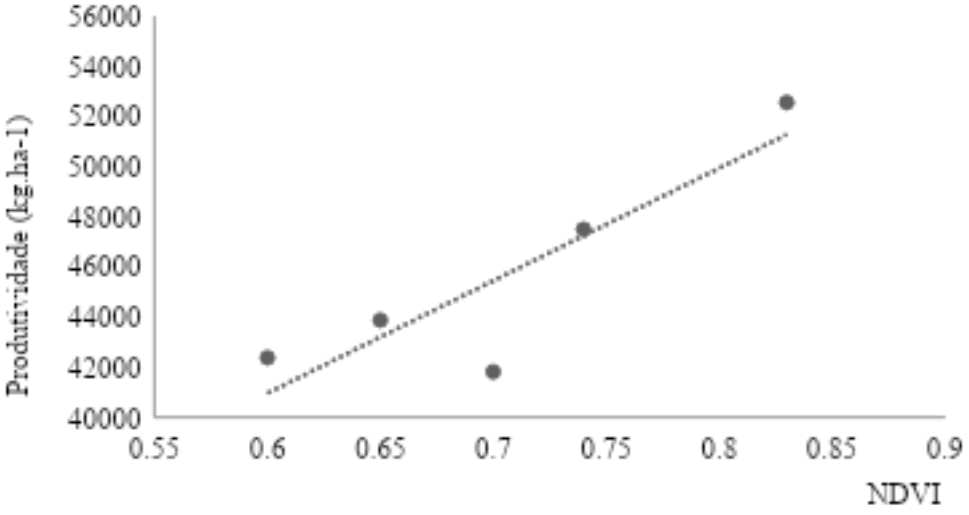
Posteriormente, o material foi pesado com o auxílio de uma balança mecânica, obtendo-se o peso da matéria verde. A estimativa de produtividade foi então extrapolada para uma área de 10.000 m^2, e os resultados foram expressos em quilos por hectare (kg. ha^{-1}).

Os dados de produtividade foram organizados em planilhas e submetidos à análise de variância (ANOVA) por meio do software Sisvar® (FERREIRA, 2011). Para verificar a significância estatística dos efeitos dos tratamentos, aplicou-se o teste F com nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$). Além disso, foram realizados ajustes por regressão, com o objetivo de identificar o modelo matemático que melhor representasse a relação entre os níveis de NDVI e a produtividade do milho para silagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de produtividade dos pontos georreferenciados, comparados aos respectivos valores de NDVI obtidos em 9 de dezembro de 2024, são apresentados na Figura 1. Observa-se uma boa aproximação dos valores quando submetidos à análise de regressão linear, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,78, indicando uma tendência positiva entre as variáveis. Contudo, ao serem submetidos à análise de variância (ANOVA), os resultados não apresentaram significância estatística ($p > 0,05$), não permitindo afirmar, com rigor estatístico, a existência de uma correlação consistente entre as variáveis avaliadas.

Figura 1: Produtividade dos tratamentos em relação aos valores de NDVI
Patos de Minas - MG, 2025



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 1, observa-se uma variabilidade espacial na produtividade do milho para silagem nos pontos amostrados, com tendência de aumento da produtividade à medida que os valores de NDVI se elevam. Essa variação representa, aproximadamente, um incremento de 24% na produtividade quando se comparam os valores de NDVI iguais a 0,60 e 0,85. No entanto, para o NDVI de valor 0,70, foi verificada uma queda na produtividade em relação aos demais. Esse comportamento pode estar associado à presença de plantas daninhas nas parcelas correspondentes a esse índice, as quais podem ter contribuído para o aumento do valor de NDVI, interferindo no desenvolvimento das plantas de milho.

Segundo os autores Huete *et al*. (2002), o NDVI detecta a presença de clorofila e outros pigmentos relacionados à absorção da radiação solar na banda do vermelho. No presente estudo, essa detecção não distinguiu as plantas de milho das plantas daninhas, o que pode ter provocado um aumento artificial nos valores de NDVI nas parcelas com índice 0,70, sem refletir, de fato, uma condição favorável à cultura.

Os autores Matias, Streeck e Aguilar (2015) também verificaram maiores produtividades em áreas com elevados valores de NDVI, observando um incremento aproximado de 3,72%. De modo semelhante, Vian *et al.* (2018) constataram que áreas com maiores valores de NDVI apresentaram produtividades superiores na cultura do milho para grão. Segundo os referidos autores, a variação nos valores de produtividade pode estar relacionada a fatores como população e crescimento das plantas, estado nutricional, incidência de pragas, ocorrência de doenças e presença de plantas daninhas.

Trabalhando com estimativa de produtividade de sorgo por meio de imagem NDVI os autores Lima, Cunha e Oliveira (2023) observaram um aumento na produtividade associado a maiores índices de NDVI; contudo, essa diferença não foi estatisticamente significativa. Os autores sugerem que esse efeito pode ter sido

influenciado pela matocompetição nos pontos amostrados. De acordo com Rossi *et al*. (1996), a presença de plantas infestantes reduz a produtividade da cultura devido à competição por recursos, fenômeno constatado nas parcelas com índice de NDVI igual a 0,70 no presente estudo.

Segundo Raupp e Rosa (2024), o NDVI tem se mostrado um bom indicador do vigor vegetativo das plantas, sendo utilizado para monitoramento e acompanhamento de lavouras. Para Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2012) e Ferreira *et al.* (2024), esse índice destaca-se pela capacidade de avaliar o vigor das plantas, possibilitando intervenções mais precisas em momentos críticos. Ainda assim, são escassos os estudos que exploram essa tecnologia, o que evidencia a necessidade de novas pesquisas sobre o tema.

4 CONCLUSÃO

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) demonstrou ser uma ferramenta promissora para o estudo da variabilidade espacial do milho destinado à produção de silagem. No entanto, a correlação entre esse índice e o potencial produtivo da cultura ainda requer aprofundamento por meio de novos estudos, a fim de se obter resultados mais assertivos.

REFERÊNCIAS

BREDEMEIER, C. *et al*. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 7, p. 1147-1154, jul, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782013005000080.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Portal de Informações Agrícolas**: Safra – Série Histórica dos Grãos. 2025. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, W. B. *et al*. Comparação de três diferentes sensores espectrais na produção de NDVI e NDRE para Agricultura de Precisão. **Ciência Agrícola**, v. 22, p. 1-6, 2024. Disponível em: https://www.seer.ufal.br/index.php/revistacienciaagricola/article/view/18461.

HUETE, A. R. *et al*. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2.

LIMA, A. H.; CUNHA, L. P.; OLIVEIRA, R. M. Acompanhamento temporal e estimativa de produtividade de sorgo por meio de imagem NDVI. **Revista Cerrado Agrociências**, v. 14, p. 56-64, 2023. Disponível em: https://revistas.unipam.edu.br/index.php/cerradoagrociencias/article/view/5150.

MATIAS, J. F. G.; STRECK, L. AGUILAR, D. D. Geração de mapas de produtividade de milho (*Zea mays*) com índice de vegetação NDVI de imagens Landsat 8. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 17., 2015, João Pessoa. **Anais** [...]. João Pessoa: SBSR, 2015. p. 157-162.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A.F. **Agricultura de Precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 224 p.

ORTIZ, S. *et al*. Análise de crescimento em genótipos de milho para produção de silagem e grãos. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 1, p. e13513, 2025. DOI: 10.54033/cadpedv22n1-189.

PONZONI, J., SHIMABUKURO, Y. E., KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

RAUPP, S. M.; ROSA, H. A. Análise da correlação entre parâmetros produtivos da soja e índices de vegetação obtidos com imagens do satélite Sentinel-2. **Revista Cultivando o Saber**, Edição Especial, 2024. p. 64-77.

ROSSI, I. H. *et al*. Interferência das plantas daninhas sobre algumas características agronômicas e a produtividade de sete cultivares de milho. **Planta Daninha**, v. 14, n. 2, p. 134-148, 1996. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0100-83581996000200007.

SHIRATSUCHI *et al*. Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. *In*: EMBRAPA. **Agricultura de Precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília: Cubo, 2014. cap. 4. p. 58-73.

VIAN, A. L. *et al*. Limites críticos de NDVI para estimativa do potencial produtivo do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 1, p. 91-100. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/256545.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 65-73, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Fitotoxidade em soja por protioconazol e atenuação de estresse oxidativo pelo uso de mancozeb e micronutrientes

Phytotoxicity in Soybean Caused by Prothioconazole and Attenuation of Oxidative Stress Through the Use of Mancozeb and Micronutrients

ANA CECÍLIA DE LIMA PEREIRA
Discente de Agronomia (UNIPAM)
anacecilialp@unipam.edu.br

LUIS HENRIQUE SOARES
Professor orientador (UNIPAM)
luishs@unipam.edu.br

Resumo: A soja (*Glycine max* L.) é uma cultura de grande importância no cenário agrícola mundial, sendo utilizada tanto para consumo humano quanto animal. Para alcançar altos níveis de produtividade, é essencial o manejo adequado das plantas e o controle eficiente de doenças. Este estudo avalia o impacto do uso de fungicidas, como o Protioconazol, em combinação com Mancozebe, Mn e Zn, na soja, considerando diferentes horários de aplicação. O experimento foi conduzido na EPAMIG, em Patos de Minas - MG, com a aplicação de fungicidas em horários específicos para avaliar a fitotoxidade e o desenvolvimento da planta. Os resultados mostraram que o Protioconazol, especialmente quando aplicado entre 15h e 18h, foi eficiente no aumento da massa de raízes, caules e folhas, além de promover um maior número de ramificações. A temperatura foi um fator determinante na eficácia dos tratamentos, com o Protioconazol mostrando melhores resultados quando aplicado em horários de temperatura mais baixa. Não foram observadas diferenças significativas para a massa de vagens e número de vagens, indicando que a aplicação de fungicidas não teve impacto direto nessas variáveis. Assim, o Protioconazol foi identificado como o principal responsável pela melhora no desenvolvimento da soja, quando aplicado nos horários corretos, sem a necessidade de aditivos para reduzir os danos causados por estresse oxidativo.
Palavras-chave: soja; fungicidas; Protioconazol; Mancozebe; fitotoxicidade; horário de aplicação; manganês; zinco.

Abstract: Soybean (*Glycine max* L.) is a crop of great global agricultural relevance, used for both human and animal consumption. To achieve high productivity levels, proper plant management and effective disease control are essential. This study evaluates the impact of fungicide application—specifically Prothioconazole, in combination with Mancozeb, Mn, and Zn—on soybean development, considering different times of application. The experiment was carried out at EPAMIG, in Patos de Minas, Brazil, with fungicide treatments applied at specific times to assess phytotoxicity and plant development. Results showed that Prothioconazole, especially when applied between 3:00 p.m. and 6:00 p.m., was effective in increasing root, stem, and leaf biomass, as well as promoting a greater number of branches. Temperature proved to be a determining factor in the effectiveness of treatments, with Prothioconazole showing improved

outcomes when applied during cooler periods. No significant differences were observed in pod mass and pod number, indicating that fungicide application had no direct impact on these variables. Thus, Prothioconazole was identified as the main contributor to enhanced soybean development when applied at appropriate times, with no need for additives to mitigate oxidative stress-induced damage.
Keywords: soybeans, fungicides, Prothioconazole, Mancozeb, phytotoxicity, application timing; manganese; zinc.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é uma das culturas agrícolas mais produzidas no mundo, ocupando posição de destaque no cenário agrícola global devido à sua ampla utilização tanto na alimentação humana quanto animal. De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), na safra 2022/2023, o Brasil alcançou uma produtividade média de 3.532 kg de grãos de soja por hectare, em uma área cultivada de 43,83 milhões de hectares, resultando em uma produção total de 154,82 milhões de toneladas. Contudo, para atingir elevados patamares de produtividade, é imprescindível a adoção de um manejo cultural adequado, que assegure o desenvolvimento equilibrado das plantas ao longo de todo o ciclo produtivo. Um dos principais desafios enfrentados atualmente é o controle eficiente de doenças, evitando prejuízos severos às plantas (Balbinot *et al*., 2017).

A utilização de sementes com alto vigor fisiológico, o emprego de cultivares com resistência genética e a observância do período ideal de semeadura são práticas essenciais para mitigar perdas na cultura (Navarini *et al*., 2007; Polizel *et al*., 2011). Dentre as doenças que comprometem significativamente a produtividade da soja, destaca-se a ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*), considerada uma das mais severas e de difícil controle. Devido à inexistência de cultivares comerciais com resistência efetiva, tem-se intensificado o uso de fungicidas como principal estratégia de controle, o que pode ocasionar estresse oxidativo nas plantas, em decorrência tanto da superdosagem quanto da limitação temporal imposta pela curta janela de aplicação (Finoto *et al*., 2011).

Ademais, um dos principais problemas associados ao uso de fungicidas é a fitotoxicidade, a qual pode estar relacionada a diversos fatores, como condições climáticas adversas, temperatura, umidade relativa elevada e aplicação inadequada do produto. Inicialmente, esses fatores podem provocar estresses imperceptíveis; entretanto, em condições extremas, esses efeitos são potencializados, ocasionando danos significativos, tais como queima das folhas, encarquilhamento, redução de crescimento vegetativo e da floração (Godoy *et al*., 2015).

Estudos conduzidos por Calomé *et al*. (2020) demonstraram que a associação do fungicida Mancozeb com a mistura Trifloxistrobina + Protioconazol, combinação amplamente utilizada no controle da ferrugem asiática, tem contribuído para a atenuação dos efeitos fitotóxicos e a mitigação de perdas potenciais de produtividade. Tal efeito pode ser atribuído ao fato de que, além da ação protetora contra patógenos fúngicos, o Mancozeb contém micronutrientes em sua composição, os quais auxiliam na

recuperação celular e na redução do estresse causado pela mistura Trifloxistrobina + Protioconazol (Alves; Juliatti, 2018).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a intensidade dos danos provocados pelo uso excessivo de fungicidas, considerando a influência do horário de aplicação, bem como investigar de que forma esses efeitos podem ser atenuados por meio da utilização de fungicidas curativos e de micronutrientes.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO

O experimento foi conduzido na Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), no campo experimental de Sertãozinho, localizado no município de Patos de Minas – MG, na rodovia sentido Presidente Olegário, Km 18. Para a adubação corretiva, foram aplicados 270 kg·ha^{-1} de fertilizante com as seguintes concentrações de nutrientes: 07% de N, 34% de P2O5, 08% de Ca e 08% de S. Posteriormente, realizou-se a adubação de cobertura com a aplicação de 100 kg·ha^{-1} de cloreto de potássio (KCl).

Cada unidade experimental foi constituída por cinco linhas com dois metros de comprimento, espaçadas em 0,5 metro entre si. A área útil da parcela foi delimitada pelas três linhas centrais, desconsiderando-se 0,20 metro nas extremidades. A cultivar utilizada foi a Brasmax Voraz IPRO, sendo as aplicações realizadas quando as plantas atingiram o estádio fenológico R2 (pleno florescimento).

Para o manejo de plantas invasoras, foi realizada uma aplicação para dessecação utilizando 1,2 L ha^{-1} de Basagran® [Bentazona, 600 g L^{-1} (60% m/v)] + 0,8 L ha^{-1} de Poquer® [Cletodin, 240 g L^{-1} (24% m/v)] + 3 L ha^{-1} de ZAPP QI 620® (glifosato potássico, 620 g L^{-1} – 62% m/v).

Posteriormente, quando as plantas atingiram o estádio fenológico V3, próximo ao V4, foi realizada uma segunda aplicação de herbicidas, composta por 0,8 L ha^{-1} de Poquer® [Cletodin, 240 g L^{-1} (24% m/v)] + 3 L ha^{-1} de ZAPP QI 620® (glifosato potássico, 620 g L^{-1} – 62% m/v).

Para o controle de doenças, foi realizado o manejo com fungicidas nas seguintes dosagens e produtos: 0,5 L ha^{-1} de Difere® [oxicloreto de cobre, 588 g L^{-1}] + 0,3 L ha^{-1} de Orquestra® [piraclostrobina, 333 g L^{-1} + fluxapiroxade, 167 g L^{-1}], aplicados no estádio V5/V6; e 0,5 L ha^{-1} de Difere® [oxicloreto de cobre, 588 g L^{-1}] + 0,5 L ha^{-1} de Ativum® [piraclostrobina, 81 g L^{-1} + fluxapiroxade, 50 g L^{-1} + epoxiconazol, 50 g L^{-1}].

O experimento contou com 13 tratamentos, com quatro repetições cada, totalizando 52 unidades experimentais, distribuídas segundo o delineamento em blocos casualizados. As aplicações foram realizadas com pulverizador manual, considerando-se o horário de aplicação e a descrição dos tratamentos (Tabela 1).

Tabela 1: Descrição dos tratamentos. EPAMIG, Patos de Minas - MG, 2023

Tratamentos	Horários	Descrição	Doses
T1	-	-	-
T2	09:00	Protioconazol	2,0 L.ha-1
T3	12:00	Protioconazol	2,0 L.ha-1
T4	15:00	Protioconazol	2,0 L.ha-1
T5	18:00	Protioconazol	2,0 L.ha-1
T6	09:00	Protioconazol + MZB	2,0 L.ha-1 + 1,5 L.ha-1
T7	12:00	Protioconazol + MZB	2,0 L.ha-1 + 1,5 L.ha-1
T8	15:00	Protioconazol + MZB	2,0 L.ha-1 + 1,5 L.ha-1
T9	18:00	Protioconazol + MZB	2,0 L.ha-1 + 1,5 L.ha-1
T10	09:00	Protioconazol + MZB + (Mn + Zn)	2,0 L.ha-1 + 1,5 L.ha-1 + 0,3 Kg.ha-1 + 0,225 Kg.ha-1
T11	12:00	Protioconazol + MZB + (Mn + Zn)	2,0 L.ha-1 + 1,5 L.ha-1 + 0,3 Kg.ha-1 + 0,225 Kg.ha-1
T12	15:00	Protioconazol + MZB + (Mn + Zn)	2,0 L.ha-1 + 1,5 L.ha-1 + 0,3 Kg.ha-1 + 0,225 Kg.ha-1
T13	18:00	Protioconazol + MZB + (Mn + Zn)	2,0 L.ha-1 + 1,5 L.ha-1 + 0,3 Kg.ha-1 + 0,225 Kg.ha-1

MZB: Mancozeb.

2.2 AVALIAÇÕES

A importância da utilização de análises de crescimento de plantas fundamenta-se no fato de que, aproximadamente, 90% da massa seca acumulada pela planta ao longo de seu ciclo é resultante da atividade fotossintética; o restante é oriundo da absorção de nutrientes e água pelo solo (Benincasa, 2004). A partir dos dados de massa dos diferentes órgãos da planta, obtidos ao longo do seu desenvolvimento, é possível quantificar índices fisiológicos que refletem o desempenho de plantas submetidas a distintos sistemas de manejo.

A taxa de crescimento absoluto indica a velocidade de crescimento das plantas, refletindo a capacidade de incremento da massa vegetal ao longo do tempo. No entanto, para os estudos fisiológicos, a taxa de crescimento relativo apresenta maior relevância, uma vez que permite expressar o crescimento da planta em função da sua massa inicial. Isto é, a taxa de crescimento relativo considera a biomassa produzida não apenas para manutenção das estruturas preexistentes, mas também para a formação e o acúmulo de novo material estrutural.

As avaliações foram realizadas no Núcleo de Pesquisa em Fisiologia e Estresse de Plantas (NUFEP), localizado no Campus I do Centro Universitário de Patos de Minas – UNIPAM. Foram conduzidas análises de crescimento com base na massa seca de raiz, caule, folhas e cotilédones, bem como em parâmetros morfofisiológicos, como comprimento e volume radicular, número de vagens, número de nós e número de ramificações (total e unidade)

Foram coletadas quatro plantas por repetição para a realização das avaliações fenométricas, quando as plantas atingiram o estádio de desenvolvimento R6/R7. Após a coleta, procedeu-se à separação dos órgãos vegetativos: folhas, caule, raízes e

cotilédones. Em seguida, cada fração foi acondicionada em sacos de papel devidamente individualizados e identificados, sendo posteriormente encaminhada à estufa de secagem com ventilação forçada, à temperatura constante de 65 °C, até a obtenção de massa seca constante. As pesagens foram realizadas em balança digital com precisão de 0,01 g.

O volume radicular foi determinado com o uso de proveta graduada previamente preenchida com água. As raízes, após separadas do caule, foram inseridas na proveta, e a diferença entre os volumes final e inicial do líquido indicou o volume radicular da unidade experimental. A contagem do número de vagens, nós e ramificações foi realizada por observação direta. Posteriormente, todos os dados foram tabulados em planilha eletrônica e submetidos à análise estatística.

2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Após as análises, os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos para as variáveis massa de raízes, massa de caules, massa de folhas, massa de vagens, número de nós e número de ramificações, indicando estreita relação entre essas avaliações. Contudo, para o número de vagens e a massa de vagens, não foram detectadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, conforme demonstrado nas tabelas a seguir.

Tabela 2: Resultados. EPAMIG, Patos de Minas - MG, 2025

Trat	Descrição	Raiz (g)	Caule (g)	Folha (g)	Vagem (g)
T1	Controle	0,600DE	5,313BCD	1,622E	7,634ABC
T2	Protioconazol 9h	0,718BCD	5,204BCD	2,050CDE	7,028CD
T3	Protioconazol 12h	0,732BCD	5,109BCD	2,306CDE	7,600ABC
T4	Protioconazol 15h	0,800ABC	5,682 AB	2,084CDE	8,401A
T5	Protioconazol 18h	0,928A	6,310 A	2,722A	7,784ABC
T6	Protioconazol+MZB 9h	0,537E	4,862CD	2,391ABC	6,517D
T7	Protioconazol+MZB 12h	0,604DE	4,705D	1,659DE	6,640D
T8	Protioconazol+MZB 15h	0,711BCD	5,413BCD	2,122CD	8,126AB
T9	Protioconazol+MZB 18h	0,795ABC	5,222BCD	2,345ABC	7,288BCD
T10	Protioconazol+(Mn+Zn) 9h	0,715BCD	5,602ABC	2,284ABC	6,581D
T11	Protioconazol+(Mn+Zn) 12h	0,652CDE	5,514BC	2,199CD	7,149DC
T12	Protioconazol+(Mn+Zn) 15h	0,799ABC	5,675AB	2,602AB	8,302A
T13	Protioconazol+(Mn+Zn) 18h	0,832AB	5,808AB	2,652AB	8,081AB
	CV (%)	8,78	5,63	8,56	4,79
	DMS	0,159	0,763	0,478	0,178

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Tabela 3: Resultados. EPAMIG, Patos de Minas - MG, 2025

Trat.	Descrição	N° Nós	N° Ram.	N° Vagens	Massa/vagem
T1	Controle	22,063ABCD	2,875BC	44,625	0,178
T2	Protioconazol 9h	21,188ABCD	3,063BC	38,250	0,186
T3	Protioconazol 12h	22,188ABCD	3,313BC	39,750	0,192
T4	Protioconazol 15h	23,313ABCD	3,688ABC	45,438	0,186
T5	Protioconazol 18h	24,875A	3,938AB	48,250	0,162
T6	Protioconazol+MZB 9h	19,750BCD	2,500C	37,688	0,177
T7	Protioconazol+MZB 12h	19,188D	2,500C	38,000	0,177
T8	Protioconazol+MZB 15h	23,625AB	3,250BC	45,125	0,181
T9	Protioconazol+MZB 18h	20,750ABCD	3,125BC	41,500	0,179
T10	Protioconazol+(Mn+Zn) 9h	19,250CD	2,563C	38,375	0,182
T11	Protioconazol+(Mn+Zn) 12h	20,563BCD	2,750BC	39,500	0,182
T12	Protioconazol+(Mn+Zn) 15h	23,375ABC	3,500ABC	43,250	0,193
T13	Protioconazol+(Mn+Zn) 18h	24,875A	4,688A	45,375	0,180
	CV (%)	7,62	15,68	11,59	13,27
	DMS	4,182	1,261	12,173	0,060

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Nessa perspectiva, os tratamentos que apresentaram os melhores resultados para a massa de raízes foram T4 (ABC), T5 (A), T9 (ABC), T12 (ABC) e T13 (AB). Tal desempenho pode ser atribuído, em especial, à presença do ingrediente ativo protioconazol em aplicações realizadas após as 15h, sendo o horário de aplicação e a presença do fungicida fatores determinantes para os resultados observados. De acordo com recomendações técnicas, o protioconazol deve ser aplicado em condições de temperatura inferiores a 30 °C e umidade relativa do ar superior a 55% (FOX®, 2024; Brasil, 2024), o que justifica a influência do horário de aplicação. Situação semelhante ocorre quando o produto é aplicado em associação com mancozebe, manganês (Mn) e zinco (Zn).

Segundo Fagan (2022), o zinco está relacionado ao metabolismo de auxinas, hormônios vegetais que promovem o desenvolvimento de raízes laterais. O manganês, por sua vez, exerce influência sobre o crescimento radicular por meio da ativação de enzimas da via do ácido chiquímico, que participa da biossíntese de aminoácidos aromáticos como tirosina, fenilalanina e triptofano. Esses mecanismos corroboram a afirmação de que a eficácia de produtos fitossanitários é fortemente condicionada às variáveis climáticas no momento da aplicação (Antuniassi, 2012).

Para massa de caules, os tratamentos T4 (AB), T5 (A), T10 (ABC), T12 (AB) e T13 (AB), obtiveram melhores resultados. Nesse sentido, o Protioconazol teve performance ótima isolado, após às 15h, e quando associado ao Mn e Zn teve eficiência máxima em quase todos os períodos do dia, exceto às 12h, período mais quente em que foi exposto. Ademais, seu uso junto ao Mancozebe teve efeitos ruins, especialmente em períodos mais quentes, no qual sua mistura causou fitotoxidez, podendo causar prejuízos fotossintéticos significativos (Marques, 2021).

No mesmo contexto, os tratamentos T5 (A), T6 (ABC), T9 (ABC), T10 (ABC), T12 (AB) e T13 (AB) apresentaram os maiores valores de massa de folhas. O fungicida protioconazol, quando aplicado isoladamente, demonstrou melhor desempenho no

período após as 18h. Quando associado ao mancozebe, os melhores resultados foram observados em horários de menor intensidade térmica, o que favoreceu o acúmulo de massa foliar. De forma semelhante, a combinação do protioconazol com os micronutrientes Mn e Zn apresentou maior eficácia em períodos de temperatura amena, com exceção do horário das 12h, quando a elevada temperatura reduziu sua eficiência. Assim, a temperatura demonstrou ser um fator determinante para o acúmulo de massa de folhas (Santos, 2020).

Quanto à massa de vagens, os tratamentos T1 (ABC), T3 (ABC), T4 (A), T5 (ABC), T8 (AB), T12 (A) e T13 (AB) apresentaram os melhores resultados. No entanto, de modo geral, as aplicações dos fungicidas não promoveram incrementos significativos na massa de vagens. Observou-se que as aplicações realizadas às 9h e às 12h estiveram associadas à redução desse parâmetro, o que pode ser atribuído à menor eficiência dos produtos nesses horários, conforme discutido anteriormente.

Para o número de nós, os tratamentos T1 (ABCD), T2 (ABCD), T3 (ABCD), T4 (ABCD), T5 (A), T8 (AB), T9 (ABCD), T12 (ABC) e T13 (A) apresentaram os melhores resultados. O tratamento controle demonstrou diferença significativa positiva, assim como os tratamentos que receberam aplicação de protioconazol isolado. Adicionalmente, a associação entre protioconazol e mancozebe foi eficaz quando aplicada sob condições de temperatura moderada. De forma semelhante, o uso de protioconazol combinado a Mn e Zn também foi influenciado pela temperatura, com maior eficiência observada nas aplicações realizadas entre 15h e 18h.

Sincronamente, para o número de ramificações, os tratamentos T4 (ABC), T5 (AB), T12 (ABC) e T13 (A) indicaram que a aplicação de protioconazol após as 15h resultou em maior número de ramificações. Observou-se também incremento na formação de ramificações quando o produto foi associado ao Mn e Zn.

Ademais, para o número de vagens e a massa de grãos por vagem, não foram verificadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos.

4 CONCLUSÃO

O uso do Protioconazol promoveu benefícios significativos à produção da soja, sobretudo quando aplicado nos horários das 15h e 18h. A associação com Mancozebe apresentou benefícios pontuais quando aplicada às 18h, embora não tenha proporcionado incrementos expressivos na massa de caules e vagens nem no número de ramificações.

Adicionalmente, a combinação do Protioconazol com Mn e Zn resultou em efeitos positivos quando aplicada nos mesmos horários (15h e 18h), ainda que seus resultados tenham sido similares aos efeitos obtidos com o Protioconazol isolado.

Dessa forma, o Protioconazol demonstrou ser o principal agente responsável pela manutenção e promoção do desenvolvimento em plantas de soja, não sendo necessários ativos de redução de fitotoxidade e estresses oxidativos se aplicado em horário adequado, de 15h às 18h.

REFERÊNCIAS

ALVES, V. M.; JULIATTI, F. C. Fungicidas no manejo da ferrugem da soja, processos fisiológicos e produtividade da cultura. **Summa Phytopathologica**, v. 44, n. 3, p. 245-251, set. 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/0100-5405/167203.

ANTUNIASSI, U. R. Tecnologia de aplicação: Conceitos básicos, inovações e tendências. In: TOMQUELSKI, G. V. *et al*. (eds.). **Publicações Fundação Chapadão**: Soja e Milho 2011/2012. 5 ed. Chapadão do Sul: Fundação Chapadão, 2012. cap. 16, p. 113-139.

BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al*. Contribuição de raízes e parte aérea de espécies de braquiárias no desempenho da soja em sucessão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 8, p. 592-598, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2017000800004.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de Crescimento de Plantas**: noções básicas. Jaboticabal: FUNEP. 2004.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Monografia do ingrediente ativo**: Protioconazol. Brasília: Anvisa, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/anvisa/pt-br/setorregulado/regularizacao/agrotoxicos/monografias/monografias-autorizadas/p/4494json-file-1.

CALOMÉ. L. M. *et al*. Eficiência de diferentes combinações de fungicidas multissítios no controle de Phakopsora pachyrhizi em soja. **Circular Técnica do Mestrado Profissional em Desenvolvimento Rural**, v. 2, n.10, 2020. Disponível em: https://home.unicruz.edu.br

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**: 11º Levantamento - Safra 2023/24. Brasília, v. 11, n. 11, 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 2000/01**. Londrina: Embrapa Soja, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Tecnologias de Produção de Soja**: Região Central do Brasil 2012 e 2013. Londrina: Embrapa Soja, 262p., 2011.

FAGAN, E. B. Nutrição Mineral. In: FAGAN, E. B. *et al*. **Fisiologia vegetal**: fotossíntese, relações hídricas e nutrição mineral. Piracicaba: Editora Pecege, 2022. Parte III.

FINOTO, E. L. *et al*. Efeito da aplicação de fungicida sobre caracteres agronômicos e severidade das doenças de final de ciclo na cultura da soja. **Revista Agro@Mbiente On-Line**, v. 5, n. 1, p. 44, abr. 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v5i1.418.

FOX® SC. Bayer S.A. São Paulo: Bayer S.A., 2024. Bula de produto agronômico. Disponível em: https://www.adapar.pr.gov.br/sites/adapar/arquivos_restritos/files/documento/2024-10/fox_sc.pdf.

GODOY, C. V. *et al*. **Eficiência de fungicidas para o controle da ferrugem asiática da soja**, ***Phakopsora pachyrhizi***, **na safra 2014/15**: resultados sumarizados dos ensaios cooperativos. Londrina: Embrapa Soja (Circular Técnica, 111), p. 6, 2015.

MARQUES, L. N. **Mancozebe associado ao patossistema *Phakopsora pachyrhizi* × *Glycine max*: respostas fisiológicas das plantas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021. Disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/11631.

NAVARINI, L. *et al*. Controle químico da ferrugem asiática (Phakopsora pachyrhizi Sidow) na cultura da soja. **Summa Phytopathologica**, v. 33, n. 2, p. 182-186, jun. 2007. Disponível: http://dx.doi.org/10.1590/s0100-54052007000200013.

POLIZEL, A. C. *et al*. Teor de clorofila e severidade da ferrugem asiática em função de cultivares, aplicação de fungicida e época de semeadura da soja. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**. Goiânia, vol.7, n.12, 2011. Disponível em: https://www.conhecer.org.br/enciclop/2011a/agrar.htm.

SANTOS, M. L. M. **Volume de calda e horário da aplicação no controle de doenças na cultura da soja (*Glycine max*)**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/202391

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 74-80, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Identificação de tolerância ao glifosato e ao glufosinato em linhagens de milho (*zea mays*)

Identification of Glyphosate and Glufosinate Tolerance in Maize (Zea mays) Lines

DANIELA LIBOREDO E SOUZA
Discente de Agronomia (UNIPAM)
liboredodaniela@unipam.edu.br

GUILHERME MATEUS DE ANDRADE
Discente de Agronomia (UNIPAM)
guilhermemateus@unipam.edu.br

WALTER VIEIRA DA CUNHA
Professor orientador (UNIPAM)
walter@unipam.edu.br

Resumo: Este estudo avaliou a eficiência de uma metodologia de extração, amplificação e visualização de DNA por eletroforese. Embora a técnica de amplificação e eletroforese tenha permitido a observação das bandas de DNA, verificou-se que a extração foi inadequada, conforme indicado pelo "arrasto" e pela baixa definição das bandas no gel. Esses resultados sugerem possível degradação do material genético, contaminação das amostras ou adulteração durante o processo. Testes adicionais indicaram que as amostras podem ter sofrido alterações no tamanho dos fragmentos, comprometendo a análise. Conclui-se que, apesar da eficácia da metodologia de visualização, a etapa de extração necessita de otimização, incluindo controles de qualidade mais rigorosos e técnicas complementares para assegurar a integridade do DNA. Recomenda-se a utilização de espectrofotometria ou kits comerciais específicos em estudos futuros para evitar falhas semelhantes e garantir resultados confiáveis.
Palavras-chave: eletroforese; resistência a herbicidas; seleção genotípica.

Abstract: This study evaluated the efficiency of a methodology for DNA extraction, amplification, and visualization via electrophoresis. Although the amplification and electrophoresis techniques enabled the observation of DNA bands, the extraction process was found to be inadequate, as indicated by the “smearing” and poor band resolution on the gel. These results suggest possible degradation of genetic material, sample contamination, or adulteration during the process. Additional tests indicated that the samples may have undergone changes in fragment size, compromising the analysis. It is concluded that, despite the effectiveness of the visualization methodology, the extraction step requires optimization, including stricter quality controls and complementary techniques to ensure DNA integrity. The use of spectrophotometry or specific commercial kits is recommended in future studies to prevent similar failures and ensure reliable results.
Keywords: electrophoresis; herbicide resistance; genotypic selection.

---

1 INTRODUÇÃO

O milho é um cereal de elevado valor nutritivo, amplamente consumido em todo o mundo. Além disso, destaca-se pela ampla gama de produtos derivados, como o biocombustível, o que reforça a relevância de seu cultivo (Coêlho, 2023). Contudo, os produtores enfrentam desafios significativos relacionados à infestação por plantas daninhas, uma vez que estas competem com o milho por recursos, sobretudo nas fases iniciais do desenvolvimento e em períodos de maior precipitação, provocando perdas econômicas muitas vezes irreversíveis. Objetivando otimizar o controle dessas espécies invasoras, tem-se adotado o manejo químico, especialmente por meio da aplicação de herbicidas não seletivos, como o glifosato e o glufosinato (Sachan *et al.*, 2023).

Entretanto, observou-se que o controle químico pode ocasionar danos à lavoura, especialmente nas estruturas reprodutivas da planta. Nesse contexto, uma das alternativas viáveis para aumentar a produtividade e reduzir custos tem sido o melhoramento genético. Por meio dessa abordagem, tornou-se possível a introdução de genes de tolerância aos herbicidas glifosato e glufosinato no material genético do milho, viabilizando o controle eficiente das plantas daninhas sem comprometer o desenvolvimento da cultura (Albrecht, 2014).

A capacidade do glifosato de inibir a síntese do ácido 5-enolpiruvil-chiquímico-3-fosfato, composto essencial ao metabolismo vegetal, foi descoberta pela empresa Monsanto. Anos mais tarde, foram introduzidas no mercado sementes geneticamente modificadas contendo genes como *AM79 aroA*, *G2-EPSPS*, *gat4621*, *mepsps*, *2mepsps*, *cp4 epsps* e *G10-EPSPS*, os quais conferem resistência ao referido herbicida (Liu *et al*., 2018). Contudo, o uso intensivo e prolongado dessa molécula ao longo de cinco décadas resultou na seleção de espécies daninhas resistentes à sua ação.

Nesse cenário, o glufosinato passou a ser adotado como alternativa, dada sua atuação na inibição da enzima glutamina sintetase, essencial no processo de assimilação do nitrogênio pelas plantas. Diferentemente do glifosato, que possui ação sistêmica, o glufosinato apresenta ação de contato. A combinação de ambos tem sido empregada como estratégia para diversificar os mecanismos de ação dos herbicidas. Para conferir tolerância ao glufosinato em cultivares comerciais, foram inseridos os genes *pat* (fosfinotricina N-acetiltransferase) e *bar*, os quais atuam bloqueando o sítio de ação do herbicida, impedindo sua atuação e conferindo, assim, resistência às plantas geneticamente modificadas (Brunharo; Christoffoleti; Nicolai, 2014)

Dessa forma, torna-se relevante verificar a presença dos genes *cp4 epsps* e *mepsps*, responsáveis por conferir tolerância ao glifosato, bem como dos genes bar e pat, que promovem tolerância ao glufosinato, em linhagens de milho (Nandula, 2019). A identificação desses genes visa facilitar a aplicação do controle químico de plantas daninhas no campo, além de possibilitar a previsão do comportamento agronômico dos híbridos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Verificar a presença dos genes *cp4 epsps, mepsps, pat* e *bar* em linhagens de milho (*Zea mays*).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Aferir a presença dos genes *cp4 epsps, mepsps, pat* e *bar* em dez linhagens de milho por meio do teste PCR convencional.

3 METODOLOGIA

Com o objetivo de verificar e identificar eventos de tolerância ao glifosato e ao glufosinato de amônio em cultivares com as tecnologias PRO2, PRO3, PRO4 e VIP3, realizou-se a extração do DNA genômico a partir de sementes trituradas, utilizando o método de Murray e Thompson (1980), com modificações. Amostras de 100 mg de sementes foram transferidas para microtubos de 1,5 mL, e submetidas à extração com 800 μL de tampão CTAB (brometo de hexadeciltrimetilamônio), seguidos de agitação por 1 minuto e incubação em banho-maria a 65 °C por 15 minutos.

Posteriormente, adicionou-se um volume igual de uma solução fenol:clorofórmio:álcool isoamílico (24:24:1), com homogeneização em vórtex por 1 minuto. A mistura foi centrifugada a 12.000 rpm por 2 minutos para separação das fases. A fase aquosa foi cuidadosamente transferida para um novo microtubo de 1,5 mL, repetindo-se o processo de extração com clorofórmio:álcool isoamílico (24:1).

Após nova centrifugação, a fase aquosa foi novamente transferida e recebeu a adição de 400 μL de etanol a 92%, sendo homogeneizada e incubada por 10 minutos à temperatura ambiente. Em seguida, os tubos foram centrifugados a 12.000 rpm por 5 minutos, e o sobrenadante foi descartado por inversão. A amostra seca de DNA foi então ressuspendida em 200 μL de tampão TE (Tris-HCl–EDTA, pH 8,0).

Para melhor visualização em eletroforese, as amostras de DNA extraídas foram submetidas à amplificação por meio da técnica de reação em cadeia da polimerase (PCR), utilizando primers específicos para os genes *cp4 epsps* e *mepsps*, associados à tolerância ao glifosato (EURL GMFF, 2005, 2008, 2010, 2016), e para os genes *pat* e *bar*, relacionados à tolerância ao glufosinato de amônio (Barbau-Piednoir *et al.*, 2011), conforme descrito na Tabela 1.

As reações de PCR foram conduzidas em microtubos de 200 μL, contendo 25 μL de mix para PCR (Sigma-Aldrich), 1 μL de primer *forward*, 1 μL de primer *reverse*, 15 μL de amostra de DNA e 8 μL de água livre de nucleases, totalizando 50 μL por reação. Os ciclos de amplificação em termociclador foram ajustados individualmente conforme as especificações de temperatura e tempo requeridas para cada par de primers utilizados.

Para a leitura do DNA amostral, utilizou-se a técnica de eletroforese em gel de agarose a 1,5%. Foram pipetados 10 μL da amostra de DNA, previamente misturados com 4 μL do corante intercalante SYBR Green I, 4 μL de tampão de carregamento e 2 μL

de água ultrapura. O volume total foi então aplicado nos respectivos poços do gel. A corrida eletroforética foi realizada sob tensão constante de 120 V, corrente de 250 mA e potência de 90 W, durante 120 minutos. Após esse período, as bandas de DNA foram visualizadas em transiluminador, permitindo a avaliação da presença dos genes alvo por comparação com os controles positivos, tanto para o gene da zeína (Barbau-Piednoir *et al.*, 2011) quanto para os genes de interesse.

Tabela 1: Sequenciamento dos principais genes de indução à tolerância ao Glifosato e Glufosinato de Amônio

		Sequência de DNA (5′ para 3′)	Comprimento (bp)
cp4 epsps	MON 87427 F	ACG GAA ACG GTC GGG TCA AAT G	95
	MON 87427 R	CCA TGT AGA TTT CCC GGT TTT CTC	
	MON 88017 F	GAG CAG GAC CTG CAG AAG CT	95
	MON 88017 R	TCC GGA GTT GAC CAT CCA	
	NK 603 F	ATG AAT GAC CTC GAG TAA GCT TGT TAA	108
	NK 603 R	AAG AGA TAA CAG GAT CCA CTC AAA CAC T	
meps ps	GA21 F	CTT ATC GTT ATG CTA TTT GCA ACT TTA GA	112
	GA21 R	TGG CTC GCG ATC CTC CT	
pat	*pat* F	CCG CGG TTT GTG ATA TCG TT	109
	pat R	TCT TGC AAC CTC TCT AGA TCA TCA A	
bar	*bar* F	CGT CAA CCA CTA CAT CGA GAC AA	69
	bar R	GTC CAC TCC TGC GGT TCC T	

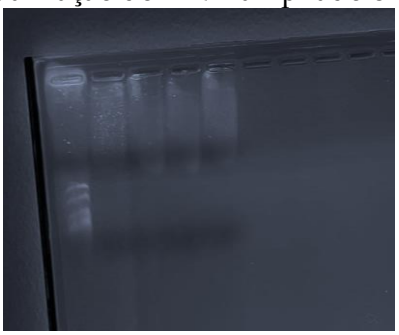
zeína	ze F	TGC TTG CAT TGT TCG CTC TCC TAG	329
	ze R	GTC GCA GTG ACA TTG TGG CAT	

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

RESULTADOS FINAIS

A metodologia adotada demonstrou-se eficiente para a amplificação e posterior visualização do DNA por eletroforese, conforme evidenciado na Figura 1. Contudo, observou-se que a extração de DNA a partir de algumas amostras não foi plenamente satisfatória, o que pode ser verificado pela presença de "arrasto" (*blur*) no gel, indicando possível degradação do material genético ou contaminação por impurezas.

Figura 1: Visualização do DNA ampliado em eletroforese



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Foram realizadas diversas tentativas de adequação da metodologia de extração, contudo, não se obteve êxito na obtenção de DNA de qualidade a partir das amostras fornecidas das linhagens. Os resultados obtidos indicam que, possivelmente, as amostras passaram por algum tipo de tratamento ou interferência, resultando em alterações no tamanho das bandas de DNA e inviabilizando a conclusão do trabalho.

Apesar da eficácia da metodologia para a amplificação e visualização do DNA por eletroforese, a baixa qualidade da extração sugere a presença de contaminantes ou degradação do material genético. O "arrasto" observado nas bandas pode estar relacionado à fragmentação do DNA ou à presença de impurezas, como proteínas, polissacarídeos ou resíduos de solventes, que comprometem a integridade e a pureza do material extraído. Ademais, a ausência de bandas bem definidas pode indicar inadequações nas condições de armazenamento ou manipulação das amostras, resultando em degradação excessiva do DNA (Hasan, 2021).

Outro fator que pode ter contribuído para os resultados insatisfatórios refere-se à possível adulteração das amostras, evidenciada pela inconsistência no tamanho das bandas de DNA observadas na eletroforese. Tal inconsistência pode estar relacionada ao uso de reagentes inadequados ou à variação nos protocolos de extração empregados. Para mitigar falhas semelhantes em experimentos futuros, recomenda-se a

implementação de controles mais rigorosos, como a avaliação prévia da qualidade do DNA antes da etapa de amplificação e a padronização dos procedimentos de extração (Bhoyar; Mehar; Chavali, 2024). Além disso, a confirmação da integridade das amostras por meio de técnicas complementares, como a espectrofotometria, pode ser útil para detectar eventuais contaminações ou adulterações, assegurando maior confiabilidade aos resultados obtidos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de a metodologia de amplificação por PCR e a visualização em gel de agarose terem se mostrado eficientes, os resultados obtidos indicam que a extração do material genético foi comprometida, possivelmente em decorrência de degradação, contaminação ou adulteração das amostras. O padrão de "arrasto" observado no gel e a inconsistência nas bandas amplificadas reforçam a necessidade de otimização dos protocolos de extração, com a inclusão de controles de qualidade mais rigorosos e a verificação prévia da integridade do DNA antes da amplificação. Estudos futuros devem investigar as causas específicas dessas limitações, como a presença de inibidores da PCR, variações nos reagentes ou condições inadequadas de armazenamento. Ademais, a adoção de técnicas complementares, como espectrofotometria ou análise por microfluídica, pode contribuir para a detecção de interferentes e para o aumento da confiabilidade dos resultados. Esses ajustes são fundamentais para assegurar a reprodutibilidade do método e a robustez das conclusões em estudos de genômica aplicada e análises forenses.

REFERÊNCIAS

ALBRECHT, Alfredo Junior Paiola *et al*. O milho RR2 e o glyphosate: uma revisão. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 13, n. 1, p. 58, 10 abr. 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.7824/rbh.v13i1.279.

BARBAU-PIEDNOIR, Elodie *et al*. Four new SYBR®Green qPCR screening methods for the detection of Roundup Ready®, LibertyLink®, and CryIAb traits in genetically modified products. **European Food Research & Technology**, v. 234, p. 13-23, 2012. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00217-011-1605-7.

BHOYAR, Lina; MEHAR, Palash; CHAVALI, Krishnadutt. An overview of DNA degradation and its implications in forensic caseworks. **Egyptian Journal of Forensic Sciences**, v. 14, n. 1, p. 15, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1186/s41935-024-00389-y.

BRUNHARO, Caio Augusto de Castro Grossi; CHRISTOFFOLETI, Pedro Jacob; NICOLAI, Marcelo. Aspectos do mecanismo de ação do amônio glufosinato: culturas resistentes e resistência de plantas daninhas. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 13, n. 2, p. 163, 10 ago. 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.7824/rbh.v13i2.293.

COÊLHO, Jackson Dantas. **Agropecuária**: Milho Produção e Mercados. Fortaleza: BNB, ano 8, n.291, jul. 2023. (Caderno Setorial Etene). Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1788.

HASAN, Najat Abdulrazzaq. **Laboratory Manual of Basic Molecular Biology Techniques**. 2021. Disponível em: https://zenodo.org/records/4541490

LIU, Miao-Miao *et al*. Molecular characterization and efficacy evaluation of a transgenic corn event for insect resistance and glyphosate tolerance. J**ournal of Zhejiang University-Science B**, v. 19, n. 8, p. 610-619, ago. 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1631/jzus.b1700345.

MURRAY, M.; THOMPSON, W.F. Rapid Isolation of High Molecular Weight Plant DNA. **Nucleic Acids Research**, v.8, p. 535-547. Disponível em: https://doi.org/10.1093/nar/8.19.4321.

NANDULA, Vijay K. Herbicide Resistance Traits in Maize and Soybean: current status and future outlook. **Plants**, v. 8, n. 9, p. 337, 9 set. 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/plants8090337.

SACHAN, Dhruvendra Singh *et al*. Effect of Chemical Herbicides on Diversified Weed Flora and Weed Control Efficiency in Maize (Zea mays L.). **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 35, n. 17, p. 54-61, 1 jul. 2023. Disponível em: http://dx.doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i173183.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 81-91, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Larva de *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) na biodegradação do Poliestireno Expandido

Tenebrio molitor Larvae (Coleoptera: Tenebrionidae) in the biodegradation of expanded polystyrene

RAFAELA CAMILA BONTEMPO
Discente de Agronomia (UNIPAM)
rafaelabomtempo@unipam.edu.br

ELISA QUEIROZ GARCIA
Professora orientadora (UNIPAM)
elisaqg@unipam.edu.br

Resumo: A poluição plástica configura-se como um dos principais desafios ambientais contemporâneos, exigindo abordagens inovadoras para sua mitigação. Este estudo avaliou o potencial da larva L3 de *Tenebrio molitor* na degradação do poliestireno expandido (EPS), um dos plásticos mais utilizados e de difícil decomposição. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com três tratamentos: larvas alimentadas exclusivamente com EPS; larvas alimentadas com EPS e farelo de trigo; e um grupo controle alimentado apenas com farelo de trigo. Avaliaram-se a taxa de sobrevivência das larvas e o consumo de EPS ao longo do período experimental. Os resultados indicaram que as larvas de *T. molitor* foram capazes de consumir e degradar o EPS, com diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ($p < 0,05$). A adição de farelo de trigo aumentou a taxa de sobrevivência das larvas, mas não influenciou significativamente a taxa de biodegradação do EPS. Conclui-se que *T. molitor* apresenta potencial biotecnológico para a degradação de plásticos, podendo ser empregado em estratégias sustentáveis de manejo de resíduos plásticos.
Palavras-chaves: biodegradação; poliestireno expandido; resíduos plásticos; sustentabilidade.

Abstract: Plastic pollution is one of the major contemporary environmental challenges, requiring innovative approaches for its mitigation. This study evaluated the biodegradation potential of L3 larvae of *Tenebrio molitor* in the decomposition of expanded polystyrene (EPS), one of the most commonly used and persistent plastics. The experiment was conducted in a completely randomized design (CRD) with three treatments: larvae fed exclusively with EPS; larvae fed with EPS and wheat bran; and a control group fed only with wheat bran. Larval survival rate and EPS consumption were assessed throughout the experimental period. The results indicated that *T. molitor* larvae were capable of consuming and degrading EPS, with statistically significant differences between treatments ($p < 0.05$). The addition of wheat bran increased larval survival but did not significantly influence the EPS biodegradation rate. It is concluded that *T. molitor* presents biotechnological potential for plastic degradation and may be employed in sustainable plastic waste management strategies.
keywords: biodegradation; expanded polystyrene; plastic waste; sustainability.

---

1 INTRODUÇÃO

A poluição plástica configura-se como um dos principais desafios ambientais contemporâneos, em virtude de seu uso disseminado, elevada resistência à degradação e acúmulo progressivo nos ecossistemas (Oliveira, 2013; Machado Filho; Ferreira; Soares, 2011). Estima-se que milhões de toneladas de resíduos plásticos sejam descartadas anualmente, afetando ecossistemas terrestres e aquáticos e representando uma ameaça significativa à biodiversidade global (Golwala *et al.*, 2021). Dentre os polímeros sintéticos mais utilizados, o poliestireno expandido (EPS), popularmente conhecido como isopor, destaca-se por sua leveza, versatilidade e resistência mecânica. No entanto, sua baixa taxa de biodegradação o torna um dos resíduos mais persistentes no ambiente (Bradney *et al.*, 2019).

Nesse contexto, tem-se intensificado a busca por estratégias inovadoras voltadas à degradação de plásticos, com ênfase nas abordagens biotecnológicas. Estudos recentes indicam que certos organismos, como as larvas de *Tenebrio molitor* Linnaeus, 1758 (Coleoptera: Tenebrionidae), possuem a capacidade de degradar polímeros sintéticos, incluindo o EPS, por meio de processos enzimáticos mediados pela microbiota presente em seu intestino (Yang, Y. *et al.*, 2015). A degradação ocorre, em parte, devido à ação da bactéria *Exiguobacterium* sp., integrante da microbiota intestinal desse inseto, a qual desempenha papel crucial na digestão dos polímeros (Yang, Y. *et al.*, 2015).

Embora estudos iniciais indiquem o potencial de *Tenebrio molitor* na biodegradação do EPS, ainda há lacunas no conhecimento a respeito dos fatores que modulam a eficiência desse processo, particularmente no que se refere à composição da dieta e suas implicações na taxa de consumo do polímero e na sobrevivência das larvas. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar a capacidade de *T. molitor* em degradar o EPS, analisando o efeito da dieta sobre a taxa de consumo do material e os índices de sobrevivência larval. Os dados obtidos podem subsidiar o desenvolvimento de estratégias ambientalmente sustentáveis para o manejo de resíduos plásticos, explorando o potencial biotecnológico desses insetos como agentes de biodegradação.

2 METODOLOGIA

2.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO E ORIGEM DO MATERIAL

O experimento foi conduzido no Laboratório de Biologia, Zoologia e Entomologia do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), localizado no segundo andar do Bloco H, sala 204. As larvas de *Tenebrio molitor* utilizadas no estudo foram provenientes da criação mantida no próprio laboratório. Para os ensaios, foram selecionados indivíduos no terceiro estádio larval (L3), os quais permaneceram na sala de criação sob temperatura ambiente. O poliestireno expandido (EPS) empregado nos experimentos também foi obtido do acervo do referido laboratório.

2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com três tratamentos e 10 repetições, totalizando 30 unidades amostrais. Cada unidade amostral foi composta por cinco larvas de *Tenebrio molitor* no terceiro estádio larval (L3), resultando em um total de 150 indivíduos utilizados no estudo (Tabela 1).

Tabela 1: Descrição dos tratamentos utilizados no ensaio intitulado "Larva de *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) na biodegradação do poliestireno expandido". UNIPAM, Patos de Minas - MG, 2024

Tratamento	**Dieta**
Tratamento 1	38 gramas de farelo de trigo
Tratamento 2	8 blocos de EPS (poliestireno expandido)
Tratamento 3	38 g defarelo de trigo + 8 blocos de EPS

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

2.3 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Inicialmente, as larvas e o poliestireno expandido foram pesados separadamente de acordo com os tratamentos. No Tratamento 1, foram inseridas cinco larvas e 38g de farelo de trigo em um recipiente de plástico de um litro, com tampa perfurada para ventilação adequada. No Tratamento 2, cinco larvas foram adicionadas a oito blocos de EPS de dimensões 5 x 5 x 1,80 cm e gramatura semelhante. No Tratamento 3, as larvas receberam 38g de farelo de trigo e oito blocos de isopor no mesmo recipiente. Após a montagem do experimento, todos os recipientes foram mantidos na sala de criação sob temperatura ambiente.

O experimento foi conduzido no período de 10 de abril a 20 de maio de 2024, totalizando 40 dias. Ao término do período experimental, as larvas, o EPS e o farelo de trigo foram novamente pesados. Para a análise estatística, foi calculada a diferença entre a massa inicial e a massa final dos tenébrios e das dietas A comparação da massa dos tenébrios e a taxa de sobrevivência foi feita pelo teste Tukey, enquanto isso, a massa do EPS foi analisada pelo teste de Wilcoxon e a massa do farelo de trigo pelo teste T para amostras independentes. As análises estatísticas foram executadas no software RStudio (versão 1.3.1073, R Core Team, 2014).

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

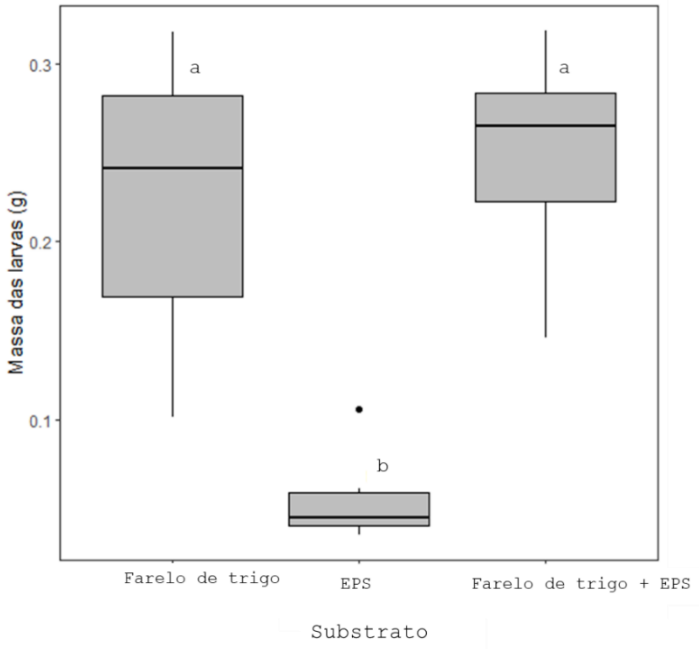
O presente estudo avaliou a capacidade das larvas de *Tenebrio molitor* na degradação do poliestireno expandido (EPS) e os efeitos da dieta na sobrevivência e no desenvolvimento dos indivíduos. Os resultados indicaram que as larvas alimentadas exclusivamente com EPS apresentaram maior taxa de mortalidade, enquanto aquelas

que receberam uma dieta combinada de farelo de trigo e EPS mostraram melhor desempenho em termos de crescimento e sobrevivência

Constatou-se que a massa das larvas de *Tenebrio molitor* no tratamento 2 foi menor que o tratamento 1 (GL= -0,16842; p= 0,0000011) e menor que o tratamento 3 (GL= 0,19752; p= 0,0000001) (Figura 1). Entretanto, quando comparamos os tratamentos 3 e 1, a massa foi igual (GL= 0,02910; p= 0,4929018). Em seguida, ao compararmos a sobrevivência dos tenébrios (Figura 2) verificou-se que o número de tenébrios sobreviventes no tratamento 2 foi menor que o tratamento 1 (GL= -1,6; p= 0,0250647) e menor que o tratamento 3 (GL= 1,8; p= 0,0110097). Entretanto, quando comparamos os tratamentos 1 e 3, o número de sobreviventes foi igual (GL= 0,2; p= 0,9353175).

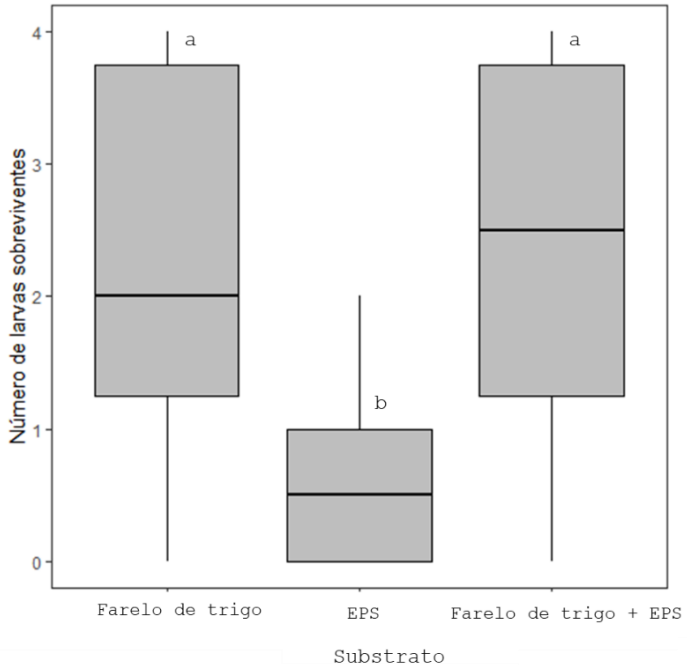
Em relação à massa residual do EPS (Figura 3), não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos EPS e farelo de trigo + EPS (p= 0,3445). Da mesma forma, a avaliação da massa da farinha de trigo (Figura 4) também não apresentou diferença estatística (p= 0,3598), sugerindo que a taxa de consumo desses materiais EPS e farelo de trigo + EPS foi semelhante.

Figura 1: Variação da massa das larvas de *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) após 40 dias sob diferentes dietas: farelo de trigo, EPS (poliestireno expandido) e farelo de trigo+EPS. UNIPAM, Patos de Minas - MG, 2024. Cada caixa inclui os dados entre o 1º e 3º quartil, representados pelas linhas horizontais da lateral das caixas, e a mediana pela linha horizontal dentro da caixa. Caixas seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (p>0,05) considerando um intervalo de confiança de 95%



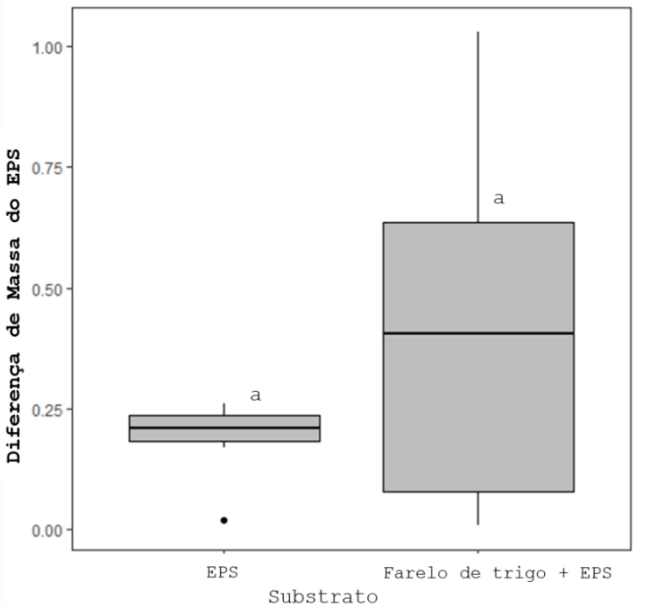
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Figura 2. Variação da sobrevivência das larvas de *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) após 40 dias sob diferentes dietas: farelo de trigo, EPS e farelo de trigo + EPS. UNIPAM, Patos de Minas - MG, 2024. Cada caixa inclui os dados entre o 1º e 3º quartil, representados pelas linhas horizontais da lateral das caixas, e a mediana pela linha horizontal dentro da caixa. Caixas seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (p>0,05) considerando um intervalo de confiança de 95%



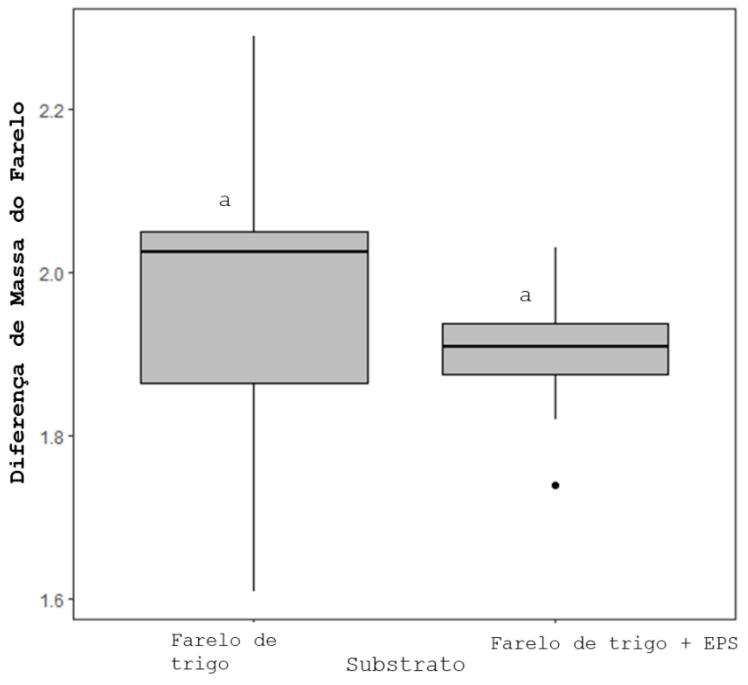
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Figura 3: Variação da Diferença de Massa do EPS após 40 dias, quando disponibilizado EPS e farelo de trigo + EPS como dieta para larvas de *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). UNIPAM, Patos de Minas - MG, 2024. Cada caixa inclui os dados entre o 1º e 3º quartil, representados pelas linhas horizontais da lateral das caixas, e a mediana pela linha horizontal dentro da caixa. Caixas seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Wilcox (p>0,05) considerando um intervalo de confiança de 95%.



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Figura 4: Variação da Diferença de Massa do farelo de trigo após 40 dias, quando disponibilizado farelo de trigo e farelo de trigo + EPS como dieta para larvas de *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). UNIPAM, Patos de Minas - MG, 2024. Cada caixa inclui os dados entre o 1º e 3º quartil, representados pelas linhas horizontais da lateral das caixas, e a mediana pela linha horizontal dentro da caixa. Caixas seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste T (p>0,05), considerando um intervalo de confiança de 95%.



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

O estudo de Yang, Y. *et al.* (2015) demonstrou que *Tenebrio molitor* converte aproximadamente metade do poliestireno expandido (EPS) consumido em dióxido de carbono, enquanto a outra metade é excretada sob a forma de fragmentos parcialmente decompostos, sem efeitos adversos aparentes à saúde das larvas. No entanto, investigações mais recentes, como as de Ndotono *et al.* (2024), indicam que a sobrevivência de larvas alimentadas exclusivamente com EPS diminui progressivamente, sugerindo que essa dieta é nutricionalmente inadequada e que a co-alimentação com farelo de trigo representa uma alternativa mais viável. Ademais, a diversidade microbiana intestinal parece ser significativamente influenciada pela dieta, sendo mais elevada em regimes alimentares mistos do que em dietas compostas exclusivamente por plástico. Os resultados obtidos no presente estudo corroboram essa perspectiva, uma vez que as larvas mantidas unicamente com EPS apresentaram maior taxa de mortalidade.

Uma possível explicação para o aumento da mortalidade das larvas é a combinação de fatores nutricionais e fisiológicos. A nutrição desempenha um papel fundamental na sobrevivência dos insetos, fornecendo nutrientes essenciais para a manutenção metabólica, crescimento e reprodução (Behmer, 2008; Gullan; Cranston, 2017). Quando submetidas a uma dieta composta exclusivamente por poliestireno

expandido (EPS), observa-se redução significativa da massa corporal das larvas, uma vez que esse polímero não constitui uma fonte alimentar convencional, tampouco oferece um perfil nutricional balanceado.

Além disso, fatores fisiológicos podem intensificar os efeitos adversos decorrentes da alimentação com poliestireno expandido. Estudos recentes apontam o aumento da atividade de enzimas relacionadas ao estresse oxidativo (Zhong *et al.*, 2024), bem como a ocorrência de toxicidade na hemolinfa e nas glândulas digestivas (Ventura *et al.*, 2024). Além disso, a elevação dos níveis de enzimas como álcool/aldeído desidrogenase (AADH) e lactato desidrogenase (LDH) nos tecidos pode comprometer severamente a saúde e a sobrevivência dos organismos expostos (Gagné *et al*., 2023).

Outro fator relevante é o comportamento canibalístico observado entre as larvas, o qual está associado à atividade de quitinase presente em suas secreções digestivas, conforme descrito por Saxena e Sarin (1972). A interação entre esses três elementos, dieta nutricionalmente inadequada, alterações fisiológicas induzidas pelo estresse e comportamento canibalístico, oferece uma explicação plausível para a redução da massa corporal e o aumento da mortalidade em larvas mantidas sob dieta restrita ao EPS.

Os achados deste estudo diferem dos resultados apresentados por Cucini *et al.* (2020), que observaram que o consumo de EPS não interfere na sobrevivência das larvas de *T. molitor*. No entanto, é amplamente reconhecido que a dieta padrão dessa espécie é baseada em farelo de trigo, uma fonte rica em proteínas essenciais para o desenvolvimento larval (Menezes *et al.*, 2014). Isso explica o fato de as larvas alimentadas com farelo de trigo apresentaram maior taxa de sobrevivência e ganho de massa corporal, em comparação àquelas submetidas à dieta exclusiva de EPS.

O aumento da massa larval observado no tratamento que combinou farelo de trigo + EPS pode ser explicado pela plasticidade alimentar dos Coleópteros, que possuem grande capacidade de adaptação a diferentes fontes alimentares e colonizam diversos ecossistemas (Pereira; Salvadori, 2006). Além disso, Yang, S. *et al*. (2018) sugerem que a combinação de poliestireno com uma fonte adicional de energia e água pode aumentar a resistência fisiológica das larvas, reduzindo o estresse associado à ingestão de um alimento não natural.

Recomenda-se, para investigações futuras, a realização de estudos com amostras maiores, acompanhando o desenvolvimento das larvas ao longo do ciclo de vida e avaliando a influência de fatores ambientais, como temperatura e umidade, sobre a biodegradação. Ademais, novas pesquisas devem explorar a capacidade de *T. molitor* em degradar outros polímeros, como polietileno (PE), polipropileno (PP) e policloreto de vinila (PVC), de modo a ampliar o entendimento sobre seu potencial biotecnológico na gestão de resíduos plásticos.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que *Tenebrio molitor* apresenta capacidade de consumir e degradar poliestireno expandido (EPS), reforçando seu potencial biotecnológico na biodegradação de plásticos. No entanto, observou-se que a sobrevivência e o crescimento das larvas foram significativamente influenciados pela

dieta, com maior mortalidade e menor ganho de massa no grupo alimentado exclusivamente com EPS. Esses resultados indicam que, embora *T. molitor* seja capaz de metabolizar poliestireno expandido, a ausência de uma fonte alimentar complementar pode comprometer seu desenvolvimento.

A adição de farelo de trigo na dieta das larvas proporcionou maior taxa de sobrevivência e maior crescimento corporal, sugerindo que a presença de uma fonte nutricional balanceada pode melhorar a eficiência da degradação do EPS. Esses achados corroboram estudos anteriores que apontam a plasticidade alimentar dos Coleópteros e sua capacidade de adaptação a diferentes substratos.

REFERÊNCIAS

BEHMER, S. T. Nutrition in Insects. *In:* Nutrition in Insects. *In*: **Encyclopedia of Entomology**. Springer, Dordrecht. Disponível em: https://doi.org/10.1007/0-306-48380-7_2923

BRADNEY, L. *et al*. Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by aquatic and terrestrial organisms and human health risk. **Environment International**, v. 131, p. 104937, out. 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2019.104937.

CUCINI, C. *et al*. Bacterial and fungal diversity in the gut of polystyrene-fed *Alphitobius diaperinus* (Insecta: coleoptera). **Animal Gene**, v. 17-18, p. 200109, set. 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.angen.2020.200109.

GAGNÉ, F. *et al*. Evidence of polystyrene nanoplastic contamination and potential impacts in Mya arenaria clams in the Saint-Lawrence estuary (Canada). **Comparative Biochemistry And Physiology Part C**: Toxicology & Pharmacology, v. 266, p. 109563, abr. 2023. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109563.

GOLWALA, H. *et al*. Solid waste: an overlooked source of microplastics to the environment. **Science of The Total Environment**, v. 769, p. 144581, maio 2021. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144581.

GULLAN, P. J.; CRANSTON, P. S. **Insetos**: fundamentos da Entomologia. 5. ed São Paulo: Roca, 2017.

MACHADO FILHO, H. de O.; FERREIRA, A. C. M.; SOARES, D. R. Replicação de fósseis de foraminifera utilizando reaproveitamento de "isopor" com alunos do IFPB-CG. **Holos**, v. 4, p. 159-170, 2011. DOI: 10.15628/holos.2011.624. Disponível em: https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/624.

MENEZES, C. W. G. *et al*. A dieta alimentar da presa *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) pode afetar o desenvolvimento do predador *Podisus nigrispinus* (Heteroptera: Pentatomidae)? **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 81, n. 3, p. 250-256, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/1808-1657001212012.

NDOTONO, E. W. *et al*. Mitogenomic profiling and gut microbial analysis of the newly identified polystyrene-consuming lesser mealworm in Kenya. Scientific Reports, v. 14, n. 1, 12 set. 2024. **Springer Science and Business Media LLC**. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1038/s41598-024-72201-9.

OLIVEIRA, L. S. de. **Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido (isopor) em compósitos cimentícios**. 2013. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João Del-Rei, São João del Rei, 2013. Disponível em: https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=122906

PEREIRA, P. R. V. DA S.; SALVADORI, J. R. **Identificação dos principais Coleoptera (Insecta) associados a produtos armazenados**. Embrapa, 2006. (Documentos Online)

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014.

SAXENA, S. C.; SARIN, K. Chitinase in the Alimentary Tract of the Lesser Mealworm, *Alphitobius diaperinus* (PANZER) (Coleoptera: tenebrionidae). **Applied Entomology And Zoology**, v. 7, n. 2, p. 94-94, 1972. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1303/aez.7.94.

VENTURA, E. *et al*. Are mixtures of micro/nanoplastics more toxic than individual micro or nanoplastic contamination in the clam Ruditapes decussatus? **Marine Pollution Bulletin**, v. 206, p. 116697, set. 2024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116697.

YANG, S. S. *et al*. Biodegradation of polystyrene wastes in yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus): Factors affecting biodegradation rates and the ability of polystyrene-fed larvae to complete their life cycle. **Chemosphere**, v. 191, p. 979-989, jan. 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.117.

YANG, Y. *et al*. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: part 2. role of gut microorganisms. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 20, p. 12087-12093, 1 out. 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b02663.

ZHONG, Z. *et al*. Bio-based microplastic polylactic acid exerts the similar toxic effects to traditional petroleum-based microplastic polystyrene in mussels. **Science of The Total Environment**, v. 946, p. 174386, out. 2024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174386.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 92-99, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Tolerância do trigo submetido a diferentes teores de alumínio em solução nutritiva

Tolerance of wheat subjected to different aluminum concentrations in nutritive solution

LAYSA CRISTINA DE MELO SILVA
Discente de Agronomia (UNIPAM)
lcmelos322@unipam.edu.br

MAURICIO ANTÔNIO DE OLIVEIRA COELHO
Professor orientador (UNIPAM)
mauricioac@unipam.edu.br

Resumo: O trigo é um cereal de ampla aplicabilidade, cuja produção tem sido objeto de crescente interesse científico com o objetivo de maximizar sua produtividade. Um dos principais fatores limitantes para o cultivo do trigo no Brasil é a toxicidade do alumínio presente no solo, que inibe o alongamento celular e compromete o crescimento radicular. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar a tolerância do trigo a diferentes concentrações de alumínio em solução nutritiva. O experimento foi conduzido em casa de vegetação do UNIPAM, em Patos de Minas – MG, entre julho e setembro de 2024. Utilizou-se a cultivar MGS-BRILHANTE, desenvolvida pela EPAMIG. O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC), com sete tratamentos e cinco repetições, totalizando 35 unidades experimentais. Os tratamentos consistiram em diferentes doses de alumínio em solução nutritiva: T1 – sem adição de Al^{3+}; T2 – 2 mg L^{-1} de Al^{3+}; T3 – 4 mg L^{-1}; T4 – 6 mg L^{-1}; T5 – 8 mg L^{-1}; T6 – 10 mg L^{-1}; e T7 – controle. Foram utilizados vasos tipo jardineira com capacidade de sete litros. Semeou-se 16 plantas por linha, sendo realizado o desbaste aos 20 dias, mantendo-se 10 plantas por linha. As soluções foram aplicadas semanalmente após o desbaste, na proporção de 100 mL por vaso. Avaliaram-se altura de planta, massa seca da parte aérea e das raízes, volume radicular e número de espigas. Os dados foram submetidos à análise de variância e ajustados por modelos de regressão, considerando-se 5% de significância. Os resultados indicaram ausência de diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos para todas as variáveis analisadas, sugerindo que, nas condições do presente estudo, a cultivar apresenta tolerância à toxicidade por alumínio.
Palavras-chave: alumínio; solução nutritiva; toxicidade; trigo.

Abstract: Wheat is a cereal with wide applicability, and its production has been the focus of increasing scientific interest aiming to maximize productivity. One of the main limiting factors for wheat cultivation in Brazil is aluminum toxicity in the soil, which inhibits cell elongation and compromises root growth. In this context, the present study aimed to evaluate the tolerance of wheat to different aluminum concentrations in nutrient solution. The experiment was conducted in a greenhouse at UNIPAM, in Patos de Minas – MG, from July to September 2024. The cultivar used was MGS-BRILHANTE, developed by EPAMIG. A randomized block design (RBD) was employed, with seven treatments and five replicates, totaling 35 experimental units. The treatments consisted of different concentrations of aluminum in nutrient solution: T1 – no addition of Al^{3+}; T2 – 2 mg L^{-1} of Al^{3+}; T3 – 4 mg L^{-1}; T4 – 6 mg L^{-1}; T5 – 8 mg L^{-1}; T6 – 10 mg L^{-1}; and T7 – control. Planter-type pots with a capacity of seven liters were used. Sixteen plants were

sown per row, with thinning performed at 20 days, maintaining ten plants per row. Nutrient solutions were applied weekly after thinning, in a volume of 100 mL per pot. The variables evaluated were plant height, shoot and root dry mass, root volume, and number of spikes. Data were subjected to analysis of variance and fitted to regression models at a 5% significance level. The results indicated no statistically significant differences among treatments for any of the evaluated variables, suggesting that, under the conditions of this study, the cultivar exhibits tolerance to aluminum toxicity.
Key-words: aluminum; nutrient solution; toxicity; wheat.

1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum sativum* L.) é um dos cereais de maior importância cultivados pelo ser humano, destacando-se por sua relevância tanto na alimentação quanto na economia. Trata-se de uma cultura amplamente disseminada, cultivada em diferentes regiões do mundo, sob variados climas e condições geográficas (Kolcheski *et al*., 2019). Essa importância se justifica pelo fato de o trigo constituir a principal matéria-prima para a produção de alimentos consumidos diariamente, como pães, bolos, biscoitos e massas. Nesse contexto, o estudo desse cereal mostra-se relevante para a compreensão de suas características agronômicas e potencialidades de aplicação (Manfron; Lazzarotto; Medeiros, 1993; Scheuer *et al.*, 2011).

Segundo dados da CONAB (2023), a produção brasileira de trigo na safra 2022/2023 foi de 10.817,5 mil toneladas. Contudo, esse volume ainda é insuficiente para suprir a demanda nacional, estimada em cerca de 16.557,9 mil toneladas anuais, sendo necessário importar aproximadamente 5 mil toneladas. Na safra atual, embora tenham sido registradas adversidades climáticas em algumas regiões produtoras, a condição geral das lavouras é considerada satisfatória, embora inferior àquela observada na safra excepcional de 2022 (CONAB, 2023).

Um dos fatores que limitam o aumento da produtividade do trigo no Brasil é a toxicidade do alumínio, a qual provoca a interrupção do crescimento radicular em razão da inibição do alongamento celular (Kerridge, 1969). Segundo Camargo, Felício e Rocha Júnior (1987), grande parte dos solos brasileiros apresenta acidez elevada, sendo composta por formas de alumínio solúvel ou trocável, que inibem o crescimento das raízes na maioria das variedades de trigo, resultando em menor perfilhamento das plantas e consequente redução da produtividade.

De acordo com Camargo e Oliveira (1981), a toxicidade do alumínio não constitui o único fator limitante em solos ácidos. No entanto, os métodos disponíveis para distinguir plantas tolerantes e sensíveis a determinados níveis de alumínio nesses solos ainda carecem de precisão. Ademais, as partes da planta mais diretamente afetadas, as raízes, são de difícil observação e avaliação em condições de campo. Estudos indicam que o crescimento radicular, especialmente nos estágios iniciais de desenvolvimento, pode ser influenciado por diversos fatores, como força iônica (concentração de sais), pH, temperatura e disponibilidade de fósforo na solução nutritiva, quando há presença de Al^{3+} (Ali, 1973; Camargo; Oliveira, 1981; Camargo; Oliveira; Lavorenti, 1981; Camargo, 1984; Moore, 1974; Moore *et al*., 1976).

Um recurso que pode contribuir para o aumento da tolerância das plantas ao alumínio é a utilização de soluções nutritivas, as quais constituem sistemas homogêneos nos quais os nutrientes essenciais são disponibilizados às plantas, geralmente na forma iônica e em proporções adequadas. Em condições normais, todos os nutrientes presentes na solução são absorvidos pelas raízes em quantidades suficientes para suprir as exigências fisiológicas da planta. (Cometti, 2006). Posto isso, o presente projeto tem como objetivo avaliar a tolerância do trigo a diferentes teores de alumínio.

2 METODOLOGIA

2.1 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO

O experimento foi instalado na casa de vegetação do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), localizada no município de Patos de Minas – MG, no mês de julho de 2024. A área experimental situa-se nas coordenadas geográficas 18°34′ de latitude Sul, 46°31′ de longitude Oeste e 815 metros de altitude. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo tropical de altitude (Cwa), com precipitação média anual em torno de 1400 mm (SOUZA *et al*., 2005), temperatura média anual de 21,1 ºC, máxima anual de 27,8 ºC e mínima anual de 16,3 ºC, conforme dados da Estação Meteorológica de Sertãozinho (EPAMIG), localizada no referido município.

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC), com sete tratamentos e cinco repetições, totalizando 35 unidades experimentais. Os tratamentos consistiram em seis concentrações de alumínio (0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1} de Al^{3+}) em solução nutritiva, além de um tratamento adicional, no qual não houve aplicação da solução. Cada parcela foi composta por cinco linhas, com sete vasos tipo jardineira (capacidade de sete litros) por linha. As concentrações utilizadas estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1: Tratamentos utilizados no experimento: "Tolerância do trigo submetido a diferentes teores de alumínio em solução nutritiva". Safra 2024/25
Centro Universitário de Patos de Minas, UNIPAM. Patos de Minas – MG, 2025

Tratamento	Doses (mg L^{-1} de Al^{3+})
T1	0
T2	2
T3	4
T4	6
T5	8
T6	10
T7	Controle

Fonte: dados da pesquisa, 2025.

A adubação não foi necessária, considerando que a análise do solo indicou alta fertilidade natural. As características químicas da amostra de solo utilizada estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Análise química do solo da área coletada para implantação e condução do experimento "Tolerância do trigo submetido a diferentes teores de alumínio em solução nutritiva". Safra 2024/25.Centro Universitário de Patos de Minas, UNIPAM Patos de Minas - MG 2025

M.O.	pH	P-Meh	P-Rem	K	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H+Al	CTC_T	V%
dag Kg^{-1}	H_2O	mg dm^{-3}			cmolc dm^{-3}					%
2,66	5,90	7,48	16,49	264,13	3,60	1,90	0,01	2,20	8,38	73,73

Fonte: dados da pesquisa, 2025.

As soluções nutritivas foram aplicadas a cada quinze dias, totalizando sete aplicações durante o período experimental. A composição das soluções seguiu os princípios propostos por Hoagland e Arnon (1950), conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 3: Composição da solução nutritiva de acordo com Hoagland e Arnon, 1950.

Fertilizantes/Sais da solução estoque	Concentração da solução estoque	Completo	N -	P -	K -	Ca -	Mg -	S
		Volume da solução estoque por L da solução final						
1-KH2PO4 (Mol L-1)	136,09	1	1	-	-	1	1	1
2-KNO3 (Mol L-1)	101,11	5	-	5	-	5	3	3
3-Ca $(NO_3)_2$ $5H_2O$ (Mol L-1)	236,16	5	-	5	5	-	4	4
4-$MgSO_4.7H_2O$ (Mol L-1)	247,47	2	2	2	2	2	-	-
5-KCl (Mol L-1)	74,56	-	5	1	-	-	2	2
	(g por L de água)	mL L^{-1}						
6-$CaCl_2$ $2H_2O$ (Mol L-1)	147,02	-	5	-	-	-	1	1
7-$NH_4H_2PO_4$ (Mol L-1)	115,31	-	-	-	1	-	-	-
8-NH4NO3 (Mol L-1)	80,04	-	-	-	2	5	-	-
9-$(NH_4)_2SO_4$ (Mol L-1)	132,14	-	-	-	-	-	2	-
10-$MgNO_3.6H_2O$ (Mol L-1)	256,43	-	-	-	-	-	-	2
11-Solução de micros (*)		1	1	1	1	1	1	1
12-Solução Fe EDTA (**)		1	1	1	1	1	1	1

(*) - Em 1L: 2,86 g H3BO3; 1,81 g MnCl2.4H2O; 0,10 g ZnCl2; 0,04 g CuCl2; 0,02 g H2MoO4H2O. (**) - 24,9 g $FeSO_4.7H_2O$ ou 24,25 g de $FeCl_2.6H_2O$; 33,2g EDTA-Na; 89 mL NaOH 1N completar em 800 mL H_2O. Arejar uma noite ao abrigo da luz, completar a 1 L de água.

Para a adição de alumínio, utilizou-se sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$), sendo as doses aplicadas conforme os tratamentos descritos na Tabela 1.

2.2 AVALIAÇÕES

As avaliações foram realizadas no Laboratório e Central de Análises de Fertilidade do Solo (CEFERT), localizado no Campus I do Centro Universitário de Patos de Minas – UNIPAM. As análises abrangeram: massa seca de raízes, perfilhos e espigas; comprimento da parte aérea; volume de raízes; e número de espigas, aos 90 dias após o plantio.

A determinação do comprimento da parte aérea e do número de espigas foi realizada dez dias antes da desmontagem do experimento. Para a mensuração do comprimento da parte aérea, utilizou-se uma fita métrica. O número de espigas foi quantificado com base na contagem total por vaso.

A avaliação da massa seca foi conduzida utilizando-se as mesmas plantas analisadas nas demais variáveis morfológicas. As amostras vegetais (raízes, perfilhos e espigas) foram acondicionadas em sacos de papel e submetidas à secagem em estufa com ventilação controlada, a 65 °C, até atingirem massa constante. Posteriormente, a pesagem foi realizada em balança de precisão, obtendo-se os valores de matéria seca.

O volume radicular foi estimado com o uso de provetas de 1 L, previamente preenchidas com 700 mL de água. As raízes foram imersas na água, sendo registrado o volume deslocado, correspondente ao volume das raízes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as doses de alumínio, nem entre estas e o tratamento controle, para as variáveis analisadas. Tal resultado pode ser atribuído à elevada fertilidade do solo utilizado no experimento, a qual pode ter atenuado os efeitos tóxicos do alumínio. Além disso, os dados sugerem uma possível tolerância da cultivar de trigo utilizada aos teores de alumínio aplicados.

Tabela 4: Resultados estatísticos no experimento: "Tolerância do trigo submetido a diferentes teores de alumínio em solução nutritiva". Safra 2024/25
Centro Universitário de Patos de Minas, UNIPAM. Patos de Minas, 2025

Tratamentos	VR (mL)	MSPA (g)	MSR (g)	CPA (cm)	NE	MSE (g)
0 mg L^{-1} Al^{3+}	77^{NS}	$25,21^{NS}$	$14,13^{NS}$	72^{NS}	24^{NS}	$18,58^{NS}$
2 mg L^{-1} Al^{3+}	77	25,63	18,75	77	22	18,87
4 mg L^{-1} Al^{3+}	79	25,60	15,91	75	22	19,72
6 mg L^{-1} Al^{3+}	86	25,60	16,47	73	23	18,25
8 mg L^{-1} Al^{3+}	95	24,57	17,44	73	22	17,53
10 mg L^{-1} Al^{3+}	79	24,55	17,46	72	22	18,46
Controle	70	23,21	16,87	74	22	17,34

*NS: médias não significativas estatisticamente pelo modelo de Regressão a 5%.
*Legenda: VR: volume de raiz; MSPA: massa seca de parte aérea; MSR: massa seca de raiz; CPA: comprimento de parte aérea; NE: número de espigas por vaso; MSE: massa seca de espigas por vaso.

Camargo, Camargo e Souza (1983), ao avaliarem o crescimento de 22 cultivares de arroz em solução nutritiva com cinco diferentes concentrações de alumínio, observaram que as plantas consideradas tolerantes apresentaram bom desenvolvimento do sistema radicular, além de maior capacidade de absorção de água e nutrientes em maiores profundidades durante períodos de seca. Complementarmente, Diniz e Calbo (1990) verificaram que o aumento da concentração de sais na solução nutritiva atenuou os efeitos inibitórios do Al^{3+} sobre o crescimento das raízes, o que pode ser atribuído à redução da atividade iônica do alumínio em meio mais concentrado.

Por outro lado, Camargo *et al*. (2006) constataram que o crescimento das raízes primárias centrais foi progressivamente reduzido com o aumento das concentrações de alumínio na solução nutritiva. Além disso, identificaram a suscetibilidade de cultivares não tolerantes, como o trigo comum IAC-350, cujo meristema apical radicular apresentou paralisação irreversível após 48 horas de exposição a soluções contendo 10 mg L^{-1} de alumínio.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sob as condições específicas deste estudo, os teores de alumínio aplicados não promoveram efeitos significativos sobre o desenvolvimento do trigo, evidenciando a tolerância da cultivar utilizada à toxicidade do alumínio.

REFERÊNCIAS

ALI, S. M. E. **Influence of cations on aluminum toxicity in wheat (Triticum aestivum Vill., Host)**, 1973. 102 f. Tese (Doutorado) - Curso de Soil Science, Oregon State University, Corvallis, 1973. Disponível em: https://ir.library.oregonstate.edu/concern/graduate_thesis_or_dissertations/qf85nf94c

CAMARGO, C. E. de O. O pH das soluções nutritivas no comportamento de cultivares de trigo à toxicidade de alumínio. **Bragantia**, v. 43, n. 2, p. 327-335, 1984. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87051984000200005.

CAMARGO, C. E. de O.; CAMARGO, O. B. de A.; SOUZA, D. M. de. Tolerância de cultivares de arroz a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva. **Bragantia**, v. 42, n. 1, p. 191-201, 1983. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87051983000100017.

CAMARGO, C. E. de O.; FELICIO, J. C.; FERREIRA FILHO, A. W. P.; LOBATO, M. T. V. Tolerância de genótipos de trigo comum, trigo duro e triticale à toxicidade de alumínio em soluções nutritivas. **Bragantia**, v. 65, n. 1, p. 43-53, 2006. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87052006000100007.

CAMARGO, C. E. de O.; FELÍCIO, J. C.; ROCHA JÚNIOR, L. S. Trigo: tolerância ao alumínio em solução nutritiva. **Bragantia**, v. 46, n. 2, p. 183-190, 1987. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87051987000200003.

CAMARGO, C. E. de O.; OLIVEIRA, O. F. de. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva e no solo. **Bragantia**, v. 40, n. 1, p. 21-31, 1981. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87051981000100003.

CAMARGO, C. E. de O.; OLIVEIRA, O. F. de; LAVORENTI, A. Efeito de diferentes concentrações de sais em solução nutritiva na tolerância de cultivares de trigo à toxicidade de alumínio. **Bragantia**, v. 40, n. 1, p. 93-101, 1981. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87051981000100008.

COMETTI, N. N. *et al*. Soluções nutritivas: formulação e aplicações. *In*: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 89-114.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF, v. 10, safra 2022/23, n. 9 (nono levantamento), junho. 2023.

DINIZ, V. P. M.; CALBO, M. E. R. Efeito da aplicação foliar de fósforo sobre a toxidez de alumínio em plantas de tomate. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 2, n. 2, p. 57-61, 1990.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. L. **The water culture methods for growing plants without soil.** Berkeley, California Agriculture Experiment Station, 1950. 32p. (Bulletin, 347).

KERRIDGE, P. C. **Aluminum toxicity in wheat (Triticum aestivum Vill., host)**. 1968. Tese (Doutorado) - Curso de Soils, Oregon State University, [*S. l.*], 1969.

KOLCHESKI, J. *et al*. Análise financeira da cultura de trigo na safra 2017/2018 em propriedade familiar no nordeste do RS. *In:* IX SIEPEX - SALÃO INTEGRADO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 9., 2019, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: UERGS, 2019.

MANFRON, P. A.; LAZZAROTTO, C.; MEDEIROS, S. L. P. TRIGO - Aspectos agrometeorológicos. **Ciência Rural**, v. 23, n. 2, p. 233-239, ago. 1993. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84781993000200021.

MOORE, D. P. *et al.* Screening wheat for aluminum tolerance. *In*: WORKSHOP ON PLANT ADAPTATION TO MINERAL STRESS IN PROBLEM SOILS, Beltsville, 1976. **Proceedings**... Ithaca: Cornell University, 1976. p.287-295.

MOORE, D. P. Physiological effects of pH on plant roots. *In*: CARSON, E.W. (Ed.). **The plant root and its environment**, Charlottesville, VA: University Press of Virginia, 1974. p.135-151.

SCHEUER, P. M. *et al*. Trigo: características e utilização na panificação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 13, n. 2, p. 211-222, 30 jun. 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v13n2p211-222.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 100-110, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Umidade e temperatura dos solos sob restos culturais

Soil moisture and temperature under crop residues

ALMIR FERNANDES OLIVEIRA
Pós-graduado em Manejo da Fertilidade de Solos no Cerrado (UNIPAM)
almirfernandes@unipam.edu.br

LUIS HENRIQUE SOARES
Professor orientador (UNIPAM)
luishs@unipam.edu.br

Resumo: A degradação de um solo sob cultivo é resultante, principalmente, de seu manejo inadequado, com reflexos nas baixas produtividades das culturas. A cobertura vegetal morta sobre o solo reduz a luminosidade, a temperatura e mantém a umidade do solo e a microbiota ativa. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito dos restos culturais na umidade e a temperatura do solo pós-colheita. O experimento foi realizado no mês de setembro de 2023, em uma propriedade particular na zona rural de Patos de Minas (MG). Os locais de amostragem foram determinados para obter o efeito contrastante entre o resto cultural e o estado do solo. Foram avaliadas a temperatura e a umidade do solo na profundidade de 10 cm do solo montado em um delineamento em blocos casualizados (DBC), compreendendo 4 quantidades de palhada, 4 horários de avaliação e 4 repetições. As análises se deram pela quantidade de palha (0, 5, 10 e 15 kg m²) e horários de avaliações (Hora 1: 08:00, Hora 2: 11:00, Hora 3: 14:00 e Hora 4: 17:00). A palhada utilizada foram os restos culturais de milho produzido no mesmo local do experimento. Os resultados obtidos revelaram que a palhada dos restos culturais de milho em relação ao controle testemunha, exerceu papel físico de isolante para o aquecimento do solo e proporcionou benefícios à manutenção da umidade do solo e na redução da temperatura do solo em até 8°C.
Palavras-chave: manejo conservacionista; cobertura do solo; intempéries.

Abstract: Soil degradation under cultivation is mainly the result of inadequate management, which leads to low crop productivity. Dead plant cover on the soil reduces light incidence and temperature, while maintaining soil moisture and an active microbiota. This study aimed to evaluate the effect of crop residues on soil moisture and temperature after harvest. The experiment was conducted in September 2023 on a private property in the rural area of Patos de Minas, Minas Gerais, Brazil. Sampling sites were selected to contrast the presence of crop residues with bare soil conditions. Soil temperature and moisture were measured at a depth of 10 cm, using a randomized block design (RBD) with four amounts of straw, four measurement times, and four replications. Analyses considered straw amounts (0, 5, 10, and 15 kg m²) and measurement times (Hour 1: 08:00; Hour 2: 11:00; Hour 3: 14:00; Hour 4: 17:00). The straw used consisted of maize crop residues produced in the same experimental area. The results showed that maize crop residues, compared to the bare-soil control, acted as a physical insulating layer that limited soil heating and provided benefits to soil moisture retention, reducing soil temperature by up to 8°C.
Keywords: conservation management; soil cover; weathering.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, por sua vasta extensão territorial, abrange diferentes tipos de clima. Algumas épocas do ano possuem um clima seco no período do inverno, com a diminuição do fotoperíodo, limitando o cultivo nesse período do ano. Assim, no Brasil o uso de palhada sobre o solo ou uso de coberturas de plantas anuais ou perenes dessecadas ganhou projeção através do plantio direto (Altieri *et al*., 2011), protegendo o solo e ajudando no controle de ervas daninhas. A integração do uso de plantas de cobertura, palhada de gramíneas ou leguminosas ou restos culturais, com a utilização de dose baixa de herbicidas, pode resultar em sistemas de cultivo eficazes no controle de plantas daninhas e mais adequadas quanto ao aspecto ambiental, tanto pela redução do uso de herbicidas quanto pelo aproveitamento dos benefícios do sistema de plantio direto (Marchesan *et al.* 2016).

Os resíduos agrícolas são importantes para o desenvolvimento da planta. Resíduos de cultura na superfície do solo como "mulching" é uma prática benéfica para melhorar as propriedades edafológicas, devido ao efeito na conservação do solo e água, regime térmico, atividade da fauna, e incremento no conteúdo de carbono orgânico (CO) do solo.

A palha do milho protege a superfície do solo e, consequentemente, seus agregados da ação direta dos raios solares e do vento; diminui a taxa de evaporação permitindo o aumento da infiltração e do armazenamento de água no solo e mantém a temperatura mais amena na camada mais superficial, reduzindo sua amplitude e favorecendo o desenvolvimento de plantas e organismos no solo. Quando incorporado no solo, sua decomposição é lenta e gradativa, promovendo aumento de matéria orgânica.

A manutenção ou incorporação de resíduos orgânicos na superfície do solo forma uma camada de material vegetal em diferentes estágios de decomposição. Isso mantém a atividade microbiana, por servir como fonte de energia e criar microclima com menor variação térmica e maior disponibilidade de água (Duarte *et al*., 2014).

A matéria orgânica do solo (MO) proporciona um grande papel na estruturação e, assim, grande impacto na infiltração da água, desenvolvimento radicular e resistência à erosão, além de ser reservatório de nutrientes (Paul; Clark, 1996).

A matéria orgânica do solo é proveniente, em sua maior parte, da vegetação e das palhadas de restos culturais que, em quantidades e manejados adequadamente, exercem ação protetora contra a desagregação do solo pela chuva, por aumentarem a formação e a estabilidade dos agregados (Carpenedo; Mielniczuk, 1990).

A influência da matéria orgânica na agregação do solo ocorre por um processo dinâmico. Ao se adicionar quantidade de palhada no solo, a atividade microbiana é intensificada, resultando em produtos que proporcionam a formação e estabilização de agregados (Campos *et al*., 1995).

Os indicadores biológicos do solo, que incluem a biomassa microbiana, a respiração microbiana, a atividade enzimática e o quociente metabólico, são bastante utilizados para o monitoramento da qualidade do solo no que se refere não apenas à ciclagem dos nutrientes, como também à estimativa da capacidade do solo para o crescimento vegetal (Araújo; Monteiro, 2007).

A biomassa microbiana é a parte ativa da matéria orgânica do solo e constitui-se num indicador de qualidade largamente utilizado para a averiguação de pequenas mudanças impostas pelas alterações no uso e manejo empregados nesse sistema. Alterações nessas variáveis reflete na quantidade e qualidade das fontes de carbono existentes ou adicionadas ao solo (Araújo; Melo, 2010).

Estudos demonstram que os sistemas de manejo com utilização de palhada sobre o solo influenciam na temperatura e na umidade do solo (Veiga *et al*., 2010). Neste sentido, a cobertura vegetal, considerada uma prática conservacionista, proporciona inúmeros benefícios ao solo, como menor ocorrência de plantas daninhas e redução da perda de água do solo, contribuindo para a manutenção da umidade, incrementos na matéria orgânica do solo, que, por sua vez, beneficia os microrganismos do solo (Carneiro *et al*., 2008; Souza et al., 2008; Santos *et al*., 2011).

O comportamento da umidade e da temperatura do solo influenciam os mais diversos fatores ligados às culturas agrícolas e sua produtividade (Stefanoski *et al*., 2013). Dessa maneira, o conhecimento de como um solo se comporta quando submetido à utilização de cobertura sobre ele é de grande importância para o entendimento das relações existentes entre solo-planta em regiões de cerrado, podendo oferecer subsídios para o estudo de técnicas de cultivo mais adequadas. Diante desse cenário, o objetivo do presente estudo foi avaliar a eficiência dos restos culturais e palhada de milho na retenção da umidade do solo e a na oscilação da temperatura no solo.

2 METODOLOGIA

O estudo foi conduzido e realizado no município de Patos de Minas, MG, no período de 04/09 a 08/09 de 2023 em uma propriedade particular na zona rural de Lagoa Formosa (MG). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho, relevo plano e textura argilosa. A temperatura média é em torno de 21,8° C e a precipitação média anual é 1296 mm/ano, sendo que, na condução do ensaio, não houve precipitação pluvial, mantendo-se a umidade natural do solo.

O experimento foi instalado na forma de (DBC) delineamento de blocos ao acaso, com esquema fatorial 4x4 e com 4 repetições, sendo que o primeiro fator corresponde a quantidade dos restos culturais de milho (RCM) na ordem de (RCM1: 5 kg m^2, RCM2: 10 kg m^2, RCM3: 15kg m^2 e RCM4: 0 kg m^2) de matéria seca. Para o segundo fator de avaliação, têm-se os horários de coleta de temperatura (CT): CT1: 8h, CT2: 11h, CT3: 14h e CT4: 17h seguindo as normas e orientações de Ribas *et al*. (2015).

O experimento foi instalado em uma propriedade rural particular, onde foi cultivado milho grão (*Zea mays*) K9510, híbrido da KWS convencional de características como alto potencial produtivo e rendimento, na safra 2022/2023. O milho foi mantido no local para senescência natural sem dessecação e colhido em meados do mês de agosto de 2023. A área escolhida para o experimento foi mantida preservada e limpa sem nenhum crescimento vegetal até a sua instalação.

Para a instalação e condução do experimento, foram preparados canteiros que são as parcelas, com uma área de 3m^2, e dimensões de 1,5m de largura por 2m de comprimento. As parcelas foram isoladas com tábuas de madeira nas proporções de 0,15 m de largura, por 0,015 m de espessura e comprimento de acordo com as dimensões das

parcelas, isto para evitar que o vento pudesse tirar ou descaracterizar o ambiente de teste, assim formando os canteiros.

Logo após a preparação das parcelas, foi feita a cobertura com a palha de milho seca. A palha foi colhida no próprio local com a respectiva taxa de aplicação formando um tratamento. A taxa de aplicação seguiu a quantidade de restos culturais de milho (RCM) na ordem de RCM1: 5 Kg m^2 para o tratamento 01; RCM2: 10 Kg m^2 para o tratamento 02; RCM3: 15 Kg m^2 para o tratamento 03; RCM4: 0 Kg m^2 para o controle.

Para a coleta de amostras e avaliações de temperatura, foi utilizado um termômetro tipo K, que é um dispositivo com o sistema de aquisição de dados de temperatura (SADT) do tipo K, Chromel-Alumel (INMETRO, 2009), com diâmetro de 1,5mm fabricados e calibrados pela ECIL S. A., capazes de medir temperaturas na faixa de -50 a 1350° C. O equipamento é calibrado e baseado na comparação dos sinais gerados por um termômetro de referência, ambos posicionados no mesmo meio termostático conforme para garantir a exatidão e a estabilidade na coleta e leitura da temperatura.

A coleta da temperatura foi estabelecida conforme Ribas *et al*. (2015), seguindo o horário de coleta de temperatura (CT) CT1: para 8h; CT2: para 11h; CT3: para 14h; CT4: para 17h, entre os dias 04 a 08/09/2023, anotando-se em planilha para posterior análise estatística.

A temperatura do solo foi medida na profundidade de 10 centímetros do solo em cada parcela com o termômetro tipo K, de visor digital e aguardando o tempo de estabilização da temperatura para uma nova tomada de temperatura. Os horários de avaliação da temperatura foram estipulados para 8h, 11h, 14h e 17h durante 05 dias de avaliações consecutivas conforme supracitados.

Para as avaliações de umidade das amostras, foram coletadas 100 gramas de solo na camada superficial de 0 - 10 centímetros aleatoriamente em cada parcela, identificadas corretamente, embaladas em sacos plástico, armazenadas em caixa isopor e enviadas para o laboratório para a análise de umidade de solo diariamente durante os 5 dias de avaliações, sendo que o solo foi coletado apenas uma vez ao dia durante os dias de avaliação.

Para a coleta das amostras, foi removida a cobertura vegetal da camada superficial e, antes do acondicionamento das amostras, o excesso de raízes contido no solo coletado foi removido manualmente

O método de secagem em estufa é o método considerado padrão; nele a massa d'água presente em uma dada amostra de solo é obtida pela diferença entre o peso da amostra úmida e o peso da amostra seca (Silva, 2013).

Esse método de secagem em estufa é adotado como padrão devido a sua simplicidade, praticidade e principalmente a precisão dos dados, sendo utilizado como referência para calibrar equipamentos e métodos (Buske *et al*., 2013).

O processo de secagem ocorreu em um laboratório de biocontrole no município de Patos de Minas (MG), adaptado para todos os tipos de análises de solos. As amostras foram secas em estufa a 100° C durante 24 horas ou até que se estabilizasse o peso. Para a realização da secagem em estufa, foram seguidos os procedimentos descritos na Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 6457 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1986).

De acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986), a umidade do solo é obtida através da equação H = [(M1-M2)/(M2-M3)] x 100, onde H = umidade do solo, M1 = massa do solo úmido mais a massa do recipiente expresso em gramas, M2 = massa do solo seco mais a massa do recipiente expresso em gramas e M3 = massa do recipiente expresso em gramas.

Para preparar o processo de umidade de solo, foi utilizada uma balança de precisão, que auxiliou na pesagem do solo e, para acondicionar o solo a ser levado para a estufa, utilizou-se de placas de Petri de vidro. Os resultados foram anotados e posteriormente tabelados. Sendo assim, foi possível avaliar as oscilações da temperatura do solo em função da quantidade de palha dos restos culturais do milho em diferentes horas do dia e a umidade retida no solo em relação a palhada do milho.

Foi realizada análise de variância (ANOVA). Quando foram identificadas diferenças significativas na ANOVA, aplicou-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Os procedimentos estatísticos foram realizados com o auxílio do software *Minitab*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao avaliar os dados estatísticos, observou-se que houve uma diferença estatística significativa a 5% (P<0,05) para a quantidade de restos culturais de palha de milho (RCM) aplicados nas parcelas (Tabela 1), diferenças significativas nos horários de avaliação na coleta de temperatura (CT). Esses resultados são de grande relevância, pois as maiores quantidades de palhada e restos culturais de milho sobre o solo podem evitar que a incidência solar atinja diretamente o solo, amenizando o efeito da radiação diretamente (Figura 1). Deve-se ressaltar que a intensidade solar é menor durante o período da manhã comparados aos períodos da tarde, que podem refletir mais intensamente em relação aos horários da manhã (ACOSTA *et al*. 2004).

Tabela 1: Avaliação do efeito da quantidade de palha sobre o horário na temperatura do solo. Patos de Minas – MG, 2023

Horários	5 kg m²	10 kg m²	15 kg m²	0 kg m²	
	Quantidade de palha				Médias
08:00	22,30 a D	22,80 a D	21,90 a C	25,50 b D *	23,12
11:00	25,37 b C	24,90 b C	23,60 b C	33,60 a C	26,86
14:00	26,00 b B	25,80 c B	25,40 c B	35,80 a B	28,25
17:00	26,90 b A	25,00 c A	24,70 c A	36,10 a A	28,17
Médias	25,14	24,62	23,9	32,75	

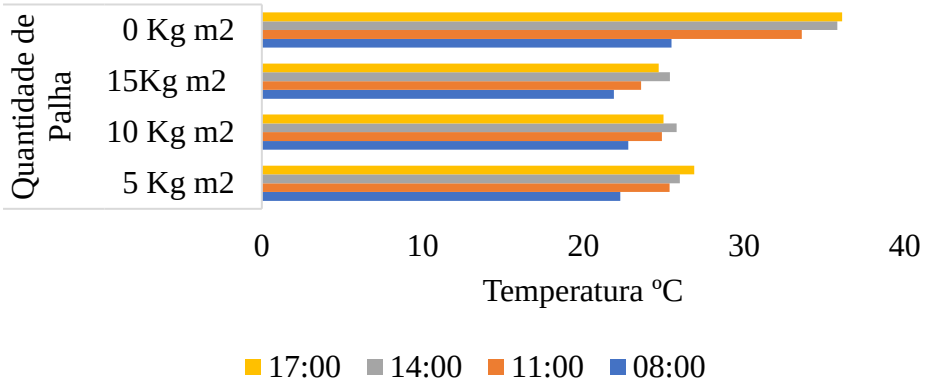
* Letras minúsculas iguais na mesma linha e letras maiúsculas iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente ao nível de 5% (P<0,05)

Na condição de aplicação de elevadas quantidades de palha sobre o solo, em ambiente cultivado por culturas anuais ou perenes, é possível incrementar a taxa de crescimento das plantas, manutenção de temperatura do solo mais adequada para as

raízes, melhorar aeração do solo e colaborar na taxa de degradação do material de cobertura (Oliveira *et al*., 2001).

A associação entre temperatura do solo e quantidades de palha demonstra que, à medida que se aumenta a quantidade de palha, há um efeito na redução da temperatura do solo (Gráfico 1). Bragagnolo e Mielniczuk (1990) mostraram que a cobertura morta sobre o solo ameniza as perdas de água por evaporação e diminuem as temperaturas do solo.

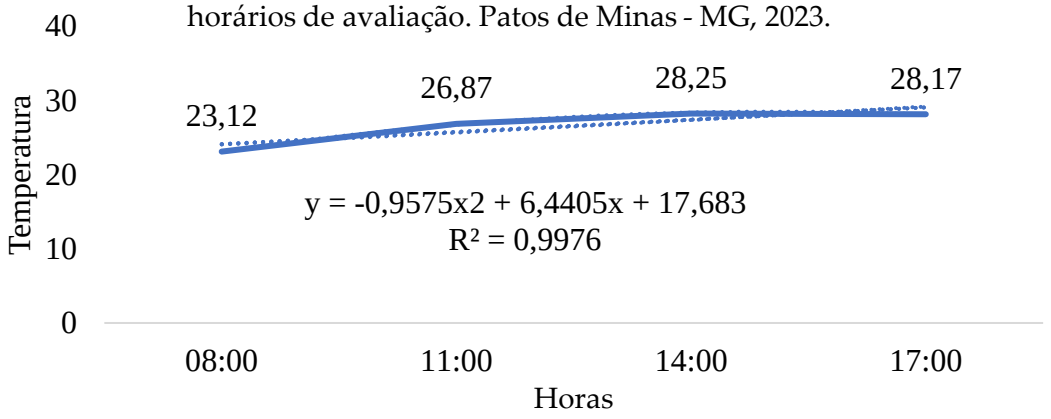
Gráfico 1: Avaliação do efeito da quantidade de palha sobre o horário na temperatura do solo. Patos de Minas, 2023.



No solo sob condições de ausência de palhada em cobertura, a temperatura do solo apresentou maiores amplitudes ao longo do dia e essas amplitudes provavelmente podem ter variado ao longo do perfil do solo. As maiores amplitudes térmicas e os horários de avaliação em que ocorrem os valores máximos de temperatura foram diferentes e ocorreram próximo das 14 horas (Gráfico 2).

Os horários de avaliação da temperatura do solo (Figura 2) mostraram claramente a elevação da temperatura do solo a partir das 9h até às 16 horas. Nos períodos mais quentes, é provável que o efeito sobre a fisiologia das plantas possa ser um tanto negativo, em função de maiores perdas por transpiração, mas que no campo pode ser amenizado pela manutenção de palha sobre o solo na quantidade que varia de 5 a 15 kg m^2.

Gráfico 2: Variação entre a temperatura do solo em função dos horários de avaliação. Patos de Minas - MG, 2023.



O clima e o tipo de solo existente na região do cerrado têm influência direta na temperatura e umidade do solo, independentemente da produção de matéria orgânica e palhada das plantas de cobertura. Estudos conduzidos na região do Cerrado têm obtido resultados positivos atribuídos aos restos culturais na superfície do solo após a colheita (Bragagnolo; Mielniczuk, 1990).

O resultado da umidade do solo apresentou diferença estatística significativa a 5% (P<0,05) entre as parcelas cobertas com a palhada e restos culturais de milho (RCM) na camada 0 -10 centímetros e no controle (Tabela 2). Esse fator pode ter influência positiva, pois com a cobertura da palhada se diminui a incidência solar direta e por consequência a evaporação da umidade do solo (Bragagnolo; Mielniczuk, 1990).

Tabela 2: Umidade do solo em (%) na profundidade 0-10 cm. Patos de Minas - MG, 2023.

	5 Kg m²	10 Kg m²	15Kg m²	0 Kg m²	
Dias Avaliados	Umidade do Solo (%)				Média
04/09/2023	27,5 b	31,3 a	32,3 a	8,9 c *	25,00
05/09/2023	26,3 b	30,2 a	30,1 a	9,1 c	23,92
06/09/2023	28,8 a	29,7 a	33,0 a	8,9 c	25,10
07/09/2023	28,2 a	30,0 a	30,2 a	9,0 c	24,35
08/09/2023	27,0 b	29,5 a	31,7 a	9,0 c	24,30
Médias	27,56	30,14	31,46	8,98	

* Letras diferentes dentro das colunas representam diferenças estatisticamente ao nível de 5% (P<0,05) na umidade do solo entre os tratamentos.

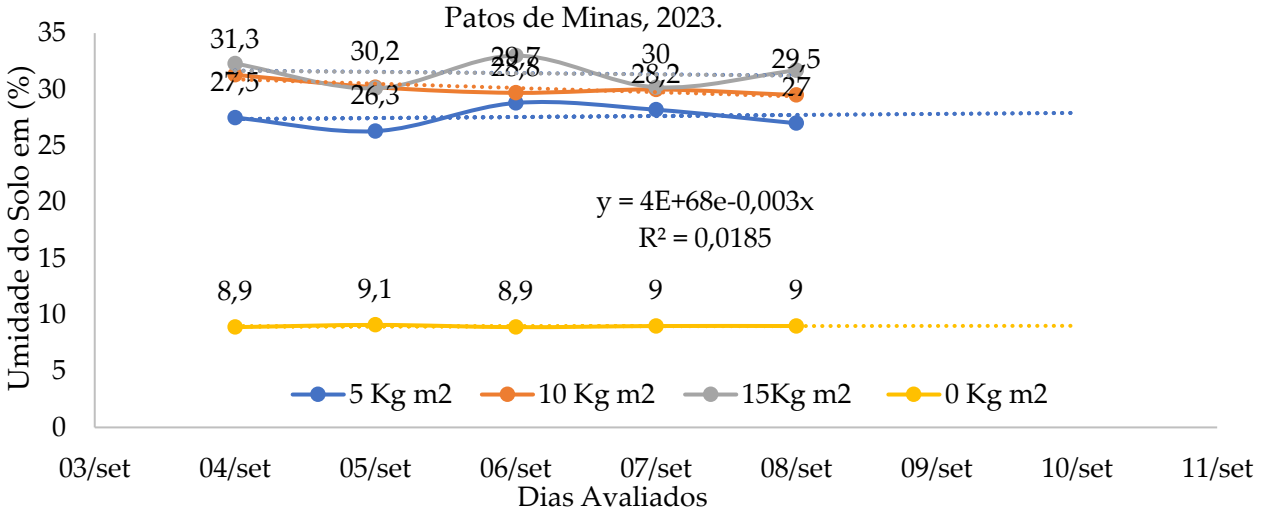
Entre as diversas vantagens que existem na manutenção da palhada proveniente da colheita sobre a superfície do solo, está a maior disponibilidade de água para as plantas, visto que as perdas são consideravelmente reduzidas. Nesse contexto, Bizari *et al*. (2009) retratam, em sua pesquisa, que houve uma maior economia de água em relação a superfícies do solo sem cobertura, uma vez que a palhada manteve a umidade do solo elevada por mais tempo. No mesmo sentido, Iftikhar e Ali (2004) concluíram, na pesquisa feita por eles, que a manutenção de resíduos em superfícies do

solo pode reduzir em até 50% as perdas de água por evaporação. Maior economia de água pela manutenção de resíduos no solo também foi verificada por Stone (2005).

Observando-se os resultados encontrados no presente trabalho, com a umidade do solo na profundidade 0-10 (Tabela 2), houve estatisticamente uma redução na perda da umidade por evaporação do solo significativamente de 30% (Gráfico 3) na parcela descoberta em relação às parcelas com cobertura de palhada de restos culturais de milho.

Fidalski *et al.* (2010) encontraram efeitos positivos no conteúdo da umidade do solo em camadas superficiais de solos com textura arenosa, bem como solos com textura média, quando mantido com cobertura de palhada na superfície. Tal fato demonstra que a manutenção de resíduos sobre o solo também pode atuar como agentes protetores.

Gráfico 3: Umidade do solo em (%) na profundidade 0-10 cm. Patos de Minas, 2023.



Os efeitos da palhada na manutenção da umidade do solo buscaram entender se as camadas de palhada sobre o solo possuem alguma influência,

A palhada contribui para a manutenção da umidade do solo. Sendo assim, é perceptível, conforme a umidade do solo representada neste trabalho, a umidade se manter preservada nas parcelas com cobertura (Gráfico 3) em relação ao controle. Esta palhada de restos culturais de milho teve um efeito direto no solo, o que é muito importante para o suprimento de água e umidade das culturas a serem implantadas, principalmente nos períodos mais secos do ano.

Diante do exposto, a conservação de práticas conservacionistas, como a manutenção dos resíduos provindos dos restos culturais sobre a superfície do solo, se destaca por favorecer um maior aproveitamento das águas, evitando-se perdas excessivas por escoamento superficial (Paiva; Araújo, 2012).

Segundo Mota (1989), a temperatura do solo é uma variável que influencia diferentemente no crescimento e no desenvolvimento das plantas, podendo causar danos na produtividade. Deve-se controlar a distribuição dessas plantas no solo, assim são evitadas as temperaturas máximas da superfície durante o período inicial de estabelecimento da cultura no campo.

4 CONCLUSÃO

Os resultados deste experimento demonstraram que a quantidade de palhada de restos culturais do milho nas quantidades de 5, 10 e 15 kg m^2 foi suficiente para garantir a umidade em até 30% e a temperatura em até 8° C menores em relação ao solo sem palha. Sendo assim, a presença de palhada sobre o solo exerce fisicamente um papel de isolante térmico para o aquecimento do solo e da manutenção da umidade do solo.

REFERÊNCIAS

ACOSTA, J. A. de A.; GIRARDELLO, V.; WEBER, MIRLA A.; ROSSATO, O. B.; SANTI, O. G. R.; LOVATO, T.; AMADO, T. J. C. Efeito na temperatura e na umidade do solo pelo aporte de resíduos orgânicos de culturas de cobertura. *In*: VII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E IV ENCONTRO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO. **Anais** [...]. Universidade do Vale do Paraíba, p.15151-1518, 2004. Disponível em: http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2004/trabalhos/epg/pdf/EPG5-9.pdf.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457/86**: amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ALTIERI, M. A.; LANA, M. A.; BITTENCOURT, H. V. H.; KIELING, A. S.; COMIN, J. J.; LOVATO, P. E. Aumento da produtividade das culturas por meio da supressão de plantas daninhas em sistemas de plantio direto orgânico em Santa Catarina, Brasil. **Revista de Agricultura Sustentável**, v. 35, n. 8, p. 855–869, 2011.

ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, p. 66-75, 2007.

ARAÚJO, A. S. F.; MELO, W. J. Soil microbial biomass in organic farming system. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 11, p. 2419-2426, 2010.

BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; ROQUE, M. W.; SOUZA, A. L. Consumo de água e produção de grãos do feijoeiro irrigado em sistema de plantio direto convencional. **Ciência Rural**, v. 39, p.2073-2079, 2009.

BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 369-374, 1990.

BUSKE, T. C.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; TORRES, R. R.; ROSSO, R. B.; BRAGA, F. de V. A. Determinação da umidade do solo por diferentes fontes de aquecimento. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 2, p. 315-324, 2013.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 19, p. 121-125, 1995.

CARNEIRO, M. A. C.; CORDEIRO, M. A. S; ASSIS, P. C. R.; MORAES, E. S.; PEREIRA, H. S.; PAULINHO, H. B.; SOUZA, E. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 2, p. 455-462, 2008.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolo roxo submetidos a diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 14, p. 99-105, 1990.

DUARTE, I. B.; GALLO, A. S.; GOMES, M. S.; GUIMARÃES, N. F.; ROCHA, D. P.; SILVA, R. F. Plantas de cobertura e seus efeitos na biomassa microbiana do solo. **Acta Iguazu**, [*S. l.*], v. 3, n. 2, p. 150-165, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1999. 212p.

FIDALSKI, J.; AULER, P. A. M.; BERALDO, J. M. G.; MARUR, C. J.; FARIA, R. T.; BARBOSA, G. M. C. Disponibilidade de água no solo em sistema de preparo, manejo da cobertura morta e porta-enxertos de citrus. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 34, n. 3, p. 917-924, 2010.

IFTIKHAR, F.; ALI, S. Impacto de diferentes tipos de coberturas de solos. **Sarhad Journal of Agriculture**, v. 20, n. 4 p. 571-573, 2004.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2008), Rio de Janeiro, 2009.

MARCHESAN, E. D.; TREZZI, M. M.; BARANCELLI, M. V. J.; BATISTEL, S. C.; PAGNONCELLI, F. de B. J.; VIDAL, R. A. Integration mulches with atrazine for weed management in corn. **Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 1, p. 1-7, 2016.

MOTA, F, S. **Meteorologia agrícola**. São Paulo, Nobel, 1989.

OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. C. O.; KINGSTON, G.; BARBOSA, M. H. P.; VITTI, A. C. Decomposition and release of nutrients from sugarcane trash in two agricultural environments in Brazil. *In*: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHONOLOGISTS, **Proceedings**. Cairns, D. M. Hogarth, 2001.

PAIVA, A. Q.; ARAÚJO, Q. R. Fundamentos do manejo da conservação dos solos na região produtora de cacau da Bahia. *In*: VALLE, R. R. **Ciência, tecnologia e manejo do cacaueiro**. 2. ed. Brasília, Ceplac/CEPEC/SEFIS, 2012. p. 115-134.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1996.

PEZZOPANE, J. E. M. Dinâmica entre temperaturas do ar e do solo sob duas condições de cobertura. **Revista Acadêmica, Ciências Agrárias Ambientais**, Curitiba, v. 11, Supl. 1, p. S147-S154, 2013.

RIBAS, G. G.; STRECK, N. A.; SILVA, S. D. D.A; ROCHA, T. S. M. DA; LANGNER, J. A. Temperatura do solo afetada pela irrigação e por diferentes coberturas. **Eng. Agríc**., Jaboticabal, v. 35, n. 5, p. 817-828, 2015.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [*S. l.*], v. 15, n. 7, p. 670-679, 2011.

SILVA, D. O. M. da. **Validação de um sensor de determinação da umidade do solo para o manejo da irrigação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2013.

SOUZA, K. B.; PEDROTTI, A.; RESENDE, S. C.; SANTOS, H. M. T.; MENEZES, M. M. G.; SANTOS, L. A. M. (2008) Importância de novas espécies de plantas de cobertura de solo para os tabuleiros costeiros. **Revista da Fapese**, v. 4, n. 2, p. 131-140, 2008.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, LEANDRO, P. (2013). Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

STONE, L. F. Irrigação do feijoeiro e do arroz de terras altas no sistema de plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 14, p. 31-34, 2005.

VEIGA, M.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. (2010). Sistemas de preparo do solo e fontes de nutrientes que afetam a cobertura, temperatura e umidade do solo em Latossolo Vermelho Distrófico Argiloso sob milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 2011-2020, 2010.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 111-126, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Qualidade fisiológica de sementes de milho, soja e trigo tratadas com o micronutriente vanádio

LAUREANE VERISSIMO SOARES
Discente de Agronomia (UNIPAM)
ealaureaneverissimos@unipam.edu.br

WELLINGTON FERRARI DA SILVA
Professor orientador (UNIPAM)
wellingtonferrari@unipam.edu.br

Resumo: O presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos do tratamento com o micronutriente vanádio (V_2O_5) na qualidade fisiológica de sementes de milho, soja e trigo. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com sete doses (0; 0,05; 0,25; 0,45; 0,75; 0,95; e 1,05 g.·kg^{-1} de sementes) e quatro repetições. Foram avaliadas as variáveis porcentagem de plântulas normais, comprimento de raiz e parte aérea. As médias foram submetidas à análise de variância através do programa computacional SISVAR, e posteriormente submetidas ao teste de Tukey, a nível de 5% de significância. A aplicação do micronutriente vanádio influenciou positivamente a qualidade fisiológica das sementes. Em milho, a dose de 0,05 g.·kg^{-1} resultou na maior porcentagem de plântulas normais, no maior comprimento radicular e na maior parte aérea. Na soja, observou-se maior plântulas normais na dose de 0,05 g.·kg^{-1} e maior comprimento radicular com 0,25 g.·kg^{-1}. Para o trigo, as doses de 0,25 e 1,05 g.·kg^{-1} proporcionaram os maiores índices de plântulas normais, enquanto a dose de 0,05 g.·kg^{-1} favoreceu o crescimento da parte aérea. Conclui-se que o vanádio apresenta potencial como bioestimulante no tratamento de sementes, sendo as doses entre 0,05 e 0,25 g.·kg^{-1} as mais eficazes para a promoção do vigor inicial em milho, soja e trigo.
Palavras-chave: tratamento de sementes, vigor, vanádio.

Abstract: This study aimed to evaluate the effects of seed treatment with the micronutrient vanadium (V_2O_5) on the physiological quality of maize, soybean, and wheat seeds. The experiment was conducted in a completely randomized design with seven doses (0; 0.05; 0.25; 0.45; 0.75; 0.95; and 1.05 g.·kg^{-1} of seeds) and four replications. The evaluated variables were percentage of normal seedlings, root length, and shoot length. Data were subjected to analysis of variance using SISVAR software, followed by Tukey's test at a 5% significance level. Vanadium application positively influenced seed physiological quality. In maize, 0.05 g.·kg^{-1} resulted in the highest percentage of normal seedlings, longest root, and greatest shoot length. In soybean, the highest seedling percentage was observed at 0.05 g.·kg^{-1} and the longest root at 0.25 g.·kg^{-1}. In wheat, 0.25 and 1.05 g.·kg^{-1} provided the highest percentages of normal seedlings, while 0.05 g.·kg^{-1} favored shoot growth. It is concluded that vanadium shows potential as a biostimulant in seed treatment, with doses between 0.05 and 0.25 g.·kg^{-1} being the most effective in promoting early vigor in maize, soybean, and wheat.
Keywords: seed treatment, vigor, vanadium.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é reconhecido como um dos principais produtores agrícolas mundiais, destacando-se na produção e exportação de grãos como soja, milho e trigo. No ciclo 2023/2024, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024) estimou a produção total de grãos em aproximadamente 298,41 milhões de toneladas, representando uma redução de 7% em relação à safra anterior, atribuída a condições climáticas adversas que afetaram as principais regiões produtoras do país (CONAB, 2024).

Mesmo assim, o Brasil segue consolidando sua posição de liderança na produção de grãos, especialmente soja e milho. A safra de 2024/2025 apresentou números recordes, com a produção de soja estimada em 167,3 milhões de toneladas, um aumento de 15,4% em relação à safra anterior (IBGE, 2025). O milho também registrou crescimento, com uma produção estimada de 120,6 milhões de toneladas, 5,1% superior ao volume produzido em 2024 (IBGE, 2025).

Dentre as culturas de inverno, destaque para o trigo que apresentou variações significativas na safra 2024/2025. A área semeada foi reduzida em 11,9% em relação à safra anterior, embora a produtividade tenha aumentado 13%, atingindo 2.634 kg ha^{-1}, resultando em uma produção estimada de 8,064 milhões de toneladas, ligeiramente abaixo das 8,1 milhões de toneladas produzidas na safra de 2023 (EMBRAPA, 2024).

No entanto, a produtividade da cultura é dependente de diversos fatores que variam desde um preparo do solo adequado, a semeadura na época certa, a utilização correta de fungicidas, inseticidas, e tratamento de sementes associadas à utilização de sementes de qualidade. Neste sentido, pesquisas demonstram que o uso de defensivos químicos como inseticidas, fungicidas e fertilizantes auxiliam na sua máxima expressão do potencial fisiológico (Bays *et al*., 2007).

Várias pesquisas têm mostrado os efeitos positivos do tratamento de sementes com elementos minerais, principalmente, com micronutrientes. Por exemplo, o Zn, o B e o Co têm papel fundamental na formação das raízes por estarem envolvidos em hormônios reguladores desse processo (Soares *et al*., 2016).

Já o Co, o Mo, o Ni, o Fe, o Mn, o Zn e o Cu são indispensáveis no processo de FBN (O'hara, 2001). Além disso, foi demonstrado que o zinco quando aplicado isoladamente estimula o crescimento de plântulas de soja, proporciona maior tolerância das plantas a doenças e aumenta a produtividade de grãos (Kumari *et al*., 2019). A utilização de Cu, Mn e Zn possibilita o aumento da altura de plantas e do rendimento de grãos (Wiatrak, 2013). Aplicações de Co e Mo em associações com microrganismos eleva o teor de nitrogênio foliar, peso de grãos e a produtividade de soja (Galindo *et al*., 2017).

Contudo, para que o tratamento de sementes com elementos minerais seja eficaz e proporcione suporte seguro ao desenvolvimento inicial das plântulas, é fundamental que os produtos ou suas combinações não exerçam efeitos negativos sobre o potencial fisiológico das sementes, tanto imediatamente após a aplicação quanto ao longo do período de armazenamento (Bork *et al*., 2018). Além disso, a eficiência do tratamento está condicionada à aplicação da dose recomendada de forma uniforme sobre as sementes, evitando-se concentrações excessivas que possam comprometer microrganismos benéficos presentes na superfície ou na rizosfera (Taylor; Harman, 1990).

Diante disso, um dos nutrientes que tem relatos na agricultura é o vanádio, que pode ser essencial para certas plantas e microrganismos (Ronquim, 2020). Em experiências realizadas em areia, observou-se que, no cultivo de milho, a aplicação de vanádio nas concentrações de 0,05 a 0,25g aumentou o crescimento das folhas e a altura da planta (Singh, 1971). Muito interessantes foram as experiências realizadas com beterraba por (Singh; Wort, 1969) em um solo contendo 0,075g de vanádio. Ao aplicar vanádio de amônio junto com outros micronutrientes, a produção de beterraba aumentou lenta, mas significativamente.

A presença conjunta de vanádio e molibdênio em soluções nutritivas exerce ação favorável na redução de nitrato, com o consequente aumento do teor de aminoácidos livres das plantas, dados obtidos por Catalina (1966). A adição de 40g de vanádio a uma solução nutritiva sem molibdênio parece não exercer ação da redução de N-Nítrico em plantas cultivadas em areia (Catalina, 1966). O mesmo autor constatou que a presença do elemento vanádio favorece a sua absorção pelas plantas.

Por outro lado, plantas de arroz tratadas com vanádio a concentrações de 40 e 80 mgL^{-1} obtiveram uma diminuição de sua fase vegetativa e do seu crescimento reprodutivo para os 42 e 70 dias, respectivamente. Observou-se que, na fase do crescimento vegetativo das plantas de arroz, o vanádio diminuiu significativamente a altura, o diâmetro, o número de perfilho, o peso do caule fresco e seco, o comprimento de raiz e o peso das raízes frescas e secas. Em termos de crescimento reprodutivo, as plantas de arroz tratadas com 40 e 80 mgL^{-1} de vanádio morrem antes da fase de floração. As concentrações de vanádio foram encontradas na raiz de arroz em proporções maiores do que as do caule e da semente, em ordem decrescente (Chongkid; Vachirapattama; Jirakiattikul, 2007).

Sendo assim, a pesquisa científica e a descoberta de novas tecnologias são ferramentas fundamentais para elevar a eficiência e a rentabilidade no campo. Dentro destas ferramentas, há alguns métodos que garantem maior desempenho e produtividade nas culturas, sendo uma delas o uso de micronutrientes. Diante do exposto este trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade fisiológica de sementes de milho, soja e trigo em resposta à utilização de elemento mineral vanádio no tratamento de sementes.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório Núcleo de Pesquisas e Análises de Sementes do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM) durante o período de 2024/2025. Foram utilizadas as seguintes sementes: de milho, K9606VIP3; soja TMG 2378 IPRO; trigo, MGS Brilhante, fornecidas por uma empresa idônea da região da cidade de Patos de Minas (MG), Brasil.

O experimento foi realizado seguindo o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com sete tratamentos e quatro repetições de 50 sementes cada uma, totalizando 350 parcelas experimentais. Os tratamentos consistiram em aplicações nas sementes de milho, soja e trigo com o elemento mineral vanádio (óxido de vanádio – V_2O_5). As doses utilizadas para cada tratamento estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Tratamentos referentes ao experimento

Tratamentos	Doses g. kg^{-1} de sementes
T_1	0
T_2	0,05
T_3	0,25
T_4	0,45
T_5	0,75
T_6	0,95
T_7	1,05

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Para o teste padrão de germinação, as sementes tratadas com vanádio para os grãos de milho, soja e trigo, seguiram a metodologia da Tabela 1. As sementes foram distribuídas aleatoriamente em papel germitest, previamente umedecidos com uma quantidade de água equivalente a 2,5 vezes o peso do substrato seco. Os rolos de cada tratamento foram colocados juntos em sacos plásticos transparentes e amarrados; posteriormente, foram acondicionados em germinador ELETROLAB (controlador de temperatura microprocessado), mantidas a 20°C para sementes de trigo e 25ºC para sementes de soja e milho. As avaliações foram realizadas no 7º, 8º e 8º dias após a semeadura, para as sementes de milho, soja e trigo, respectivamente, segundo os critérios estabelecidos pelas Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009). Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais, sendo consideradas aquelas que apresentassem parte aérea e raízes bem desenvolvidas.

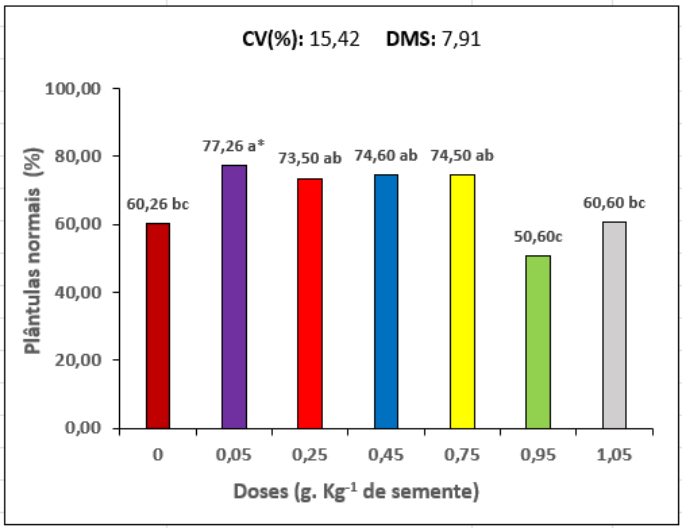
Após o teste de germinação, realizou-se a análise de crescimento de plântulas. Nas plântulas normais de cada tratamento e repetição, foram medidas a raiz e a parte aérea com auxílio de uma régua graduada em centímetros, sendo os resultados expressos em cm $plântula^{-1}$ (Krzyzanowski *et al*., 1999).

As médias foram submetidas à análise de variância através do programa computacional SISVAR e posteriormente submetidas ao teste de Tukey, a nível de 5% de significância (Ferreira, 2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados revelou que o tratamento com diferentes doses de vanádio promoveu variações significativas no percentual de plântulas normais de milho (Figura 1). A dose de 0,05 g. kg^{-1} foi a que apresentou maior desempenho (77,26%), sendo estatisticamente superior à testemunha (60,26%) e à dose de 0,95 g.kg^{-1} (50,60%). As demais doses (0,25 a 1,05 g. kg^{-1}) não diferiram estatisticamente da testemunha, apresentando desempenho intermediário. A maior dose avaliada (1,05 g. kg^{-1}) também resultou em valor inferior, sugerindo um possível efeito tóxico em concentrações elevadas.

Figura 1: Porcentagens de plântulas normais em sementes de milho tratadas com vanádio



*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

O efeito positivo observado na dose de 0,05 g. kg^{-1} indica que o vanádio pode atuar como estimulante fisiológico em baixas concentrações, favorecendo o desempenho germinativo. Esse comportamento é compatível com a ação hormética descrita por Calabrese e Baldwin (2003), segundo a qual baixos níveis de estresse químico podem induzir respostas positivas no metabolismo vegetal.

O vanádio, embora não seja considerado essencial para plantas, pode influenciar o metabolismo enzimático e redox, favorecendo a atividade antioxidante e o crescimento inicial das plântulas (Wang *et al*., 2025). Em milho, resultados similares foram observados por Ávila *et al*. (2006), que relataram melhora na emergência e vigor com a aplicação de micronutrientes em doses adequadas, sendo que o excesso pode comprometer o desempenho fisiológico das sementes.

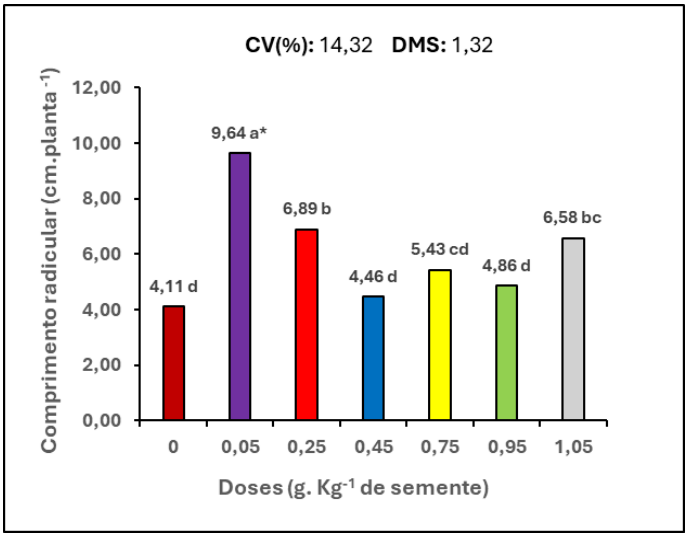
A redução da qualidade fisiológica nas doses mais altas, especialmente 0,95 g. kg^{-1}, pode estar relacionada ao efeito tóxico do vanádio em excesso, levando à inibição de enzimas-chave, estresse oxidativo e comprometimento das membranas celulares (Hansch; Mendel, 2009). Isso reforça a importância da definição de doses seguras e eficazes para o uso desse elemento em tecnologias de tratamento de sementes.

Em relação ao comprimento radicular, o vanádio afetou de modo significativo o comprimento radicular de plântulas de milho (Figura 2). A dose de 0,05 g. kg^{-1} de semente promoveu o maior alongamento radicular (9,64 cm), sendo estatisticamente superior ao controle (4,11 cm) e a todas as demais doses (CV = 14,32%; DMS = 1,32). Em contraste, concentrações ≥ 0,45 g.·kg^{-1} resultaram em comprimentos intermediários a baixos (4,46-6,58 cm), sugerindo uma resposta hormética não linear.

A resposta ótima observada na dose de 0,05 g.·kg^{-1} indica que baixas concentrações de vanádio podem atuar como sinalizadores redox e moduladores de vias hormonais, especialmente as de giberelinas, promovendo a divisão e o alongamento celular na região de crescimento radicular. Estudos recentes demonstram que a regulação de proteínas "della" por giberelinas, associada à sinalização redox, é crucial

para a extensibilidade da parede celular e o alongamento de tecidos jovens (Waadt *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2020).

Figura 2: Comprimento radicular (cm. planta^{-1}) em sementes de milho tratadas com vanádio.

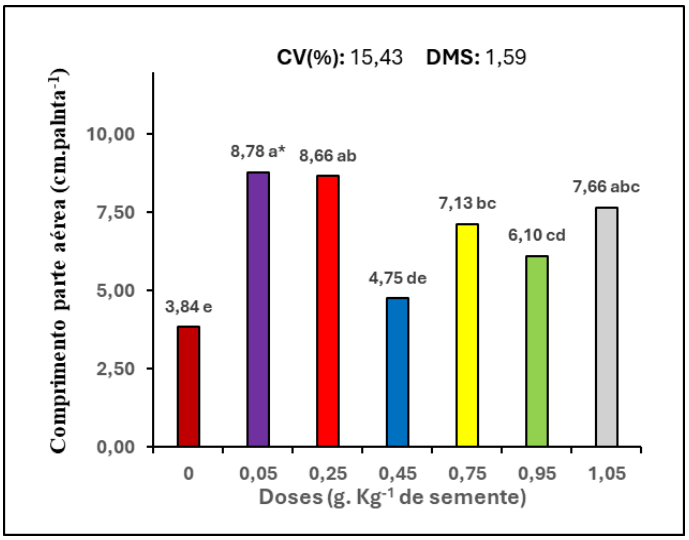


*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

A aplicação de vanádio teve impacto significativo no comprimento da parte aérea das plântulas de milho (Figura 3). A dose de 0,05 g·kg^{-1} promoveu o maior crescimento, alcançando 8,78 cm, valor estatisticamente superior ao controle (3,84 cm). A dose de 0,25 g.·kg^{-1} (8,66 cm) apresentou desempenho semelhante, sem diferença estatística. Doses intermediárias (0,45–0,75 g.·kg^{-1}) e mais elevadas (0,95; 1,05 g.·kg^{-1}) resultaram em crescimentos moderados (4,75 a 7,66 cm).

A máxima resposta observada com 0,05 g.·kg^{-1} sugere que baixas concentrações de vanádio podem atuar como bioestimulante, ativando processos fisiológicos relacionados ao alongamento celular e crescimento, possivelmente via modulação de sistemas redox e vias hormonais como as de giberelinas (Waadt *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2020).

Figura 3: Comprimento da parte aérea (cm. planta^{-1}) (C) em sementes de milho tratadas com vanádio.

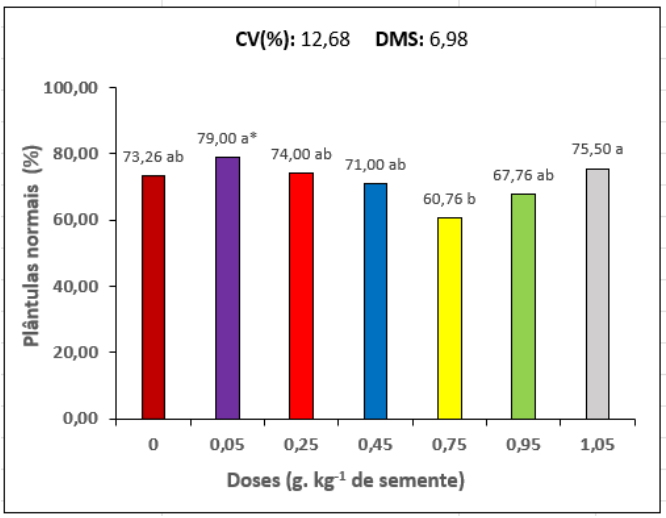


*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

A aplicação de diferentes doses de vanádio no tratamento de sementes de soja influenciou significativamente a porcentagem de plântulas normais (Figura 4). Os dados indicam uma resposta não linear à aplicação do micronutriente, com variação estatística significativa entre os tratamentos.

A dose de 0,05 g kg^{-1} de semente proporcionou a maior porcentagem de plântulas normais diferindo estatisticamente da dose de 0,75 g. kg^{-1}, que resultou no menor valor observado. A maior dose de 1,05 g. kg^{-1} foi estatisticamente igual à dose de 0,05 g. kg^{-1}. As demais doses apresentaram valores intermediários, variando estatisticamente similares à dose mais eficiente.

Figura 4: Porcentagens de plântulas normais em sementes de soja tratadas com vanádio.

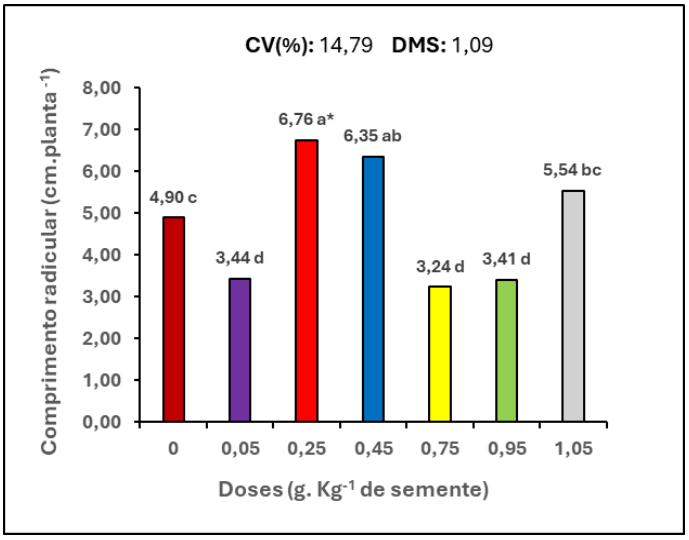


*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Na dose mais elevada de 1,05 g. kg^{-1}, houve uma tendência de recuperação dos valores, com formação de plântulas normais em níveis semelhantes à dose ótima. Esse comportamento pode indicar a ativação de mecanismos de defesa antioxidante mais eficazes nas sementes de soja expostas a concentrações mais altas, conforme também relatado por Taiz *et al*. (2017), que discutem a capacidade adaptativa de algumas espécies em contextos de estresse moderado. O micronutriente, embora não seja considerado essencial para plantas superiores, tem demonstrado efeitos bioestimulantes em concentrações traço, especialmente em leguminosas como a soja, nas quais pode atuar favorecendo processos metabólicos e bioquímicos relacionados à germinação (Silva *et al.*, 2008). Em doses reduzidas, como observado no presente estudo, o vanádio pode estimular a atividade de enzimas antioxidantes como a superóxido dismutase e a catalase, além de favorecer a mobilização de reservas nos tecidos de armazenamento, resultando em maior porcentagem de plântulas vigorosas (Gan; Chen.; Yang, 2020).

Em relação à aplicação de diferentes doses de vanádio no tratamento de sementes de soja, resultou em variações significativas no comprimento radicular das plântulas (Figura 5).

Figura 5: Comprimento radicular (cm. planta^{-1}) em sementes de soja tratadas com vanádio.



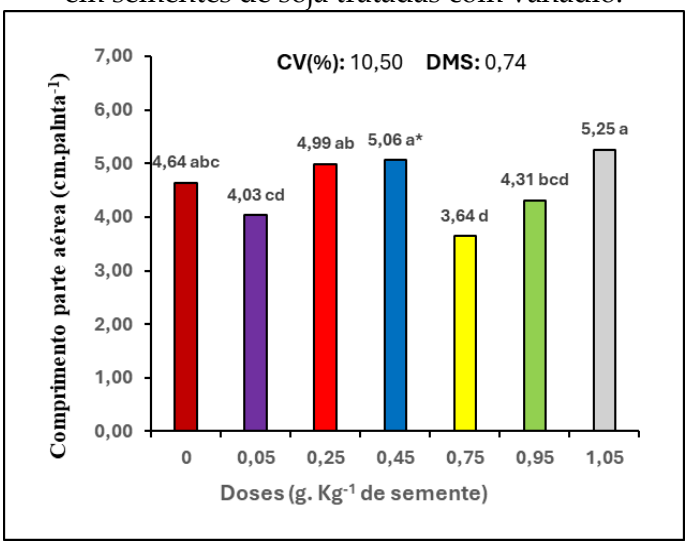
*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

A dose de 0,25 g. kg^{-1} de sementes apresentou o maior comprimento radicular diferindo estatisticamente da testemunha e da maioria das demais doses testadas. Esses dados indicam que há um efeito dose dependente do vanádio no crescimento radicular, sendo que concentrações intermediárias favorecem a elongação das raízes, enquanto doses muito baixas ou excessivas inibem esse crescimento. Tal comportamento está em consonância com estudos que apontam o vanádio como um elemento com efeitos bifásicos em plantas, podendo atuar como bioestimulante ou agente fitotóxico, dependendo da concentração (Kabata-Pendias, 2011). O estímulo ao crescimento radicular em doses moderadas pode estar relacionado ao aumento na atividade de

enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT), bem como à melhoria na absorção de nutrientes essenciais, conforme relatado por Altaf *et al*. (2022) em mudas de pimenta. Além disso, o vanádio pode modular processos hormonais, principalmente relacionados ao metabolismo de auxinas, hormônios diretamente envolvidos na diferenciação e alongamento celular (Taiz *et al*., 2017).

Nas diferentes doses de vanádio no tratamento de sementes de soja em relação ao comprimento da parte aérea das plântulas, houve variações significativas, como consta na Figura 6. Observa-se que as doses de 1,05 e 0,45 g. kg^{-1} respectivamente proporcionaram os maiores comprimentos, não diferindo estatisticamente entre si. Ambas também se mostraram superiores à testemunha e às doses que apresentaram as menores médias.

Figura 6: Comprimento da parte aérea (cm. $planta^{-1}$) (C) em sementes de soja tratadas com vanádio.



*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Esses resultados reforçam o efeito estimulante do vanádio em doses específicas, especialmente nas fases iniciais de desenvolvimento das plântulas. A atuação do vanádio pode estar relacionada ao seu papel na regulação de enzimas antioxidantes e no metabolismo celular, contribuindo para o alongamento celular e diferenciação tecidual (Altaf *et al*., 2022).

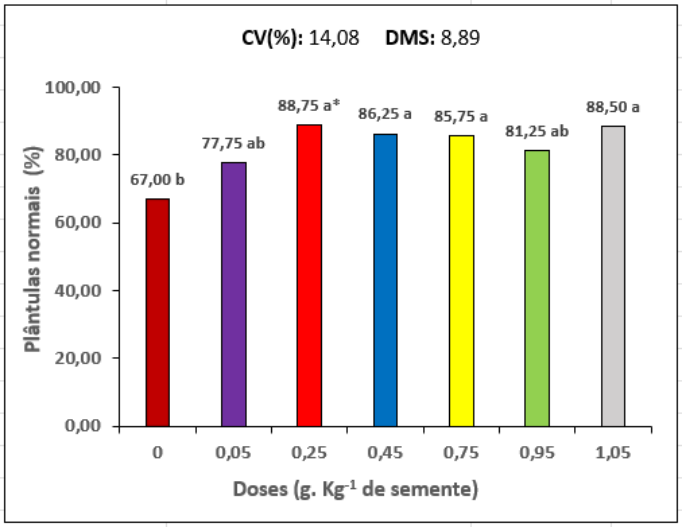
A parte aérea é uma estrutura fundamental para a emergência da plântula, e seu alongamento eficiente está diretamente ligado à capacidade de superar a resistência do solo e de estabelecer a planta no campo (Taiz *et al*., 2017). Doses moderadas de vanádio parecem modular positivamente os níveis de auxinas e citocininas, hormônios essenciais para a expansão celular, o que pode justificar o maior desenvolvimento do hipocótilo observado nas doses de 0,45 e 1,05 g (Kabata-Pendias, 2011).

Ao analisar as sementes de trigo tratadas com o micronutriente vanádio observou-se que a aplicação do vanádio influenciou significativamente a qualidade fisiológica das sementes na formação de plântulas normais (Figura 7). Observou-se que

a dose de 0,25 e 1,05 g. kg^{-1}, que proporcionaram os maiores percentuais de plântulas normais (88,75% e 88,50%), foi estatisticamente superiores à testemunha (67,00%).

Em contrapartida estudos desenvolvidos por Altaf *et al*. (2025) revelaram que o estresse por vanádio suprimiu significativamente o crescimento das mudas de arroz, evidenciado por reduções no peso fresco da parte aérea, conteúdo de pigmento de clorofila, assimilação fotossintética e atributos da raiz. Estudos com outros micronutrientes aplicados via tratamento de sementes indicam efeitos similares ao vanádio, como o molibdênio e o selênio, que também atuam como cofatores enzimáticos e melhoram o metabolismo das sementes em sua fase inicial (Malavolta, 2006; Gupta; Gupta, 2014).

Figura 7: Porcentagens de plântulas normais em sementes de trigo tratadas com vanádio.

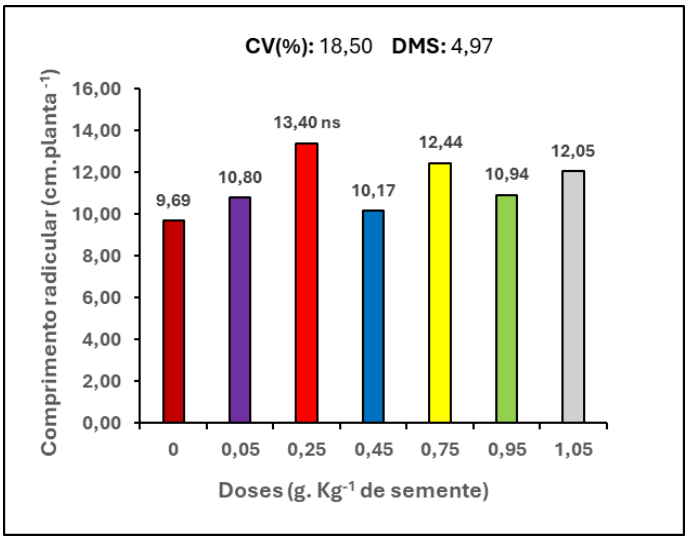


*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Além disso, a atuação do vanádio pode estar relacionada à regulação de vias metabólicas secundárias e à atenuação de estresses abióticos, como demonstrado por Wang *et al*. (2025), o que pode justificar a resposta consistente em doses entre 0,25 e 1,05 g.

A análise do comprimento radicular de plântulas de trigo tratadas com diferentes doses de vanádio revelou variações entre os tratamentos, embora sem diferença estatística significativa (Figura 8). A maior média foi observada na dose de 0,25 g. 100 kg^{-1} de sementes, com 13,40 cm, enquanto a testemunha apresentou 9,69 cm, sugerindo um possível estímulo morfofisiológico, mesmo em ausência de significância estatística.

Figura 8: Comprimento radicular (cm. planta^{-1}) em sementes de trigo tratadas com vanádio.



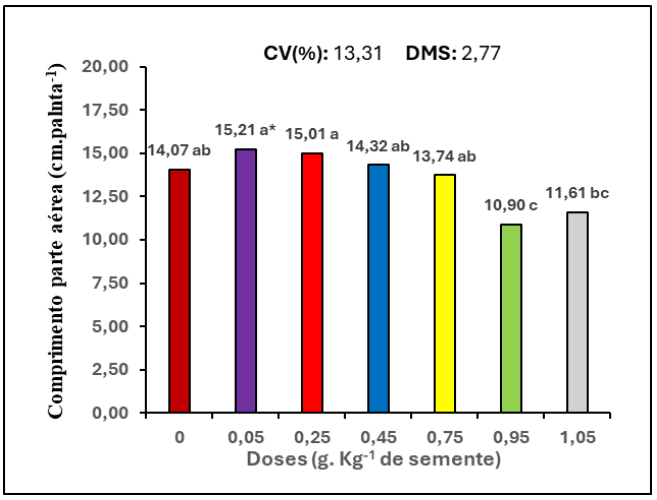
*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

O aumento do comprimento radicular em doses como 0,25 g pode indicar que o vanádio, mesmo em pequenas quantidades, pode atuar na ativação de mecanismos fisiológicos associados ao crescimento radicular, como a indução da síntese de auxinas ou a regulação da atividade de peroxidases, enzimas diretamente envolvidas na elongação celular (Taiz *et al*., 2017).

Segundo Kranner *et al.* (2010), é relevante destacar que o comprimento radicular está diretamente relacionado à capacidade de absorção hídrica e nutricional, sendo um indicador importante de vigor e potencial de estabelecimento em campo.

A variável comprimento da parte aérea demonstrou respostas diferenciadas às doses de vanádio aplicadas no tratamento de sementes de trigo (Figura 9). Observou-se que a dose de 0,05 g. kg^{-1} de sementes apresentou maior média estatística (15,21 cm), significativamente superior à dose de 0,95 g (10,90 cm).

Figura 9: Comprimento da parte aérea (cm. planta^{-1}) (C) em sementes de trigo tratadas com vanádio.



*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

A testemunha apresentou 14,07cm, enquanto as doses de 0,25 e 0,45 g mantiveram médias estatisticamente similares às das mais altas, indicando que o vanádio, em doses reduzidas, favorece o desenvolvimento do eixo aéreo inicial da plântula. García-Jiménez *et al*. (2018) observaram em plantas de pimenta um possível efeito estimulante do vanádio sobre o alongamento celular no epicótilo, possivelmente relacionado à sua interação com vias metabólicas de crescimento, como a síntese de giberelinas e o metabolismo redox celular, bioquímicos de elongação, influenciando diretamente no comprimento de órgãos jovens em plantas.

4 CONCLUSÃO

A aplicação do micronutriente vanádio influenciou positivamente a qualidade fisiológica das sementes. Em milho, a dose de 0,05 g.·kg^{-1} resultou na maior porcentagem de plântulas normais (77,26%), no maior comprimento radicular (9,64 cm) e na maior parte aérea (8,78 cm). Na soja, observou-se que as maiores plântulas normais foram na dose de 0,05 g.·kg^{-1} e maior comprimento radicular com 0,25 g.·kg^{-1}. Para o trigo, as doses de 0,25 e 1,05 g.·kg^{-1} proporcionaram os maiores índices de plântulas normais (88,75% e 88,50%, respectivamente), enquanto a dose de 0,05 g.·kg^{-1} favoreceu o crescimento da parte aérea (15,21 cm). Concluiu-se que o vanádio apresenta potencial como bioestimulante no tratamento de sementes, sendo as doses entre 0,05 e 0,25 g.·kg^{-1} as mais eficazes para a promoção do vigor inicial em milho, soja e trigo.

REFERÊNCIAS

ALTAF, M. M.; ASHRAF, S.; KHAN, M. Q.N.; SUN, X.; LI, D.; EL-SHEIKH, M. A.; XU, S.; ZHU, Z. Effectiveness of sulfur-modified wheat straw biochar in alleviating vanadium stress in rice: impacts on growth, photosynthesis, and redox regulation. **Biochar**, v. 7, n. 1, p. 71, 2025.

ALTAF, M. A.; SHU, H.; HAO, Y.; ZHOU, Y.; MUMTAZ, M. A.; WANG, Z. Vanadium Toxicity Induced Changes in Growth, Antioxidant Profiling, and Vanadium Uptake in Pepper (Capsicum annuum L.) Seedlings. **Horticulturae**, 8(1), 28. 2022. https://doi.org/10.3390/horticulturae8010028.

ÁVILA, M. R.; SILVA, M. L.; SILVA, E. F.; et al. Qualidade fisiológica e produtividade das sementes de milho tratadas com micronutrientes e cultivadas no período de safrinha. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 28, n. 4, p. 427–432, 2006. DOI: 10.4025/actasciagron.v28i4.927.

BAYS, R. *et al*. Recobrimento de sementes de soja com micronutrientes, fungicida e polímero. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 29, n. 2, p. 60-67, ago. 2007. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0101-31222007000200009.

BORK, C. R. *et al*. Soybean Industrial Seed Treatment: effect on physiological quality during storage. **Journal Of Agricultural Science**, v. 10, n. 8, p. 468, 10 jul. 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5539/jas.v10n8p468.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2009. 395p.

CALABRESE, E. J.; BALDWIN, L. A. Hormesis: the dose-response revolution. **Annual Review of Pharmacology and Toxicology**, v. 43, n. 1, p. 175-197, abr. 2003. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1146/annurev.pharmtox.43.100901.140223.

CATALINA, L. Vanadio y la Reduccion de Nitratos en las Plantas. II. Influencia del vanadio en presencia de molibdeno sobre el contenido de aminoácidos libres. A**nales de Edafologia y Agrobiologia**, v. 25, n. 11-12, p. 717-722, 1966.

CONAB - Companhia Nacional do Abastecimento. **Perspectivas para a safra 2024/25**, v. 12, Brasília, 2024.

CHEN, L. *et al*. IPyA glucosylation mediates light and temperature signaling to regulate auxin-dependent hypocotyl elongation in Arabidopsis. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 117, n. 12, p. 6910-6917, 9 mar. 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1073/pnas.2000172117.

CHONGKID, B; VACHIRAPATTAMA, N; JIRAKIATTIKUL, Y. Effects of Vanadium on Rice Growth and Vanadium Accumulation in Rice Tissues. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)**, v. 41, p. 28-33, 2007.

EMBRAPA. **Produção de trigo no Brasil**: safra 2024/2025. 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um sistema de análise computacional. Para efeitos fixos do tipo Split Plot. **Revista brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, dez. 2019. Disponível em: http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/450.

GALINDO, F. S. *et al*. Modos de aplicação de cobalto, molibdênio e Azospirillum brasilense na produtividade e lucratividade da soja profitability. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 3, p. 180-185, mar. 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n3p180-185.

GAN, C.; CHEN, T.; YANG, J. Remediation of vanadium contaminated soil by alfalfa (Medicago sativa L.) combined with vanadium-resistant bacterial strain. **Environmental Technology & Innovation**, v. 20, p. 101090, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101090.

GARCÍA-JIMÉNEZ, Atonaltzin *et al*. Vanadium stimulates pepper plant growth and flowering, increases concentrations of amino acids, sugars and chlorophylls, and modifies nutrient concentrations. **Plos One**, v. 13, n. 8, p. 0201908, 9 ago. 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0201908.

GUPTA, U. C.; GUPTA, S. C. Sources and Deficiency Diseases of Mineral Nutrients in Human Health and Nutrition: a review. **Pedosphere**, v. 24, n. 1, p. 13-38, fev. 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/s1002-0160(13)60077-6.

HÄNSCH, R.; MENDEL, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). **Current Opinion In Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 259-266, jun. 2009. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama da Produção de Grãos no Brasil**. 2025. Disponível em: https://www.ibge.gov.br.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 548 p. Disponível em: https://doi.org/10.1201/b10158

KUMARI, S. *et al*. Zinc-functionalized thymol nanoemulsion for promoting soybean yield. **Plant Physiology And Biochemistry**, v. 145, p. 64-74, dez. 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.10.022.

KRANNER, I. *et al.* What is stress? Concepts, definitions and applications in seed science. **New Phytologist**, v. 188, n. 3, p. 655-673, set. 2010. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03461.x.

KRZYZANOWSKI, F. C. *et al*. **Vigor de sementes**: conceitos e testes. Londrina, ABRATES, 1999.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

O'HARA, G. W. Nutritional constraints on root nodule bacteria affecting symbiotic nitrogen fixation: a review. **Australian Journal Of Experimental Agriculture**, v. 41, n. 3, p. 417, 2001. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1071/ea00087.

RONQUIM, Carlos Cesar. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. 2. ed. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. 34 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, ISSN 1806-3322, n. 35).

SINGH, B. B. Effect of vanadium on the growth, yield and Chemical composition of maize (*Zea mays L.*), **Plant and Soil**, vol. 34, n. 1, p. 209-213, 1971. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/BF01372773.

SINGH, B., WORT, D. J. Effect of vanadium on growth, chemical composition, and metabolic processes of mature sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants. **Plant Physiology**, *44*(9), 1321-1327, 1969. Disponível em: https://doi.org/10.1104/pp.44.9.1321.

SILVA, T. T. A.; VON PINHO, É. V. R.; CARDOSO, D. L.; FERREIRA, C. A.; ALVIM, P. O.; COSTA, A. A. F. Qualidade fisiológica de sementes de milho na presença de bioestimulantes. Physiological quality of corn seeds in the presence of biostimulants. **Ciência e Agrotecnologia**, 32(3), 840-846, 2008. https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000300021

SOARES, L. H., L. H. *et al*. Soybean seed treatment with micronutrients, hormones and amino acids on physiological characteristics of plants. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 35, p. 3314-3319, 1 set. 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5897/ajar2016.11229.

TAIZ, L. *et al*. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TAYLOR, A. G; HARMAN, G. E. Concepts and Technologies of Selected Seed Treatments. **Annual Review of Phytopathology**, v. 28, n. 1, p. 321-339, set. 1990. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1146/annurev.py.28.090190.001541.

WAADT, R. *et al*. Plant hormone regulation of abiotic stress responses. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, v. 23, n. 10, p. 680-694, maio 2022. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1038/s41580-022-00479-6.

WANG, Zhe; TANG, Chengjing; YAO, Debao; LIU, Yanlan; MI, Xue; LI, Yanhua; ZHAO, Yongping. **Zinc nanoparticles alleviate vanadium stress in wheat (Triticum aestivum L.)**: impacts on vanadium accumulation, nitrogen assimilation, and amino acid profile. SSRN, 13 jun. 2025. DOI: https://doi.org/10.2139/ssrn.5291412.

WIATRAK, P. P. Effect of Polymer sees coating with micronutrientes on soybeans in Southeastern Coastal Plains. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v. 8, n. 4, p. 302-308, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3844/ajabssp.2013.302.308.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 127-133, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Uso de nematicidas em mudas de café no controle do nematoide *meloidogyne exigua*

Use of nematicides in coffee seedlings for the control of nematode Meloidogyne exigua

AFONSO DE ANDRADE OLIVEIRA
Discente de Agronomia (UNIPAM)
eaafonsoaoliveira@unipam.edu.br

CARLOS HENRIQUE EITERER DE SOUZA
Professor orientador (UNIPAM)
carloshenrique@unipam.edu.br

Resumo: O Brasil é o maior produtor mundial de café, cuja produção é ameaçada por nematoides, agentes capazes de causar perdas econômicas significativas. Nesse contexto, torna-se necessária a utilização de produtos eficientes no controle desses patógenos. Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de diferentes produtos no controle do nematoide *Meloidogyne exigua* em mudas de café. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento em blocos casualizados (DBC), com sete tratamentos compostos por diferentes produtos e seis repetições. Foram inoculados 8.000 juvenis de segundo estádio (J2) em mudas de café e, aos 90 dias após a inoculação (DAI), avaliou-se o número de ovos e juvenis (J2), além do fator de reprodução. Os resultados demonstraram que o produto A (fluensulfona) apresentou a maior eficiência, reduzindo significativamente o número de ovos e juvenis, bem como o fator de reprodução. Esses achados indicam que o uso da fluensulfona, na dose aplicada neste estudo, é eficaz no controle populacional de *Meloidogyne exigua* em mudas de café.
Palavras-chave: *Meloidogyne exigua*; juvenis; nematicidas; *Coffea arabica.*

Abstract: Brazil is the world's largest coffee producer, and its production is threatened by nematodes, agents capable of causing significant economic losses. In this context, the use of effective products for controlling these pathogens becomes necessary. This study aimed to evaluate the efficacy of different products in controlling the nematode Meloidogyne exigua in coffee seedlings. The experiment was conducted in a greenhouse under a randomized block design (RBD), with seven treatments consisting of different products and six replications. A total of 8,000 second-stage juveniles (J2) were inoculated into coffee seedlings, and at 90 days after inoculation (DAI), the number of eggs and juveniles (J2), as well as the reproduction factor, were evaluated. The results showed that Product A (fluensulfone) had the highest efficacy, significantly reducing the number of eggs and juveniles, as well as the reproduction factor. These findings indicate that the use of fluensulfone, at the dose applied in this study, is effective in controlling Meloidogyne exigua populations in coffee seedlings.
Keywords: *Meloidogyne exigua*; juveniles; nematicides; *Coffea arabica.*

---

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café e o segundo maior consumidor da bebida (MAPA, 2017). Com 96% da área do café já colhida no final de agosto, a safra de 2024 do grão está estimada em 54,79 milhões de sacas de café beneficiadas, com área total de 2,25 milhões de hectares destinada à cafeicultura no país em 2024, incluindo as espécies arábica (*Coffea arabica* L.) e conilon (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner), as mais produzidas no país (CONAB, 2024).

O setor cafeeiro desempenha um papel crucial na geração de empregos, especialmente em áreas rurais, e tem grande impacto na balança comercial brasileira. Além disso, o café brasileiro é significativamente valorizado no mercado internacional, devido a excelente qualidade e variedade de sabores (MAPA, 2017; Reis; Cunha, 2010).

O café cru é comercializado com base em sua qualidade, que é determinada por critérios como o tamanho das sementes, cor, forma, método de processamento, safra, qualidade da bebida, e a presença de sementes defeituosas e de materiais estranhos, sendo esses dois últimos os principais critérios usados para negociações globais de café (Bee *et al*., 2005). Além disso, todos os fatores que influenciam na qualidade do grão estão relacionados a fatores abióticos, como deficiências nutricionais e condições climáticas, e a fatores bióticos, como ataques de pragas e doenças, que podem reduzir significativamente a produtividade e qualidade dos grãos (Pozza; Carvalho; Chalfoun, 2010).

Dentre os fatores bióticos de grande importância econômica para a cultura do cafeeiro, destacam-se os nematoides do gênero *Meloidogyne* ssp., conhecidos como nematoides-das-galhas. A espécie *Meloidogyne exigua*, apesar de ser menos agressiva em plantas adultas e bem nutridas, provoca perdas devido à sua ampla disseminação, estando presente nas principais regiões produtoras de café arábica. Esta espécie provoca galhas no sistema radicular do cafeeiro, reduzindo a capacidade de absorção de água e nutrientes pela planta, o que pode prejudicar o seu desenvolvimento, resultando em reduções significativas na produtividade (Oliveira; Rosa, 2018).

Além do controle preventivo e o uso de cultivares resistentes, os controles químico e biológico também são utilizados como uma forma de refrear a disseminação de populações de nematoides em lavouras de café. Em relação ao controle químico, existem diversos ingredientes ativos utilizados no controle de *Meloidogyne exigua*, podendo-se citar a Fluensulfona, que é sistêmico com ação de contato, apresentando como modo de ação a inibição da reprodução dos fitonematoides (ADAMA, 2024).

Quanto ao controle biológico, produtos que possuem bactérias do gênero *Bacillus*, e fungos da espécie *Paecilomyces lilacinus* e gênero *Trichoderma* têm se destacado na agricultura como agentes promotores de biocontrole, sendo utilizados como bionematicidas, por meio de antagonismo. Para o gênero *Bacillus*, o antagonismo direto sobre patógenos acontece por meio de antibiose, síntese de compostos voláteis e substâncias tóxicas, resultantes da competição por espaço e nutrientes, das quais interferem no ciclo de reprodução dos nematoides, principalmente na ovulação e eclosão de juvenis (Ryu *et al*., 2004; Sharma *et al*., 2011). *Paecilomyces lilacinus* infecta ovos e fêmeas de nematoides por meio de mecanismos de parasitismo, reduzindo a eclosão dos ovos e causando a morte dos embriões, além da antibiose, produzindo toxinas que

interferem no sistema nervoso dos nematoides e provocam deformações no estilete (Munawar *et al*., 2015). Já o mecanismo de controle do gênero *Trichoderma* ocorre através do parasitismo direto de ovos e larvas, e pela indução dos mecanismos de defesa da planta (Mukhtar; Tariq-Khan; Aslam, 2021).

Dito isso, testes de eficiência com diferentes produtos, que possuem ingredientes ativos e modos de ação diversos, se fazem necessários para comparar a eficácia no controle de nematoides, demonstrando, dessa forma, sua capacidade de controle populacional. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência de diferentes produtos no controle do nematoide *Meloidogyne exigua* em mudas de café (*Coffea arábica* L.).

2 METODOLOGIA

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na empresa NOOA Ciência e Tecnologia Agrícola, situada na Rodovia BR 365, SN; km 428 à direita, mais 3 km – Zona Rural, no município de Patos de Minas – MG, sendo implantado em abril de 2023. Foram utilizados diferentes produtos em dose comercial. Utilizou-se mudas da cultivar Oeiras, adquiridas em viveiro certificado, as quais apresentavam de três a quatro pares de folhas.

O solo e a areia utilizados no experimento foram autoclavados em temperatura elevada, de modo à esteriliza-los, eliminando organismos vivos que pudessem interferir no trabalho. Em seguida, procedeu-se com o manejo correto de adubação para a cultura do cafeeiro neste estádio fenológico.

As mudas de café foram transplantadas para vasos plásticos de oito litros, e foram inoculados 8.000 juvenis de segundo estádio - J2 (fase infectiva do nematoide) de *Meloidogyne exigua*, de maneira uniforme em cada vaso. Os inóculos utilizados no trabalho foram fornecidos pela empresa NOOA, dos quais são cultivados em casa de vegetação. Em seguida, foram aplicadas em pulverização via solo, no modelo drench, as doses pré-estabelecidas dos produtos de acordo com cada tratamento.

Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados (DBC), sendo 7 tratamentos e 6 repetições, totalizando 42 parcelas experimentais, das quais cada vaso representou uma parcela experimental. Os tratamentos foram constituídos pelos seguintes produtos e doses: Produto A (1500 mL. ha^{-1}); Produto B (200 g. ha^{-1}); Produto C (500 g. ha^{-1}); Produto D (300 mL. ha^{-1}) + Produto E (500 mL. ha^{-1}) + Produto F (500 mL. ha^{-1}); Produto G (400 mL. ha^{-1}) e Produto G (800 mL. ha^{-1}), além de tratamento controle sem aplicação de produtos. A descrição dos tratamentos consta na Tabela 1, assim como os ingredientes ativos, as doses e as formulações dos produtos utilizados.

Tabela 1: Descrição dos tratamentos (UNIPAM, Patos de Minas - MG, 2023).

Tratamentos	Ingrediente ativo	Dose (g ou mL. ha^{-1})	Formulação
Controle	-	-	-
Produto A	Fluensulfona	1500	EC
Produto B	*Bacillus subtilis* linhagem FMCH002 (DSM32155) e *Bacillus licheniformis* linhagem FMCH001	2001	WS
Produto C	*Bacillus subtilis*, cepa ATCC 6051; *Bacillus licheniformis*, cepa ATCC 12713 e *Paecilomyces lilacinus* (*Purpureocilium lilacinum*), cepa CPQBA 040-11 DRM 10	5001	WP
Produto D, Produto E e Produto F	*Trichoderma asperellum* isolado URM 5911 / *Bacillus methylotrophicus* isolado UFPEDA20 / *Bacillus subtilis* UFPEDA 764	300, 500 e 500	WG, SC e SC
Produto G	*Bacillus amyloliquefaciens* cepa CN-307	400	SC
Produto G	*Bacillus amyloliquefaciens* cepa CN-307	800	SC

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

*g ou mL ha^{-1}: gramas ou mililitros de produto comercial aplicados por hectare; EC: Concentrado Emulsionável; WS: Pó para Preparação de Pasta em Água; WP: Pó Molhável; WG: Granulado Dispersível; SC: Suspensão Concentrada. [1]dose em g.ha^{-1}.

Noventa dias após a inoculação (90 DAI) de *Meloidogyne exigua*, foi realizada a avaliação populacional de nematoides nas raízes das mudas, levando em consideração que no solo utilizado não havia nenhum nematoide antes de ser inoculado. Para isso, as mudas foram retiradas dos vasos para que as raízes fossem separadas das plantas e coletadas. Posteriormente, foram levadas para o laboratório de extração, onde foram extraídos os nematoides, de acordo com a metodologia de Jenkins (1964) e Coolen e D'Herde (1972). Em seguida, os nematoides extraídos das raízes foram analisados em microscópio, realizando-se a contagem de ovos e de juvenis de segundo estádio (J2), além da determinação do fator de reprodução (FR), definido através da divisão da população inicial pela população final de nematoides, sendo que, quanto mais próximo de 0, mais eficiente é o controle populacional.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e os tratamentos foram comparados pelo teste de Fisher (LSD) a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$) por meio do software Sisvar® (Ferreira, 2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Tabela 2, pode-se observar que somente o tratamento em que foi realizada a aplicação de Nimitz® diferiu estatisticamente do tratamento controle, em todas as variáveis analisadas. A aplicação de Nimitz® promoveu a redução da quantidade de ovos e de juvenis (J2) por grama de raiz, o que, consequentemente, reduziu o fator de reprodução dos nematoides. O fator de reprodução é utilizado para quantificar o número de vezes que uma população de nematoides aumentou. Quanto

menor for esse fator, menor é a reprodução do patógeno. Dito isso, o produto Nimitz® na dose aplicada (1500 mL.ha^{-1}), demonstrou ser mais eficaz no controle populacional de *Meloidogyne exigua* no cafeeiro.

O mesmo foi observado por Fernandes *et al.* (2019), em que a utilização do produto Nimitz® na mesma dose usada neste estudo, aplicado via gotejamento, reduziu a população de juvenis de segundo estádio (J2) nas raízes, além do número de ovos. Corte, Farias e Benetti (2015) também demonstraram a eficácia da fluensulfona no manejo de *Meloidogyne exigua* na cultura do café em condições de campo, embora a dose utilizada por esses autores tenha sido menor.

Os demais produtos aplicados, dos quais todos são microbiológicos, não diferiram estatisticamente do tratamento controle, o que demonstra que nas condições em que foram realizadas este experimento, esses produtos não foram eficazes no controle de *Meloidogyne exigua* no cafeeiro.

Tabela 2: Efeito de diferentes produtos sobre o número de ovos, número de juvenis (J2) e fator de reprodução (FR) de *Meloidogyne exigua* em mudas de cafeeiro (cv. Oeiras), aos 90 dias após a aplicação dos tratamentos (UNIPAM, Patos de Minas - MG, 2023).

Tratamentos	Dose (g ou mL.ha^{-1})	nº por g de raiz			FR
		Ovos/g	J2/g	Total/g	
Controle	-	761 bc	178 b	939 bc	2,1 bc
Produto A	1.500	39 a	64 a	104 a	0,1 a
Produto B	200[1]	686 bc	160 b	846 bc	2,6 bc
Produto C	500[1]	693 bc	155 b	902 bc	2,3 bc
Produto D, Produto E e Produto F	300, 500 e 500	865 c	152 b	1.017 c	3,1 c
Produto G	400	506 b	142 ab	648 b	1,6 b
Produto G	800	768 bc	197 b	965 bc	2,5 bc

Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Fisher (LSD) ($p \leq 0,05$); g ou mL.ha^{-1}: gramas ou mililitros de produto comercial aplicados por hectare. [1]dose em g.ha^{-1}.

Fonte: dados da pesquisa, 2023.

4 CONCLUSÃO

Diante do exposto, conclui-se que o uso do produto A (fluensulfona) na dose de 1500 mL.ha^{-1} foi mais eficiente no controle de *Meloidogyne exigua* em mudas de cafeeiro (cv. Oeiras), quando comparado com os demais produtos, uma vez que proporcionou maior controle populacional do nematoide.

REFERÊNCIAS

ADAMA. **Nimitz®** - Informações técnicas. 2024. Disponível em: https://www.adama.com/brasil/pt/protecao-de-cultivos/nematicidas/nimitz.

BEE, S. *et al*. The raw bean. **Espresso Coffee**, p. 87-178, 2005. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/b978-012370371-2/50004-4.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café** — Safra 2024. Terceiro levantamento. Brasília, v. 11, n. 3, p. 1-57, setembro de 2024.

COOLEN, W.A.; D'HERDE, C.J. A method for the quantitative extraction of nematodes from plant tissue. **State of Nematology and Entomology Research Station**. Ghent - Belgian, p.77, 1972.

CORTE, G. D., FARIAS, D. S., BENETTI, E. Avaliação do nematicida Fluensulfone 480 EC no controle de *Meloidogyne exigua* em café. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 42., 2016, Serra Negra. **Anais** [...]. Brasília, DF: Embrapa Café, 2016.

FERNANDES, A. L. T.; FERREIRA, R. T.; MOSCA, E.; TAVARES, T. O.; GUIMARÃES, F. S.; LEMOS, L.; ALVES, L.; ALVES, H. Performance do Nimitz aplicado via gotejamento no controle de nematoides no cafeeiro - 3 safras. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 44, 2018, Franca. **Anais [**...] Brasília – DF, Embrapa Café, 2018. p. 3.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**. Fundação Cargill, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

JENKINS, W.R. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. **Plant Disease Reporter**. St. Paul, v. 48, n. 9, p. 692, 1964.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Café no Brasil**. 2017. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/cafe/cafeicultura-brasileira.

MUKHTAR, T.; TARIQ-KHAN, M.; ASLAM, M. N. Bioefficacy of Trichoderma Species Against Javanese Root-Knot Nematode, *Meloidogyne javanica*, in Green Gram. **Gesunde Pflanzen**, v. 73, n. 3, p. 265-272, 21 jan. 2021. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/s10343-021-00544-8.

MUNAWAR M.; KHAN, S. A.; JAVED, N.; HAQ, I. U.; GONDAL, A. S. Bio-management of tomato wilt complex caused by Meloidogyne incognita and Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici. **Nematology**, v. 17, n. 4, p. 479-485, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1163/15685411-00002882.

OLIVEIRA, C. M. G.; ROSA, J. M. O. Nematoides parasitos do cafeeiro. **Boletim Técnico**, n. 32, 2018. Instituto Biológico. DOI:10.13140/RG.2.2.28642.43205.

POZZA, E. A.; CARVALHO, V. L.; CHALFOUN, S. M. Sintomas de injúrias causadas por doenças em cafeeiro. *In*: GUIMARÃES, R.J.; MENDES, A.N. G.; BALIZA, D. P. (Ed.). **Semiologia do cafeeiro**: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas. Lavras: UFLA, p. 69-101, 2010.

REIS, P. R.; CUNHA, R. L. **Café Arábica do plantio à colheita**. Lavras: EPAMIG Sul de Minas. v. 1, p. 896, 2010.

RYU, C.M.; MURPHY, J.F.; MYSORE, K.S.; KLOEPPER, J.W. Plant growth-promoting rhizobacterial systemically protect *Arabidopsis thaliana* against Cucumber mosaic virus by a salicylic acid and NPR1independent and jasmonic acid-dependent signaling pathway. **Journal The Plant**, v. 39, n. 3, p. 381-392, 2004. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-313x.2004.02142.x.

SHARMA, S.; KAUR, M.; GOYAL, R.; GILL, B.S. Physical characteristics and nutritional composition of some new soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) genotypes. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 3, p. 551-557, 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/s13197-011-0517-7.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 134-155, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Desenvolvimento de placa de aquisição de sinais trifásicos de tensão e corrente para uso nos laboratórios do Unipam

Development of a Three-Phase Voltage and Current Signal Acquisition Board for Use in UNIPAM Laboratories

MURILO MACHADO DE MATOS
Discente de Engenharia Elétrica (UNIPAM)
murilo2machado@gmail.com

VICTOR HENRIQUE DA CUNHA FARIA
Professor orientador (UNIPAM)
victorhcf@unipam.edu.br

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma placa de aquisição de sinais trifásicos de tensão e corrente. Utilizando sensores de efeito Hall de alta precisão, como o LA 100-P e o LV 20-P, o sistema inclui circuitos de condicionamento de sinal que garantem compatibilidade com diversos conversores analógico-digitais, abrangendo aplicações acadêmicas e industriais. Durante a construção, técnicas avançadas de filtragem e amplificação foram empregadas, assegurando a fidelidade dos sinais mesmo em ambientes com altos níveis de ruído. Os resultados práticos demonstraram uma precisão elevada, apresentando uma pequena discrepância, resultado do uso de componentes reais com tolerâncias no valor de especificação. Essa solução permite medições precisas de grandezas elétricas em redes trifásicas, proporcionando uma ferramenta robusta e confiável para alunos e pesquisadores. Além de suprir lacunas técnicas, o sistema amplia o alcance de experimentos laboratoriais, promovendo uma experiência educacional mais prática e aprofundada. A proposta destaca-se pela acessibilidade e eficiência, marcando um avanço significativo no uso de tecnologias acessíveis para o monitoramento e controle de sistemas elétricos.
Palavras-chave: sensor de tensão; sensor de corrente; aquisição de sinais.

Abstract: This work presents the development of a three-phase voltage and current signal acquisition board. Using high-precision Hall effect sensors, such as the LA 100-P and LV 20-P, the system includes signal conditioning circuits that ensure compatibility with various analog-to-digital converters, covering both academic and industrial applications. During construction, advanced filtering and amplification techniques were employed, ensuring signal fidelity even in high-noise environments. Practical results demonstrated high accuracy, with only minor discrepancies due to the use of real components with tolerance variations from their nominal values. This solution enables accurate measurement of electrical quantities in three-phase networks, providing a robust and reliable tool for students and researchers. In addition to addressing technical gaps, the system enhances the scope of laboratory experiments, promoting a more hands-on and in-depth educational experience. The proposal stands out for its accessibility and efficiency, representing a significant advancement in the use of affordable technologies for the monitoring and control of electrical systems.
Keywords: voltage sensor; current sensor; signal acquisition.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento dos parâmetros de tensão e corrente elétrica é de suma importância não apenas para os fornecedores, mas também para os consumidores. A medição precisa da tensão e corrente permite detectar e corrigir rapidamente problemas como sobrecargas, curtos-circuitos e flutuações de tensão, garantindo assim a continuidade do serviço. Nas indústrias, conhecer os valores de tensão e corrente permite controlar processos, detectar falhas e anomalias em equipamentos, verificar a eficiência energética, proteger pessoas e equipamentos.

A medição de tensão e corrente pode ser realizada utilizando-se um sistema de aquisição de dados. Esse sistema constitui um procedimento pelo qual um fenômeno físico do mundo real é convertido em sinais elétricos, que posteriormente são mensurados e convertidos em formato digital, a fim de serem processados, analisados e armazenados por um computador (Esteves, 2015). No sistema elétrico de potência (SEP), a aquisição de dados representa uma etapa crucial, desde o processo de geração de energia, transmissão e supervisão até o controle da rede primária e secundária de distribuição. Os sistemas de aquisição de dados podem ser inseridos em pontos importantes do sistema, como em bancos de capacitores, saída de alimentadores, chaves automáticas, cargas importantes etc. (Mamede Filho, 2017; Jardini, 1999).

Em sistemas elétricos de baixa tensão (BT), as medições de tensão e corrente podem ser conduzidas por meio de um osciloscópio, que viabiliza a observação dos sinais de corrente e tensão. Além disso, é possível empregar uma placa de aquisição de dados, que não apenas facilita a visualização, mas também oferece capacidade de armazenamento de dados e controle de processos. A estrutura fundamental de uma placa de aquisição de dados compreende diversos componentes essenciais. Entre eles, destacam-se os sensores e transdutores, cuja função primordial é converter fenômenos físicos do mundo real em sinais elétricos. Ademais, o condicionamento de sinais desempenha um papel crucial, visando filtrar, amplificar, linearizar e isolar os sinais, de modo que possam ser adequadamente utilizados por um hardware de aquisição de dados, como um conversor analógico-digital (Park; Mackay, 2003).

Em diversas pesquisas no ramo da engenharia elétrica, surge a necessidade de medir sinais de tensão e corrente com fins de monitoramento e controle. Nesse sentido, o emprego de osciloscópios para essa tarefa apresenta limitações, sobretudo quando se busca a integração eficaz desses dispositivos nos projetos. Esse entrave decorre, primordialmente, de suas elevadas cifras de investimento e das volumosas dimensões que caracterizam esses instrumentos. Diante dos problemas relacionados ao osciloscópio, muitos pesquisadores e engenheiros optam por desenvolver suas próprias unidades de aquisição de dados, contudo essa opção apresenta inúmeros desafios, demandando significativa quantidade de tempo que poderia ser destinada ao tema principal da pesquisa. Esses esforços, embora necessários em certos cenários, podem comprometer a eficiência e a agilidade na execução de projetos de engenharia elétrica.

Considerando-se a complexidade de criar uma unidade de aquisição de dados para monitoramento de tensão e corrente e a importância de manter a concentração no propósito central do projeto, o objetivo deste trabalho é descrever o desenvolvimento e a construção de uma placa de aquisição de dados. Essas placas são destinadas a realizar

medições precisas das grandezas elétricas trifásicas de tensão e corrente em cada um dos condutores de fase da rede de distribuição de energia. As placas são construídas utilizando o sensor de corrente LA 100-P e o sensor de tensão LV 20-P da marca LEM. O sinal de saída desses sensores é conectado a um circuito de condicionamento de sinal convertendo os níveis de tensão analógica para 0 ~ 3,3V, 0 ~ 5V e -10V ~ 10V, permitindo a leitura de dados por um conversor analógico-digital. A verificação do funcionamento das placas de aquisição de dados é conduzida por meio de um teste prático, verificando o sinal senoidal condicionado por meio de visualização em um osciloscópio, comparando os dados obtidos com os dados simulados por *software.*

A disponibilização das placas de aquisição de sinal de tensão e corrente para os alunos de engenharia elétrica oferecerá uma solução sólida e confiável para suas necessidades de coleta de dados. Isso permitirá que eles progridam em suas pesquisas e projetos com segurança e precisão, sem enfrentar a dificuldade de criar um sistema adicional para completar seus trabalhos.

2 REVISÃO TEÓRICA

A aquisição de dados refere-se ao processo de reunir informações do mundo real. Esses dados são predominantemente numéricos e geralmente são coletados, armazenados e analisados por meio de um computador. O uso de um computador automatiza o processo de aquisição de dados, possibilitando a coleta de mais informações em menos tempo e com menos erros (Du; Li; Guo, 2017; Park; Mackay, 2003).

Por meio de sensores e transdutores, sinais analógicos do mundo real, podem ser processados pelo sistema de aquisição de dados. Ocasionalmente alguns transdutores e sensores produzem sinais que são difíceis ou perigosos de medir diretamente com um dispositivo de aquisição de dados (Esteves, 2015).

Em situações com alto índice de ruídos, alta tensão, sinais de magnitude muito alta ou extremamente baixa, ou quando há necessidade de medir vários sinais simultaneamente, torna-se essencial realizar o condicionamento desses sinais para uma coleta de dados eficaz (Lopes, 2007). O condicionamento dos sinais provenientes dos sensores tem como propósito transformá-los em um formato que seja compatível com outros dispositivos, aprimorando a exatidão e a confiabilidade da grandeza mensurada (Fraden, 2016).

Em geral, todos os dispositivos de interface são projetados para permitir a conexão de sinais de sensores em uma faixa de tensão de 0 a 5 V, que posteriormente será digitalizada por um conversor A/D (Emilio, 2013). Dessa maneira, a grande maioria dos sinais devem ser condicionados por meio de um circuito eletrônico, incluindo principalmente a amplificação e filtragem, além de outras operações que podem ser realizadas no tratamento do sinal (Katdare; Warke; Vaidya, 2020).

As principais funções que um sistema eletrônico de condicionamento de sinais executa, conforme Park e Mackay (2003), são:

I. filtragem: em ambientes sujeitos a ruídos, sinais de baixa magnitude podem ser facilmente distorcidos. Para evitar isso, é comum empregar filtros passa-baixa, que atenuam frequências elevadas e preservam a precisão das medições.

II. amplificação: depois da filtragem, o sinal precisa ser amplificado para coincidir com a faixa de entrada do conversor analógico-digital (ADC). Instalar o amplificador próximo ao sensor minimiza interferências e melhora a resolução final dos dados.

III. linearização: muitos transdutores apresentam comportamento não linear em relação à grandeza física. Para corrigir essas distorções, aplicam-se técnicas de linearização por meio de componentes específicos ou algoritmos de software, garantindo maior exatidão na medição.

IV. isolação: em situações onde há risco de sobretensões ou falhas elétricas, o condicionamento de sinal pode isolar eletricamente o sensor do restante do circuito, protegendo tanto o equipamento quanto os operadores.

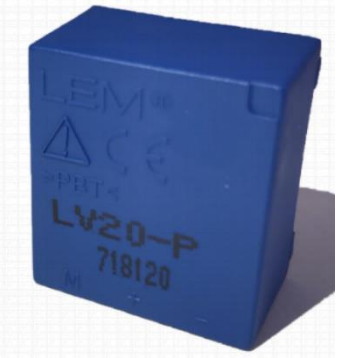
Segundo Lopes (2007), o sistema de aquisição de dados faz a análise de sinais oriundos de sensores ou transdutores. No contexto dos sistemas de potência, conhecer parâmetros como corrente, tensão e frequência é crucial para compreender seu funcionamento (Weedy, 2012). A confecção de placas de aquisição de corrente e tensão se revela indispensável no monitoramento e controle de sistemas elétricos, por favorecer precisão, segurança e eficiência. Um exemplo prático é apresentado por Neves (2021), Figura 1, que demonstra uma placa com transdutores de tensão e corrente, condicionados para fornecer uma saída de 10 V.

Figura 1: Placa de aquisição de sinal de tensão e corrente

Fonte: Neves, 2021, p. 30.

A medição de tensões consideravelmente elevadas é realizada por meio da redução da magnitude desses valores até níveis de tensão que sejam compatíveis com as capacidades de processamento de microprocessadores, conversores analógico-digitais e sistemas de aquisição (Faria, 2019). Esse processo é realizado com o emprego de dispositivos como transformadores de potencial, divisores de tensão e sensores de efeito Hall (Costa, 1996). A Figura 2 demonstra um transdutor de tensão baseado em efeito Hall.

Figura 2: Transdutor de tensão LV 20-P



Fonte: LEM, 2023.

Existem diferentes modos de medir correntes elétricas, podendo ser utilizados: derivadores de baixa resistência para obter tensões proporcionais, transformadores de corrente (TC's) e sensores de efeito Hall. Entretanto, circuitos derivadores não possuem isolação galvânica, diferentemente dos transformadores de corrente, podendo danificar os componentes eletrônicos (Almeida, 2009). Os TC's são formados por um conjunto de espiras, que ao percorrer uma corrente alternada no primário, induz uma corrente proporcional no secundário de valor reduzido, podendo ser processada pelas UADC's (Costa, 1996; Faria, 2019).

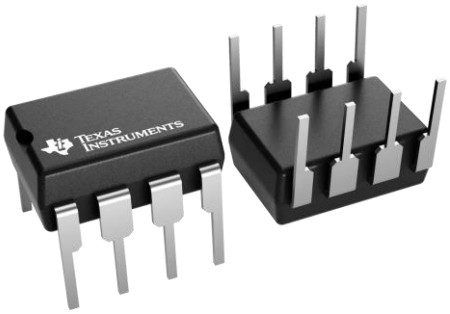
Figura 3: Transdutor de corrente LA 100-P

Fonte: LEM, 2023, *online*.

Almeida (2009) ressalta que sensores de corrente baseados no efeito Hall (Figura 3) podem operar tanto em CA quanto em CC, apresentando alta precisão em diversas faixas de frequência e intensidade. Por isso, são adequados a múltiplas aplicações. Os transdutores de tensão e corrente da LEM, por exemplo, permitem medições de até ±700 V e ±150 A, com isolação galvânica entre primário (potência) e secundário (eletrônico), aumentando a durabilidade dos componentes.

Já o circuito de condicionamento da placa utiliza um CI amplificador operacional, conforme Figura 4, para adequar o nível do sinal, além de filtros passivos RC responsáveis por atenuar ruídos.

Figura 4: Amplificador operacional LM 741



Fonte: Texas Instruments, 2023, *online.*

Circuitos de condicionamento de sinal ajustam a saída de sensores para torná-la compatível com conversores A/D (Abdullah *et al*., 2018). Nesse sentido, recomenda-se o uso de microcontroladores com A/D integrado, como Arduino, ESP-32 e Raspberry Pi (Scherz; Monk, 2016). Em especial, a placa ESP-32 (Figura 5) apresenta Wi-Fi 802.11, Bluetooth e um conversor A/D SAR de 12 bits com até 18 canais, permitindo a aquisição, o armazenamento e o envio de dados para sistemas de monitoramento remoto (Abdullah *et al*., 2018).

Figura 5: Placa de desenvolvimento ESP-32

Fonte: Eletrogate, 2023, *online*.

Os sistemas supervisórios coletam informações das placas de aquisição, permitindo armazenar, analisar e processar dados, além de possibilitar o controle de processos (Du; Li; Guo, 2017). Dessa forma, incluir o ESP-32 permite construir um sistema completo de aquisição de dados, fazendo a integração com computadores e sistemas de monitoramento e supervisórios.

3 METODOLOGIA

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados para medição de tensões e correntes trifásicos, para uso nos laboratórios de engenharia elétrica do UNIPAM. Para isso, a metodologia empregada seguiu a delimitação do problema e uma estratégia de resolução. Sendo assim, a sistemática a ser utilizada na execução do projeto pode ser dividida nas seguintes etapas:

Etapa 1: realizar uma pesquisa bibliográfica sobre melhores arranjos e topologias para construção do circuito de filtragem e de condicionamento de sinais;

Etapa 2: simular o circuito no *software* Multisim, desenvolvido pela National Instruments, que permite modelar e simular o comportamento de circuitos analógicos e digitais com precisão, facilitando o design e a análise antes da prototipagem.

Etapa 3: teste em protoboard para verificar o sinal de saída dos sensores de tensão e corrente, utilizando uma carga resistiva com fator de potência 1, tensão de 127V e potência de 1800W;

Etapa 4: desenvolver o projeto da placa de circuito impresso (PCI) utilizando o EAGLE, um *software* amplamente reconhecido para design de esquemáticos e layouts de PCBs.

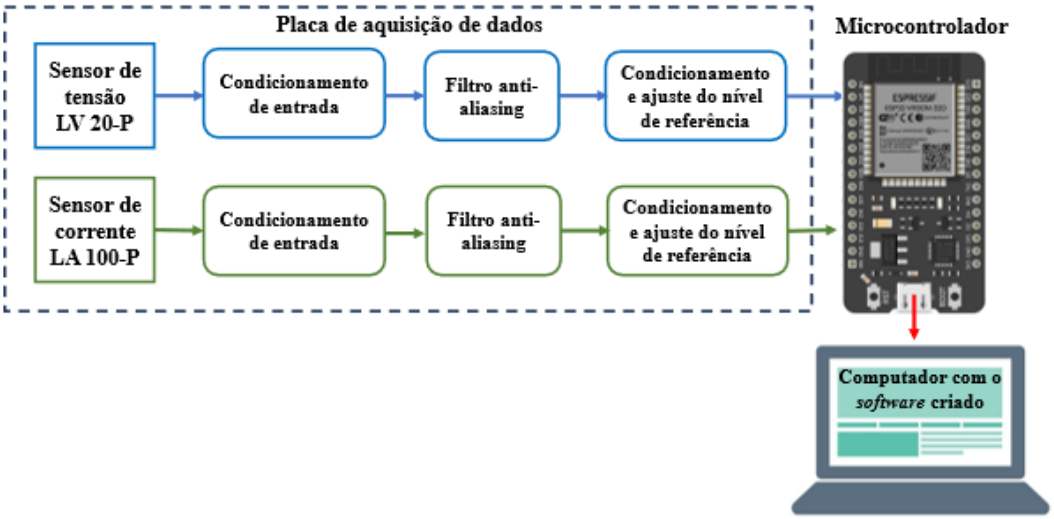
Etapa 5: fabricação da placa de circuito impresso (PCI) que será realizada utilizando uma fresadora CNC da marca Carbide3D. Com base no layout desenvolvido no *software* EAGLE, a máquina cria as trilhas de cobre necessárias para o circuito. Após a usinagem, os componentes serão fixados na placa e soldados com ferro de solda e estanho, garantindo conexões robustas e confiáveis para o funcionamento do projeto.

Etapa 6: verificar o funcionamento da placa de circuito impresso através de um osciloscópio;

Etapa 7: realizar os testes finais, que consistem em medir as saídas dos sensores após a passagem pelos circuitos de filtro e de condicionamento de sinal, comparando os valores obtidos experimentalmente com os valores simulados previamente no *software* Multisim.

Uma representação mais detalhada do funcionamento do sistema de aquisição de tensão e corrente trifásicas, para uma única fase, pode ser visto na Figura 6.

Figura 6: Fluxograma do sistema de aquisição de dados de tensão e corrente



Fonte: os autores, 2023.

O sistema desenvolvido consiste em uma placa de aquisição de dados projetada para medição e processamento de sinais trifásicos de tensão e corrente, destinada a aplicações acadêmicas e laboratoriais, fornecendo uma solução prática para o estudo de

sistemas de potência, eletrônica e instrumentação. Os principais componentes do sistema incluem:

- Sensor de Tensão (LV 20-P): é um transdutor de efeito Hall com relação de transformação 2500:1000, capaz de medir tensões em CA, CC e pulsos, oferecendo alta precisão e isolação galvânica para proteção contra surtos;
- Sensores de Corrente (LA 100-P): funcionam igualmente em CA, CC e pulsos, possuindo relação de transformação 1:2000. Sua construção assegura boa precisão e isolamento, protegendo o circuito contra descargas ou falhas;
- Filtro Ativo Passa-Baixa: utiliza amplificadores operacionais, resistores e capacitores para atenuar frequências indesejadas, garantindo a integridade das medições e possibilitando a captura de informações relevantes de cada fase;
- Condicionamento de Sinais: agrega ajustes de amplitude e offset, gerando saídas nas faixas de 0–3,3 V, 0–5 V e -10–10 V, ampliando a compatibilidade da placa com diferentes conversores A/D, como ESP32, Arduino e CLP.

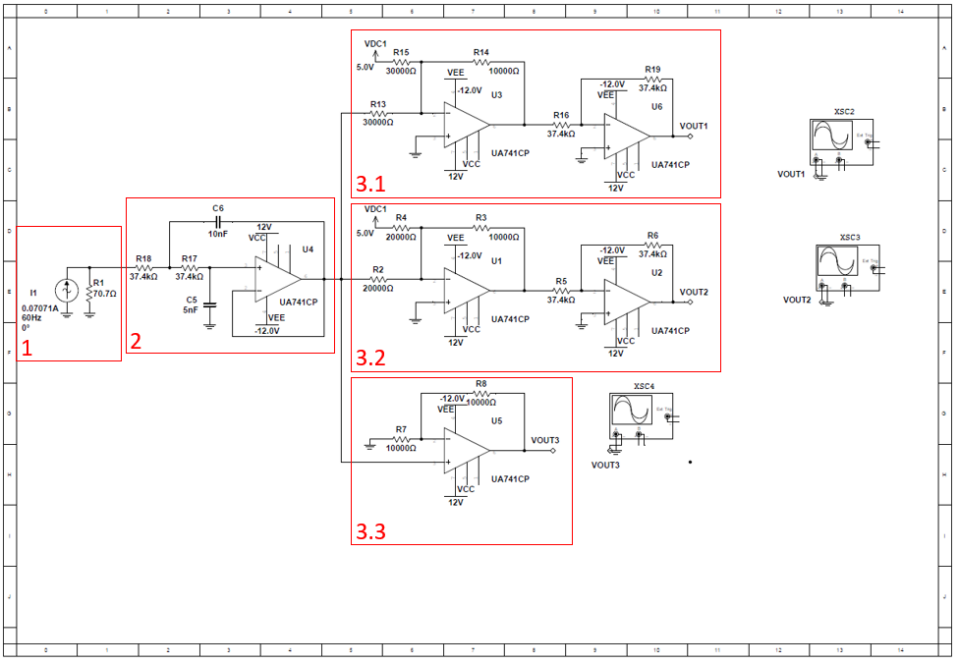
4 RESULTADO FINAL

Nos tópicos a seguir, são apresentados os detalhes do desenvolvimento, simulação e validação dos circuitos projetados, incluindo as etapas de escolha e configuração dos sensores, o design de filtros e o condicionamento de sinais. Os circuitos foram projetados para atender aos requisitos específicos de medição de corrente e tensão, garantindo alta precisão e confiabilidade. Foram utilizados softwares especializados, como Multisim e Eagle, para simulação e desenvolvimento do layout da placa de circuito impresso (PCI).

4.1 DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO

Foi necessário projetar e simular circuitos específicos para filtrar ruídos e ajustar os níveis de sinal dos sensores de corrente e tensão. Esse cuidado assegura medições mais confiáveis, adequando amplitude e frequência para posterior processamento. O trabalho incluiu a escolha precisa de componentes (resistores, capacitores, amplificadores operacionais e filtros ativos) e a realização de simulações minuciosas no Multisim, permitindo analisar o desempenho em diferentes cenários e otimizar os parâmetros de projeto. Como resultado, desenvolveu-se o circuito ilustrado na Figura 7, que sintetiza as soluções propostas para integridade e confiabilidade dos sinais.

Figura 7: Circuito desenvolvido no Multisim para simulação do sensor de corrente



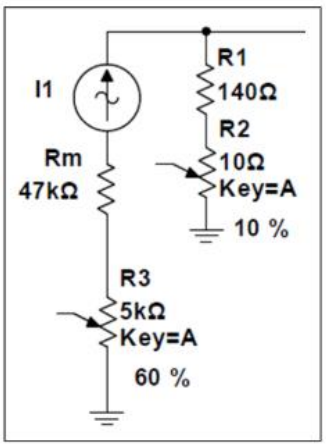
Fonte: os autores, 2024.

A explicação foi organizada em seções para detalhar o papel de cada componente do sistema. O circuito 1 (Figura 7) corresponde às saídas dos sensores de corrente e tensão, enquanto o circuito 2 aborda a filtragem. Os circuitos 3.1, 3.2 e 3.3 tratam do condicionamento para faixas de 0–3,3 V, 0–5 V e -10–10 V, respectivamente. A estrutura padronizada desses estágios simplifica o design e evita redundâncias, assegurando clareza na apresentação das etapas (4.1.1 a 4.1.4) referentes à escolha, à implementação e à integração de cada elemento.

4.1.1 Sensor de tensão

O sensor de tensão LV 20-P (LEM) mede até 500 V RMS, com relação de transformação 2500:1000. Como a corrente máxima no primário é 10 mA, emprega-se um resistor de 5 W e 50 kΩ (47 kΩ + trimpot) para limitar a corrente. A saída do sensor converte essa corrente em tensão por meio de um resistor de 140 Ω (mais um trimpot), resultando em valores entre -5 V e +5 V para 500 V RMS. O projeto recorre a resistores de precisão (1%) para obter medições mais confiáveis, conforme ilustra o esquema da Figura 8.

Figura 8: Esquemático de entrada e saída do sensor de tensão LV 20-P desenvolvido no Multisim

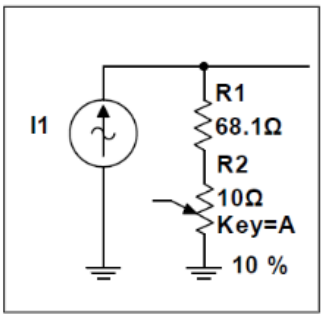


Fonte: os autores, 2024.

4.1.2 Sensor de corrente

O transdutor de corrente LA 100-P (LEM) tem relação de transformação 1:2000 e mede até 100 A RMS. Para converter a corrente secundária em tensão, utiliza-se um resistor de cerca de 70,7 Ω (definido em 68,1 Ω mais um trimpot), de modo que a saída oscile de -5 V a +5 V no limite de 100 A. Resistores de precisão (1%) garantem maior confiabilidade nos valores medidos, e a construção do circuito é demonstrada na Figura 9.

Figura 9: Esquemático de saída sensor de corrente LA 100-P desenvolvido no Multisim

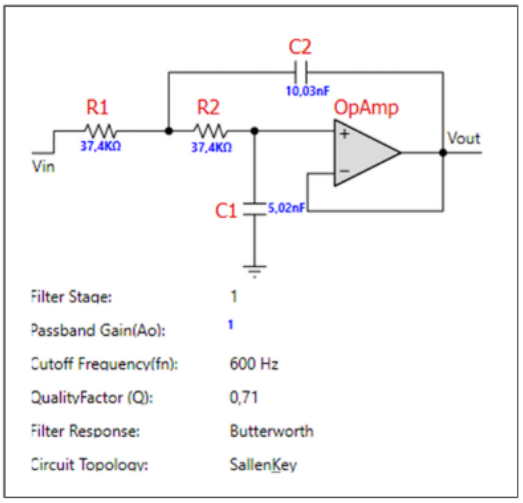


Fonte: os autores, 2024.

4.1.3 Filtro ativo passa-baixa

O filtro passa-baixa proposto para até 600 Hz (harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem) faz uso da topologia Sallen-Key, escolhida pela simplicidade de implementação, estabilidade e flexibilidade. A resposta Butterworth, caracterizada por atenuação uniforme e máxima planicidade na banda passante, foi adotada para preservar a forma de onda. Na prática, o software FilterPro (Texas Instruments) auxiliou na definição dos componentes e na simulação do desempenho, culminando no circuito ilustrado na Figura 10 (adaptado de FilterPro, 2024).

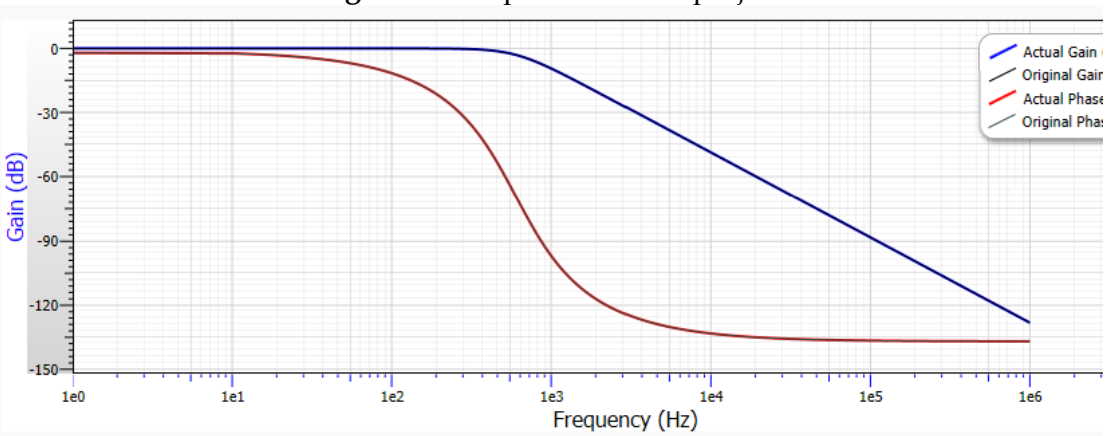
Figura 10: Circuito filtro passa-baixa, frequência de corte de 600 Hz



Fonte: adaptado de FilterPro, 2024.

A resposta do filtro é apresentada na Figura 11, em um gráfico que relaciona o ganho (dB) e Frequência (Hz).

Figura 11: Resposta do filtro projetado



Fonte: adaptado de FilterPro, 2024.

A Figura 11 ilustra o comportamento do filtro ativo, destacando a atenuação gradual que ocorre quando a frequência ultrapassa o valor de corte projetado em 600 Hz. Esse resultado evidencia a eficácia do filtro em reduzir componentes de alta frequência, preservando a integridade do sinal na faixa de interesse, porém apresentando uma defasagem da fase conforme o sinal se aproxima da frequência de corte.

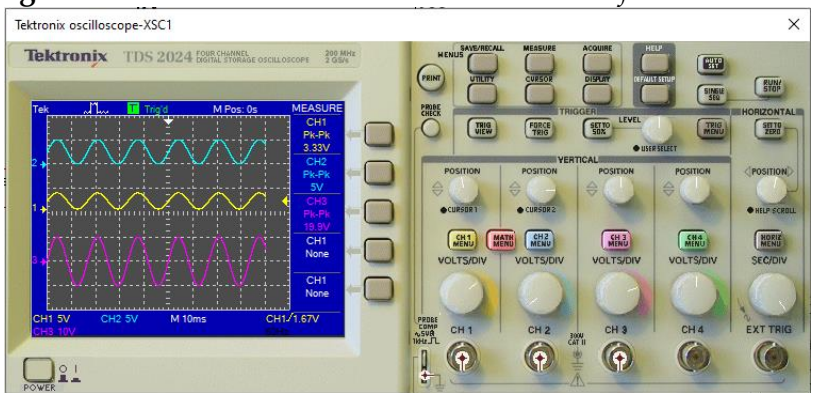
4.1.4 Condicionamento de sinais

Para garantir compatibilidade com diversos conversores A/D, elaboraram-se quatro faixas de saída para cada sensor: 0 a 3,3 V, 0 a 5 V, -10 a 10 V e a saída bruta do sensor. Assim, atende-se tanto a microcontroladores que operam em níveis de 3,3 V e 5 V quanto a sistemas que demandam sinais bipolares. Cada circuito de condicionamento foi

exaustivamente simulado no Multisim, aplicando-se amplificadores operacionais em configurações somadora ou não inversora, o que possibilitou a inserção de um offset de 5 V para deslocar o sinal senoidal à faixa pretendida.

A validação realizada no *software* Multisim, conforme Figura 12, demonstrou a eficácia dos circuitos projetados, confirmando sua precisão e funcionalidade para o propósito desejado. Assim, a abordagem adotada garante a integridade dos sinais processados e sua adequação para as aplicações pretendidas.

Figura 12: Saídas condicionadas simuladas no *software* Multisim

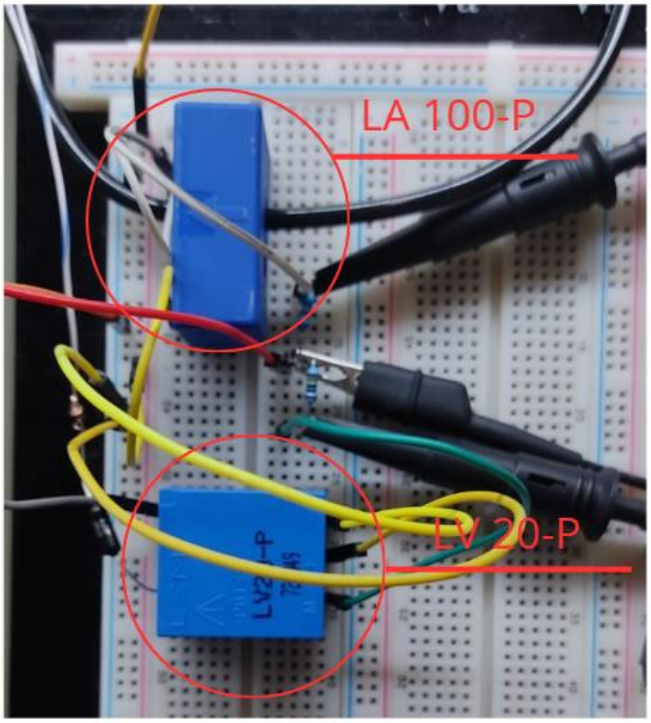


Fonte: adaptado de Multisim, 2024.

4.2 MONTAGEM EM PROTOBOARD E VALIDAÇÃO

O circuito foi verificado em protoboard com uma carga resistiva de 127 V e 13,27 A, utilizando o sensor de corrente LA 100-P e o sensor de tensão LV 20-P (Figura 13). Foram aplicados resistores de 68,3 Ω (corrente), 140 Ω (tensão) e 47,6 kΩ (Rm).

Figura 13: Circuito de teste dos sensores LA 100-P (corrente) e LV 20-P (tensão)



Fonte: os autores, 2024.

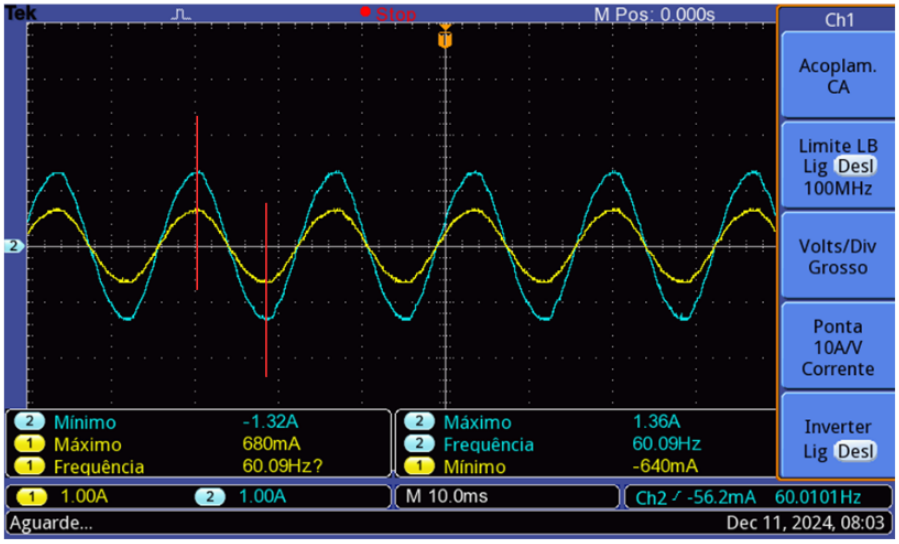
O valor dos resistores utilizados para o teste da placa foram 68,3 Ω para o sensor de corrente, 140 Ω para o sensor de tensão e 47600 Ω para o resistor Rm na entrada do sensor de tensão. Por meio de (1) e (2), são demonstrados os valores esperados na saída do osciloscópio:

$$Vo = \frac{Np}{Ns} \times Iin \times \sqrt{2} \times R_1 = \frac{1}{2000} \times 13{,}27 \times \sqrt{2} \times 68{,}3 = \pm 640\, mV\# \quad (1)$$

$$Vo = \frac{Np}{Ns} \times \frac{Vin}{Rm} \times \sqrt{2} \times R_1 = \frac{2500}{1000} \times \frac{127}{47600} \times \sqrt{2} \times 140 = \pm 1{,}32\, V\# \quad (2)$$

Os valores esperados, obtidos pelas Equações (1) e (2), mostraram boa concordância com as medições experimentais (Figura 14), confirmando a linearidade e a confiabilidade dos sensores, bem como a coerência entre as formas de onda de tensão e corrente em um circuito puramente resistivo. Esses testes práticos possibilitaram pequenos ajustes e validaram o desempenho dos sensores para as aplicações pretendidas.

Figura 14: Sinal de saída do sensor de corrente LA 100-P

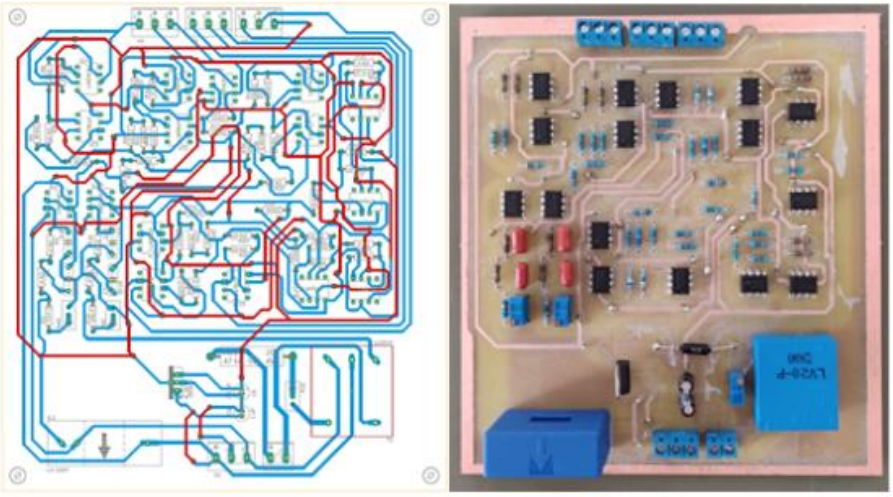


Fonte: os autores, 2024.

4.3 DESENVOLVIMENTO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

O esquema e o layout da placa foram desenvolvidos no Eagle, partindo de um circuito previamente validado no Multisim. O layout, conforme Figura 15, exigiu cobre em ambas as faces, agrupando os componentes na face superior. A interconexão com a face inferior foi feita aproveitando os próprios fios dos terminais dos resistores como vias, otimizando recursos e garantindo boa condutividade. Os detalhes finais podem ser consultados nos apêndices (A, B e C), com toda a documentação de conexões e posicionamento.

Figura 15: Layout da placa de circuito impresso e placa finalizada

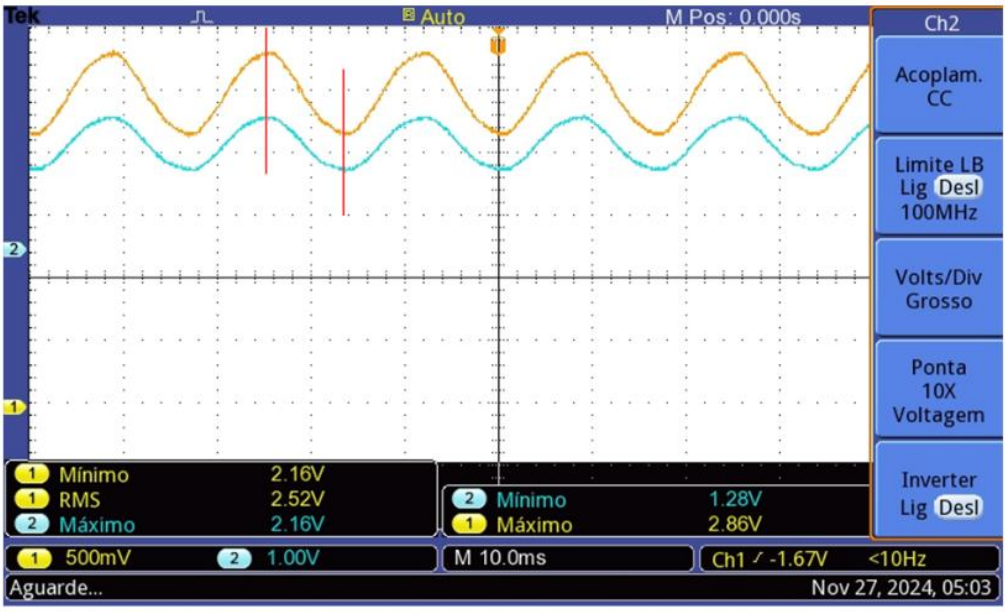


Fonte: os autores, 2024.

4.4 VALIDAÇÃO DA PLACA

Os testes utilizaram uma churrasqueira elétrica de 127 V e 12,8 A, possibilitando avaliar o comportamento do circuito em condições próximas aos reais. Os sensores LA 100-P e LV 20-P (efeito Hall) forneceram sinais adequados nos três modos de saída (0–3,3 V, 0–5 V e -10–10 V). O osciloscópio, destacado na Figura 16, confirmou ondas senoidais com leve offset DC e ausência de defasagem entre tensão e corrente, demonstrando consistência e alinhamento ao projeto. Todas as saídas apresentaram o desempenho previsto, validando a funcionalidade e precisão do sistema.

Figura 16: Sinal de corrente (amarelo) e sinal de tensão (azul) vistos pelo osciloscópio



Fonte: os autores, 2024.

4.5 COMPARATIVO ENTRE SIMULAÇÃO E DADOS COLETADOS

Os valores de saída de cada sensor foram obtidos por simulações no Multisim e validados com cálculos teóricos (equações 1, 2 e 3), conforme destacado na Tabela 1. Cada saída do circuito de condicionamento foi testada individualmente em um circuito operando com 127 V e 12,8 A, e os resultados experimentais foram comparados com os simulados, evidenciando as discrepâncias percentuais apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Valores obtidos pela simulação, experimento e comparativo percentual

LA 100-P	0~3.3V	0~5V	10~10V	LV 20-P	0~3.3V	0~5V	10~10V
Mín (V) Simulação	1,880	2,820	1,280	**Mín (V) Simulação**	2,090	3,135	2,540
Máx (V) Simulação	1,453	2,180	-1,280	**Máx (V) Simulação**	1,243	1,865	-2,540
Mín (V) Experimental	1,900	2,860	1,360	**Mín (V) Experimental**	2,080	3,160	2,480

Máx (V) Experimental	1,420	2,160	-1,360	**Máx (V) Experimental**	1,200	1,840	-2,480
Mín (%) Comparativo	1,07 %	1,42%	6,26%	**Mín (%) Comparativo**	-0,48%	0,80%	-2,36%
Máx (%) Comparativo	-2,30%	-0,92%	-6,26%	**Máx (%) Comparativo**	-3,49%	-1,34%	-2,36%

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Os resultados demonstram que, na maioria dos casos, as diferenças entre os valores simulados e medidos permaneceram dentro de uma margem aceitável, validando a precisão do circuito de condicionamento e sua capacidade de reproduzir os resultados esperados em condições reais de operação. No entanto, para o circuito de condicionamento do sensor de corrente, especificamente na saída configurada para -10 V a 10 V, foi observada uma variação de 6,26% em relação aos valores simulados.

Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que, nas simulações, os componentes são considerados ideais, enquanto no circuito físico, as características reais dos componentes impactam diretamente no desempenho. Por exemplo, os resistores utilizados na montagem da placa possuem uma tolerância nominal de 1%, o que já contribui para pequenas divergências nos resultados. Durante a análise prática, foi identificado que alguns resistores, mesmo especificados com tolerância de 1%, apresentaram margens de erro variando entre 3%, 4% e até 5%. Essa discrepância maior em alguns componentes explica, em parte, a variação observada na saída de -10 V a 10 V do sensor de corrente.

Embora essa variação seja relativamente pequena, ela destaca a importância de considerar as características reais dos componentes durante o projeto e a montagem, além de reforçar a necessidade de medições adicionais para ajustar e otimizar o desempenho do circuito em aplicações práticas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A criação de um sistema para capturar sinais de tensão e corrente em três fases com focos em acessibilidade e precisão mostra-se uma solução original e eficiente para os desafios encontrados em laboratórios acadêmicos e ambientes industriais. O projeto obteve resultados consistentes tanto em simulações quanto em testes práticos e se destacou pela inclusão de sensores de efeito Hall, circuitos de condicionamento de sinais e filtros ativos que asseguram medidas confiáveis.

Os resultados práticos confirmaram uma consistência com os números previstos na simulação e mostraram uma discrepância máxima de 6,26%, decorrente das variações dos materiais empregados, que não ideais assim como são em um *software* de simulação. Tais resultados comprovam o funcionamento da placa em situações do mundo real, tornando-a uma ferramenta essencial para o ensino de engenharia elétrica e para pesquisas aplicáveis.

Portanto, o sistema proposto não só atende às necessidades específicas de medição e aquisição de dados trifásicos, mas também marca um avanço significativo na otimização dos processos laboratoriais. Isso serve como base para futuras

implementações e melhorias, tanto no ambiente acadêmico quanto no industrial, promovendo a progressão em projetos que requerem medições confiáveis e adaptação tecnológica. Desse modo, este estudo contribui para fortalecer a prática experimental e preparar engenheiros capazes de enfrentar os desafios contemporâneos da engenharia elétrica.

Com base no desenvolvimento apresentado neste trabalho, surgem diversas oportunidades para a expansão e o aprimoramento do sistema. Entre as possibilidades, destacam-se as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- propor estudos para desenvolver a integração da placa de aquisição de sinais trifásicos com sistemas supervisórios baseados em Internet das Coisas (IoT), possibilitando a transmissão de dados em tempo real para plataformas de monitoramento remoto.
- realizar estudos para redução do tamanho físico da placa e estudar uma forma de implementar um filtro ativo que apresente um resultado melhor para a defasagem próximo da frequência de corte. Uma maneira de reduzir o tamanho da placa seria utilizando divisores de tensão após somar o sinal de saída com *offset* DC de 5V.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, A. H., *et al*. **Development of ESP32-based Wi-Fi Electronic Nose System for Monitoring LPG Leakage at Gas Cylinder Refurbish Plant**. 2018. International Conference on Computational Approach in Smart Systems Design and Applications (ICASSDA), Kuching, Malaysia, 2018, p. 1-5.

ALMEIDA, A. M. A. **Estudo e Implementação de sensores de corrente**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

BOYLESTAD, R., NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**, 11. ed. São Paulo: Prentice-Hall do Brasil, 2013.

COSTA, M. R. **Medição de tensões e correntes - classe 15 kv - por sistemas eletro-ópticos e magneto-ópticos**. 1996. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 1996.

DU, J.; LI, W.; GUO, J. Design of LabVIEW Based General Data Acquisition System. **IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)**, Chengdu, China, 2017, pp. 1235-1239.

ELETROGATE. **Wireless e IoT – ESP32**. Disponível em: https://www.eletrogate.com/modulo-wifi-esp32s-bluetooth-38-pinos.

EMILIO, M. D. P. **Data Acquisition Systems**: from fundamentals to applied design. New York: Ed. Springer, 2013.

ESTEVES, F. J. A. M. **Development and Implementation of a Data Acquisition System for Teaching Purposes**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade de Lisboa, 2015.

FARIA, V. H. C. **Sistema automatizado de ensaio de transformadores aplicando o labview**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Centro Universitário de Patos de Minas, Patos de Minas, 2019.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2017.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors**: physics, designs, and applications. 5. ed. New York: Ed. Springer, 2016.

IEC. **IEC 61010-1: Safety Requirements for Electrical Equipment for Measurement, Control, and Laboratory Use** - Part 1: General Requirements. International Electrotechnical Commission, 2010.

JARDINI, J. A. **Sistemas elétricos de potência: automação**. São Paulo: EPUSP, 1999. v. 100.

KATDARE, H.; WARKE, M.; VAIDYA, P. **Design and Construction of Low Cost High-Performance Transducer Signal Processing and Data Acquisition System**. 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)(48184), Tirunelveli, India, 2020, pp. 48-52.

LEM. **Transdutores de tensão – Linha industrial**. Disponível em: https://www.amds4.com.br/produto/477/1/LEM-LV-20-P.

LOPES, V. J. S **Instrumentação virtual aplicada ao ensino experimental de engenharia elétrica**. 2007. 108f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI Multisim** [Software]. Austin, TX, EUA, 2024.

NEVES, B. L. **Instrumentação virtual aplicada ao monitoramento de máquinas elétricas rotativas**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

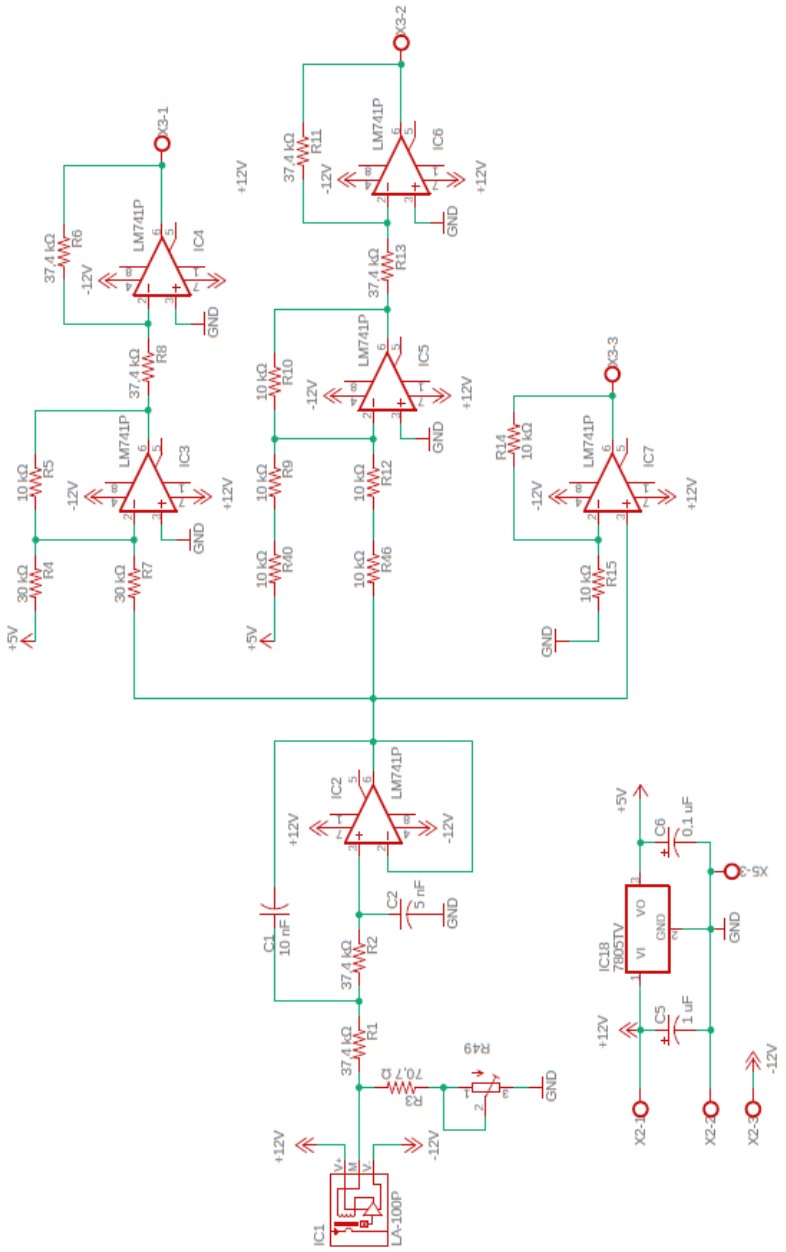
PARK, J.; MACKAY, S. **Practical data acquisition for instrumentation and control systems**. Burlington: Ed. Elsevier, 2003.

SCHERZ, P.; MONK, S. **Practical Eletronics for Inventors**. 4. ed. New York: Ed. McGraw-Hill, 2016.

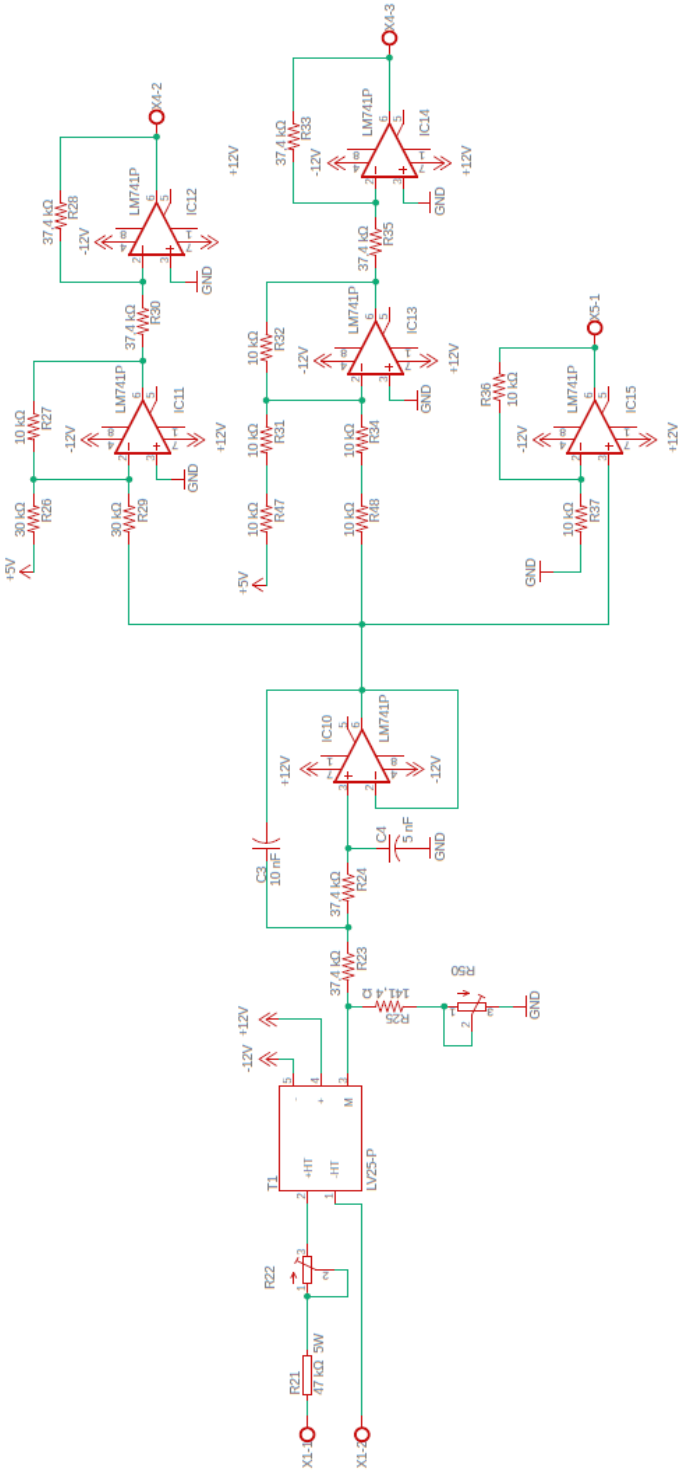
TEXAS INSTRUMENTS. **Operational Amplifiers (op amps)**. Disponível em: https://www.ti.com/product/LM741.

WEEDY, Brian M. *et al.* **Electric Power Systems**. United Kingdom. Ed. Wiley, 2012.

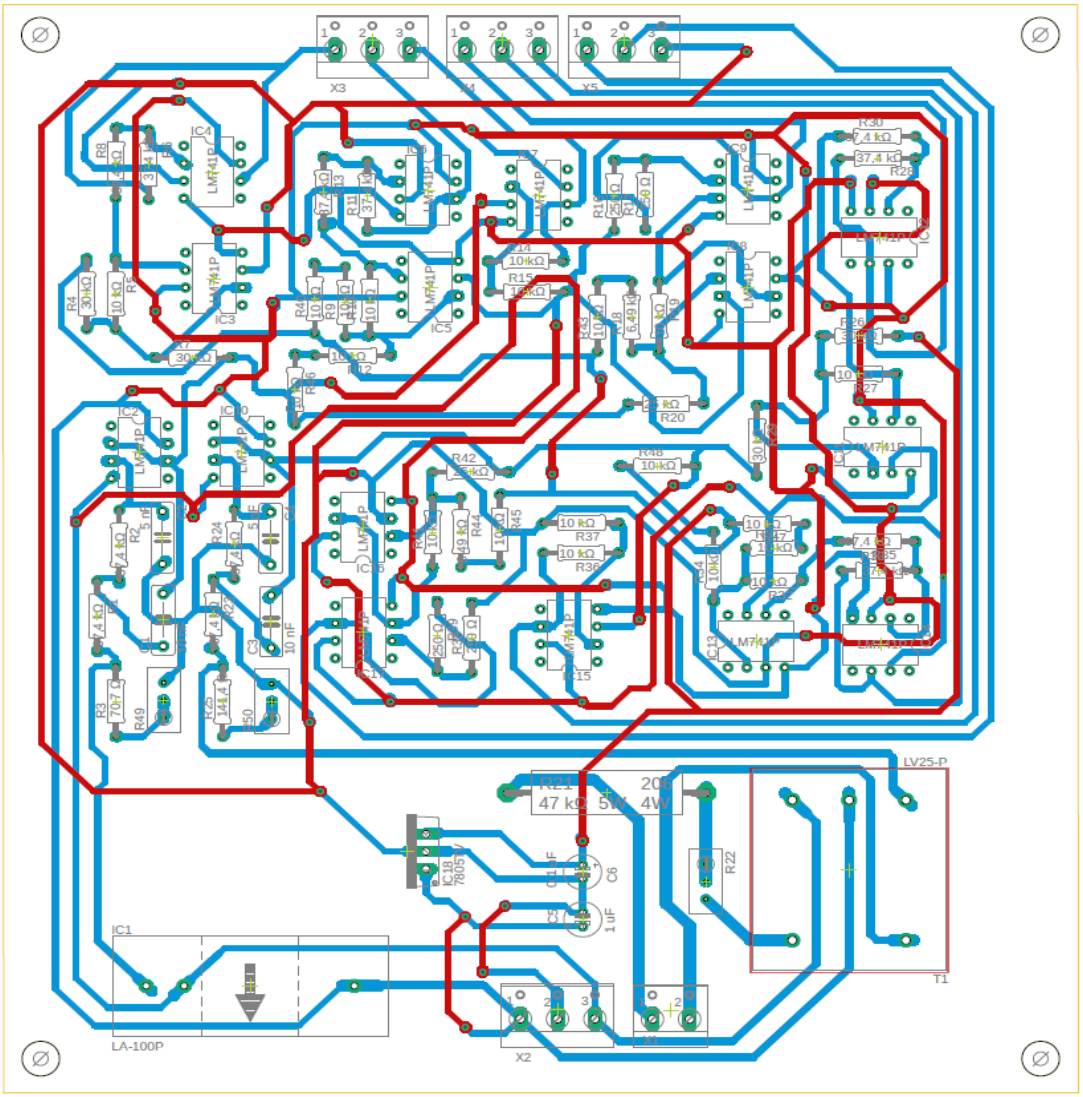
APÊNDICE A – CIRCUITO SENSOR DE CORRENTE



APÊNDICE B – CIRCUITO SENSOR DE TENSÃO



APÊNDICE C – LAYOUT PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO



Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 156-173, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Projeto e desenvolvimento de sistema de automação industrial com sistema supervisório e plano de manutenção integrado para uma unidade de beneficiamento de sementes

Design and development of an industrial automation system with supervisory control and integrated maintenance plan for a seed processing unit

HERIC SANTOS PEREIRA
Discente de Engenharia Elétrica (UNIPAM)
hericsp@unipam.edu.br

GASPAR EUGÊNIO OLIVEIRA RAMOS
Professor orientador (UNIPAM)
gasparramos@unipam.edu.br

Resumo: Este estudo teve como objetivo desenvolver e implementar um sistema de automação industrial em uma linha de beneficiamento de sementes, visando à otimização da produção e à garantia da qualidade do produto final. Para isso, integrou-se ao processo um sistema de controle supervisório e aquisição de dados (SCADA), permitindo o monitoramento em tempo real e a adoção de um plano de manutenção preventiva. Os resultados demonstraram que a automação industrial, aliada ao sistema SCADA e à manutenção preventiva, constitui uma estratégia eficaz para o aumento da produtividade e da qualidade das sementes. Por meio de simulações em bancada, foi possível validar a eficiência do sistema desenvolvido, o qual automatizou os processos, centralizou os controles e otimizou o tempo de operação. A implementação do sistema automatizado resultou em ganhos significativos, como maior eficiência operacional, redução de custos, melhoria na qualidade do produto final e incremento na segurança dos operadores. Os dados obtidos indicam a viabilidade técnica e os benefícios da automação industrial para o setor de beneficiamento de sementes, podendo servir de base para aplicações futuras em outras unidades.
Palavras-chave: automação industrial; manutenção preventiva; SCADA.

Abstract: This study aimed to develop and implement an industrial automation system in a seed processing line, with the objective of optimizing production and ensuring the quality of the final product. To achieve this, a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) system was integrated into the process, enabling real-time monitoring and the adoption of a preventive maintenance plan. The results demonstrated that industrial automation, combined with the SCADA system and preventive maintenance, represents an effective strategy for increasing seed productivity and quality. Through bench simulations, the efficiency of the developed system was validated, which automated processes, centralized controls, and optimized operating time. The implementation of the automated system resulted in significant gains, such as increased operational efficiency, cost reduction, improved final product quality, and enhanced operator

safety. The data obtained indicate the technical feasibility and benefits of industrial automation for the seed processing sector and may serve as a basis for future applications in other units.
Keywords: industrial automation; preventive maintenance; SCADA.

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos mais remotos, o ser humano demonstrou constante preocupação com o ambiente ao seu redor. Tal preocupação manifestou-se na fabricação de utensílios destinados a facilitar as atividades cotidianas, como a caça, a pesca, a construção de habitações e de espaços destinados ao culto. Com o aprimoramento desses utensílios e estruturas, tornou-se necessária a adoção de práticas voltadas ao cuidado, à reparação e, eventualmente, à substituição de componentes, configurando, ainda que de forma rudimentar, o surgimento das primeiras práticas de manutenção (Almeida, 2016).

De acordo com a empresa Schneider Electric ([202?]), atuante no setor de automação industrial, essa tecnologia exerce papel fundamental na ampliação da produtividade e na otimização dos processos de fabricação e produção. Parte essencial desse avanço é a utilização de sistemas de automação industrial, os quais viabilizam o gerenciamento e a integração das operações produtivas com maior precisão e eficiência.

Os controles de processos industriais e a automação da manufatura têm exercido impacto significativo e representam uma das áreas de maior sucesso na aplicação do Controlador Lógico Programável (CLP). Essa tecnologia é amplamente empregada em diversos sistemas que demandam automação e inteligência, não apenas substituindo o trabalho humano, mas também promovendo maior precisão, confiabilidade, eficiência de custos e agilidade operacional (Natale, 2000).

No contexto industrial, evidencia-se a necessidade de concentrar de forma eficiente as informações obtidas por meio da automação, com o objetivo de maximizar a coleta de dados em intervalos de tempo reduzidos. Para atender a essa demanda, tornou-se imprescindível a implementação de um sistema centralizado e compacto, capaz de realizar acionamentos e leituras de sensores operados por profissionais da área. Nesse cenário, destaca-se o sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), o qual oferece soluções para o monitoramento e controle de processos industriais. Tal sistema coleta dados por meio de dispositivos remotos — principalmente os CLPs —, organiza essas informações e as apresenta aos operadores por meio de diversas interfaces (Bayer; Eckhardt; Machado, 2011).

Nesse contexto, é feito o seguinte questionamento: a integração da manutenção com a automação dos processos industriais e a implementação de um sistema SCADA seria a solução mais eficiente para impulsionar a produção industrial?

O objetivo geral deste trabalho consiste no desenvolvimento de um projeto de automação para uma linha de beneficiamento de sementes, associado a um plano de manutenção preventiva, incorporado a um sistema de controle supervisório e aquisição de dados (SCADA). Tal projeto visa não apenas à produção em larga escala, mas também à elevação da qualidade das sementes, promovendo, assim, maior produtividade no campo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL POR CLP

A automação industrial engloba um conjunto de tecnologias que empregam sistemas e dispositivos de controle, como robótica e *software*, com o propósito de automatizar operações e maquinário na indústria, dispensando intervenção direta de seres humanos. Além de trazer benefícios, como a redução de custos e a diminuição do tempo de produção, essa abordagem melhora significativamente a eficiência e elimina possíveis erros associados à intervenção humana. (Revista Ferramental, 2022).

Segundo Roggia e Fuentes (2016), a automação industrial tem passado por avanços significativos nas últimas décadas, e esse desenvolvimento continua a ocorrer de forma acelerada na contemporaneidade. A cada ano, novas tecnologias são introduzidas, enquanto outras são continuamente aperfeiçoadas, ampliando as possibilidades de implementação de soluções voltadas à automação de processos. Essa evolução tecnológica tem permitido a aplicação da automação em diversos contextos, desde sistemas residenciais e comerciais até processos industriais de alta complexidade. No presente estudo, o foco recai sobre a automação de processos industriais, cuja aplicabilidade abrange desde operações simples, de pequena escala, até plantas industriais amplamente automatizadas, caracterizadas por alto grau de integração e controle.

O primeiro aspecto a ser considerado na automação de processos é a lógica sequencial que orienta sua execução. Para tanto, é fundamental compreender os conceitos de algoritmo, portas lógicas e programação na linguagem Ladder. Um algoritmo pode ser definido como uma sequência organizada de instruções que, quando executadas de forma precisa e ordenada, conduzem à resolução de um problema específico.

De acordo com Cormen *et al*. (2012), um algoritmo é uma sequência finita de instruções, claramente definidas e desprovidas de ambiguidade, cuja execução ocorre em um tempo finito e resulta em uma saída específica. Para que um algoritmo seja eficaz, é necessário atender a premissas fundamentais, tais como a formulação de ações simples e inequívocas, sua disposição em uma ordem lógica e a delimitação dessas ações em um conjunto finito de etapas. A Figura 1 ilustra um exemplo de algoritmo aplicado à troca de um pneu automotivo, no qual, ao seguir as instruções enumeradas de 1 a 9, é possível executar corretamente essa operação.

Figura 1: Exemplo de Algoritmo sobre a troca de um pneu de carro

Algoritmo 1 Troca de pneu do carro.

```
1: desligar o carro
2: pegar as ferramentas (chave e macaco)
3: pegar o estepe
4: suspender o carro com o macaco
5: desenroscar os 4 parafusos do pneu furado
6: colocar o estepe
7: enroscar os 4 parafusos
8: baixar o carro com o macaco
9: guardar as ferramentas
```

Fonte: adaptado de Ferrari e Cechinel, 2008, p. 15.

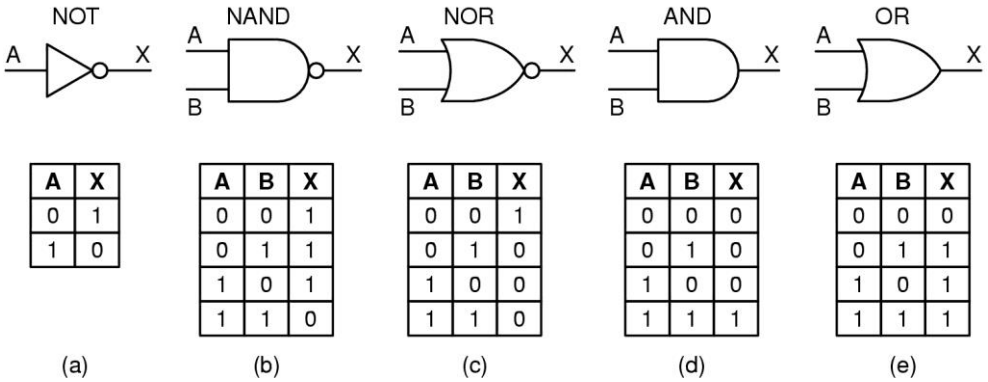
No ano de 1854, o matemático britânico George Boole escreveu um trabalho intitulado *Uma Investigação das Leis do Pensamento*, em que investigou a formulação de decisões lógicas com base em proposições que podem assumir valores de verdadeiro ou falso. Esse método passou a ser conhecido como lógica *booleana*, e o sistema correspondente, que utiliza símbolos e operadores para representar essas decisões, recebeu o nome de álgebra *booleana*. Tal conceito constitui um dos fundamentos essenciais da eletrônica digital (Roggia; Fuentes, 2016).

Para Petruzella (2014), os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), assim como outros dispositivos digitais, operam com base nos princípios da lógica digital, na qual as informações são representadas por dois estados distintos: "1" ou "0", que podem ser interpretados como ligado/desligado, verdadeiro/falso, alto/baixo, entre outras equivalências. Essa característica binária é crucial para garantir a velocidade e a precisão no processamento de dados, uma vez que elimina a possibilidade de estados intermediários.

A Figura 2 apresenta a simbologia das principais portas lógicas, amplamente utilizadas em circuitos digitais. A Figura 2(a), identificada como "NOT", representa a porta lógica *NOT* (ou *NÃO*), cuja principal função é inverter o sinal de entrada, isto é, transformar um nível lógico "1" em "0" e vice-versa. Em seguida, a Figura 2(b) mostra a porta *NAND* ("E-NÃO"), que corresponde a uma combinação da operação lógica *AND* seguida de uma negação, produzindo uma saída falsa apenas quando todas as entradas são verdadeiras. Por fim, a Figura 2(c) apresenta a porta *NOR* ("OU-NÃO"), que realiza a operação *OR* seguida de uma negação, gerando uma saída verdadeira somente quando todas as entradas são falsas.

Já na Figura 2(d), tem-se a porta lógica *AND* ("E"), a qual gera uma saída verdadeira somente quando todas as entradas forem verdadeiras simultaneamente. Em complemento, a Figura 2(e) representa a porta lógica *OR* ("OU"), que produz uma saída verdadeira sempre que pelo menos uma das entradas for verdadeira. Essas portas lógicas constituem elementos fundamentais na construção de circuitos digitais e desempenham papel central na execução de operações lógicas em sistemas de eletrônica digital e automação. São, portanto, a base do funcionamento de diversos dispositivos computacionais, como computadores e controladores lógicos programáveis (CLPs).

Figura 2: Principais Portas Lógicas



A	X
0	1
1	0

A	B	X
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

A	B	X
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

A	B	X
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

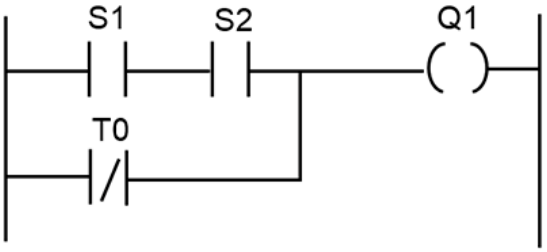
A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Fonte: adaptado de Felgueiras, 2003.

A linguagem de programação constitui uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de software, uma vez que permite a escrita de sequências de instruções capazes de manipular o comportamento de dispositivos. No contexto da automação industrial, uma das linguagens mais empregadas é a *Ladder*, cuja origem remonta aos antigos diagramas de contatos elétricos. Trata-se de uma linguagem de programação gráfica que utiliza símbolos visuais para representar operações lógicas e aritméticas, o que contribui para a simplificação da programação de dispositivos de controle, como os CLPs. Através da linguagem *Ladder*, é possível representar circuitos elétricos complexos em uma interface gráfica de fácil interpretação, favorecendo a compreensão por parte dos profissionais da área. Em razão dessa característica, a linguagem *Ladder* consolidou-se como uma das mais utilizadas na automação industrial, desempenhando papel fundamental na implementação de sistemas de controle automatizados (ABB, 2022).

A Figura 3 apresenta um exemplo de diagrama *Ladder*, utilizado como representação gráfica da lógica de programação em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Esse tipo de diagrama é composto por duas linhas verticais, que simbolizam as fontes de alimentação, e por linhas horizontais, que representam os circuitos de controle. No exemplo ilustrado, a saída Q1 assumirá nível lógico alto somente se os contatos S1 e S2 forem acionados simultaneamente, ou se o contato T0 não apresentar nível lógico alto. Os circuitos do diagrama *Ladder* são constituídos por símbolos gráficos padronizados, os quais representam funções lógicas e dispositivos de entrada e saída do CLP. A ampla utilização dessa linguagem na programação de CLPs decorre de sua simplicidade e da facilidade de interpretação por parte dos profissionais da área de automação.

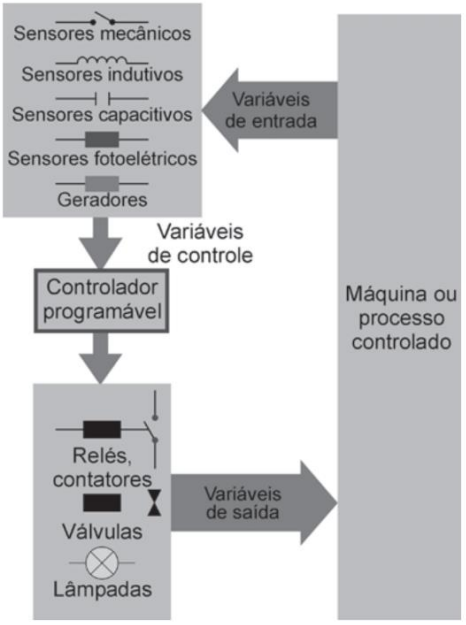
Figura 3: Diagrama de programação em linguagem *Ladder*



Fonte: adaptado de ABB, 2022.

A operação do CLP em um sistema automatizado é ilustrada na Figura 4. Os sensores realizam a coleta contínua de dados sobre as condições operacionais do processo e transmitem essas informações ao CLP. Com base nos sinais recebidos e nas instruções previamente programadas, o CLP processa os dados e atua sobre os elementos de saída, como válvulas, motores e demais dispositivos eletromecânicos, promovendo os ajustes necessários ao funcionamento adequado do sistema.

Figura 4: Operação do CLP



Fonte: adaptado de Natale, 2000.

A utilização da automação por CLP tem como objetivo a implementação de sistemas autônomos, com o emprego de instrumentações específicas. Nesses sistemas, utilizam-se sensores capazes de captar grandezas físicas, tais como temperatura, campos elétricos e magnéticos, possibilitando a substituição do sensoriamento humano em ambientes industriais.

2.2 INSTRUMENTAÇÃO

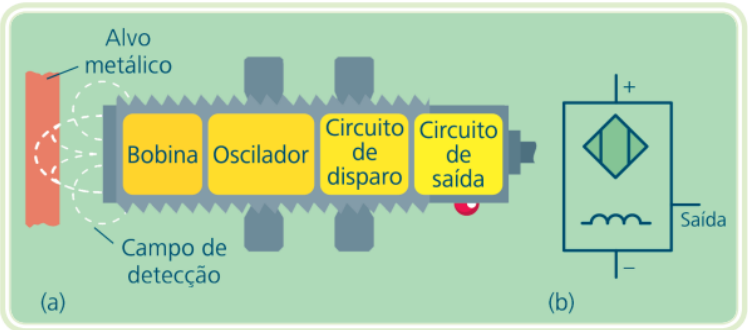
A instrumentação exerce uma função essencial nos processos industriais, ao fornecer medições precisas que possibilitam a análise comparativa entre diferentes abordagens operacionais. Essa função é viabilizada por meio do uso de sensores e dispositivos projetados para monitorar diversas grandezas físicas inerentes aos processos produtivos. O profissional especializado na área de instrumentação é responsável pelo projeto e pela seleção criteriosa dos sensores e instrumentos mais adequados, de modo a assegurar o desempenho e a confiabilidade dos sistemas automatizados (Fujisawa *et al.*, 2020).

Os sensores, por sua vez, desempenham papel central na detecção e, frequentemente, na quantificação de diferentes grandezas físicas. Esses dispositivos são capazes de converter variações em grandezas mecânicas, magnéticas, térmicas, ópticas e químicas em sinais elétricos, como tensão ou corrente elétrica. A classificação dos sensores é realizada com base na natureza da grandeza mensurada, sendo sua aplicação indispensável para o controle preciso e eficiente dos processos industriais modernos (Petruzella, 2014).

Os sensores indutivos são dispositivos eletrônicos capazes de detectar a proximidade de elementos metálicos sem a necessidade de contato físico direto. Seu princípio básico fundamenta-se na geração de um campo eletromagnético por meio de uma bobina ressonante posicionada na face ativa do sensor. Quando um objeto metálico se aproxima deste campo, ocorre uma absorção parcial da energia eletromagnética, resultando na redução da amplitude do sinal gerado pelo oscilador interno. Essa diminuição em relação ao valor de referência aciona o estágio de saída do sensor, indicando a presença do objeto metálico (Roggia; Fuentes, 2016).

A Figura 5 ilustra o diagrama funcional do sensor indutivo, bem como sua simbologia convencional utilizada em projetos e esquemas técnicos. A bobina interage com o alvo metálico por meio do campo de detecção gerado pelo oscilador, cujo sinal é processado pelo circuito de disparo e, posteriormente, pelo circuito de saída, que efetua o acionamento correspondente.

Figura 5: Diagrama e simbologia do sensor indutivo.

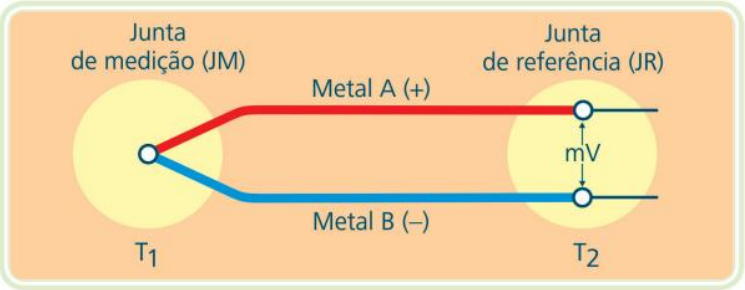


Fonte: adaptado de Roggia e Fuentes, 2016.

No que tange aos sensores de temperatura, os termopares configuram-se como os dispositivos mais empregados no meio industrial. O princípio de funcionamento desses sensores baseia-se na propriedade termoelétrica, segundo a qual a junção de dois metais distintos em um ponto denominado junta quente ou de medição (JM) gera uma força eletromotriz (tensão elétrica) na ordem de milivolts na outra extremidade, denominada junta fria ou de referência (JR), desde que esta última esteja submetida a uma temperatura diferente daquela existente na junta quente (Roggia; Fuentes, 2016).

O princípio operacional pode ser exemplificado na Figura 6, que ilustra as junções dos dois metais, identificando a junta de medição e a junta de referência, bem como o sinal de tensão gerado em milivolts, o qual é utilizado para a determinação da temperatura.

Figura 6: Princípio de funcionamento de um termopar.



Fonte: adaptado de Roggia e Fuentes, 2016.

A instrumentação pode ser integrada de forma eficiente aos processos de manutenção industrial para a aquisição sistemática de dados, gerando um volume substancial de informações relevantes para a tomada de decisão na área. A coleta de variáveis como temperatura, vibração, pressão e outras grandezas críticas permite o monitoramento contínuo do desempenho dos equipamentos, possibilitando a identificação precoce de padrões indicativos do surgimento de falhas ou anomalias.

2.3 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

De acordo com a norma ABNT NBR 5462:1994, manutenção é definida como o conjunto de ações técnicas e administrativas destinadas a conservar ou restaurar um item, de modo que este permaneça em condições adequadas de operação conforme os requisitos estabelecidos. Segundo Almeida (2016), a manutenção pode ser classificada em três categorias principais: corretiva, preventiva e preditiva. A manutenção preventiva consiste em uma estratégia voltada à prevenção de falhas, buscando evitar paradas inesperadas e a evolução de problemas incipientes para danos de maior gravidade. Sua implementação baseia-se na análise dos registros de manutenção corretiva e na estimativa da vida útil dos componentes, considerando a experiência acumulada pela organização. Essa abordagem permite não apenas antecipar falhas, mas também identificar defeitos potenciais que possam comprometer a durabilidade dos equipamentos, mesmo quando mascarados por sintomas manifestados em outras partes do sistema.

A estratégia de manutenção preventiva, conforme destacado por Gregório e Silveira (2018), oferece benefícios significativos para a gestão eficiente dos ativos industriais. Fundamentada na realização de intervenções planejadas em equipamentos que ainda não apresentaram falhas, essa abordagem visa prolongar a vida útil dos bens de capital, ao mesmo tempo em que reduz a probabilidade de falhas em componentes críticos.

De acordo com Seleme (2015), os benefícios proporcionados por essa estratégia são abrangentes e relevantes. A manutenção preventiva contribui para o aumento da durabilidade operacional dos equipamentos, reduz os custos de curto prazo ao evitar reparos emergenciais e promove a continuidade do processo produtivo, minimizando interrupções e, consequentemente, assegurando maior estabilidade na linha de produção. Além disso, possibilita a previsão das ações de manutenção a serem executadas, favorecendo o planejamento estratégico e a previsibilidade operacional.

Para a implementação eficaz de um plano de manutenção preventiva, conforme destacado por Gregório e Silveira (2018), é imprescindível a disponibilização de informações detalhadas, como o histórico de funcionamento dos equipamentos, registros de desempenho de máquinas similares e recomendações fornecidas pelos fabricantes. Adicionalmente, a execução dessa estratégia requer a atuação de profissionais qualificados, a utilização de instrumentos e ferramentas adequadas, além do comprometimento da gestão, entre outros fatores essenciais. Esses elementos são fundamentais para assegurar a eficácia da manutenção preventiva e a confiabilidade operacional dos ativos industriais. No contexto da automação do processo de beneficiamento de sementes, bem como da integração de um plano de manutenção preventiva e do desenvolvimento de telas para o sistema supervisório, torna-se necessária a utilização de uma plataforma de software que contemple funcionalidades de desenvolvimento e integração. Nesse sentido, destaca-se o TIA Portal como uma das soluções disponíveis no mercado, por oferecer recursos que viabilizam essas aplicações de forma integrada e eficiente.

2.4 SOFTWARE: TIA PORTAL SIEMENS

O TIA Portal (*Totally Integrated Automation*), desenvolvido pela Siemens e lançado em 2010, constitui uma plataforma integrada destinada à realização de tarefas de automação e controle de forma eficiente e intuitiva. Sua estrutura foi concebida para otimizar o desempenho das atividades de engenharia e proporcionar uma experiência de uso acessível tanto para iniciantes quanto para profissionais experientes na área. O ambiente unificado do TIA Portal permite a integração entre controladores programáveis (CLPs), interfaces homem-máquina (IHMs) e sistemas de acionamento, assegurando a consistência e integridade dos dados compartilhados em todas as etapas do ciclo de automação, desde a configuração inicial até o diagnóstico do sistema (Siemens, 2017).

Além disso, o TIA Portal oferece bibliotecas robustas que abrangem os principais componentes e funções da automação industrial, promovendo padronização e reutilização de código. Sua abordagem de engenharia integrada facilita a implementação de soluções em automação digital, englobando o planejamento digital, a

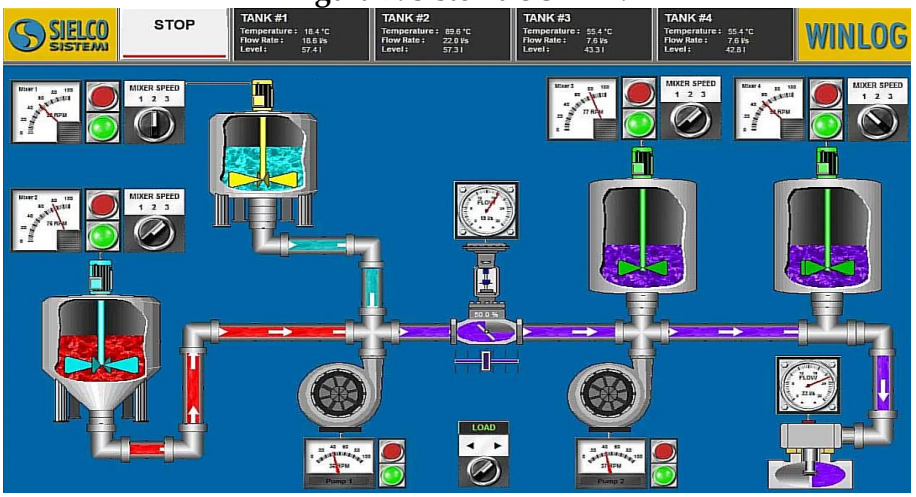
engenharia consolidada e a operação contínua. Quando utilizado em conjunto com o Digital Enterprise Software Suite, também da Siemens, o TIA Portal permite a integração com sistemas de PLM (*Product Lifecycle Management*) e MES (*Manufacturing Execution Systems*), promovendo uma abordagem abrangente e interconectada para a gestão do ciclo de vida do produto e da produção (Siemens, 2017).

Outrossim, Neves (2023) destaca que o TIA Portal desempenha um papel central no contexto da automação industrial, sendo amplamente utilizado em diversas etapas do ciclo de engenharia. A plataforma é aplicada no projeto, configuração, programação e operação de equipamentos e sistemas industriais, com aplicabilidade em distintos segmentos, tais como as indústrias alimentícia, química e farmacêutica. Por meio desse ambiente, torna-se viável o monitoramento e controle de variáveis críticas de processo, a exemplo de temperatura, pressão, vazão e nível.

Adicionalmente, o TIA Portal distingue-se por oferecer funcionalidades avançadas de controle, que possibilitam a implementação de lógicas complexas e customizadas, adaptáveis às particularidades de cada processo produtivo. Sua arquitetura permite a automação de praticamente qualquer máquina ou sistema, promovendo uma integração eficaz dos diversos elementos envolvidos. A plataforma também viabiliza o desenvolvimento de soluções específicas de controle, conforme os requisitos operacionais, e a construção de interfaces operacionais por meio de IHMs (Interfaces Homem-Máquina) e sistemas SCADA, garantindo a interação eficiente entre operadores e processos automatizados (Neves, 2023).

De acordo com Totvs (2023), o sistema SCADA opera de forma integrada por meio de três componentes fundamentais: uma rede de comunicação, um conjunto de equipamentos e sensores e um software de supervisão. O principal objetivo desse sistema é oferecer uma interface de alto nível aos operadores, disponibilizando informações em tempo real acerca de eventos críticos no ambiente industrial. Tal estrutura permite o monitoramento e a intervenção operacional no processo produtivo, promovendo uma gestão mais eficiente e centralizada das atividades industriais. Como ilustrado na Figura 10, o SCADA possibilita o controle abrangente de diferentes operações, otimizando a supervisão e a tomada de decisão por parte dos operadores.

Figura 7: Sistema *SCADA*.



Fonte: Adaptado de Sielco Sistemi, ([202?]).

Conforme destaca Fracttal (2022), os dados coletados por meio do sistema SCADA possibilitam o acompanhamento contínuo do desempenho das máquinas, permitindo a identificação antecipada de falhas potenciais e a realização de intervenções proativas pelas equipes de manutenção. Adicionalmente, a funcionalidade de configuração de alarmes e limites operacionais contribui para a detecção precoce de anomalias, aspecto fundamental para a eficácia da manutenção preventiva. Em termos operacionais, o SCADA promove não apenas o aumento da eficiência dos processos industriais, mas também a otimização da gestão da manutenção, resultando na redução do tempo de inatividade não programado e na diminuição dos custos operacionais.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um projeto de automação para uma linha de beneficiamento de sementes, integrado a um plano de manutenção preventiva inserido em um sistema de controle supervisório e aquisição de dados (SCADA). O projeto será implementado em ambiente de bancada, simulando uma Unidade de Beneficiamento de Sementes (UBS), com os acionamentos automatizados e aquisição de dados voltados à manutenção.

Os objetivos específicos deste trabalho estão enumerados a seguir:

1. Desenvolver um projeto de automação industrial com base no fluxograma do processo produtivo, utilizando o software TIA Portal, da Siemens;
2. Elaborar um plano de manutenção preventiva considerando recomendações de parada baseadas no tempo de operação dos equipamentos;
3. Integrar o sistema de automação e o plano de manutenção ao ambiente SCADA;
4. Realizar simulações em laboratório e gerar dados experimentais para validação do funcionamento do projeto.

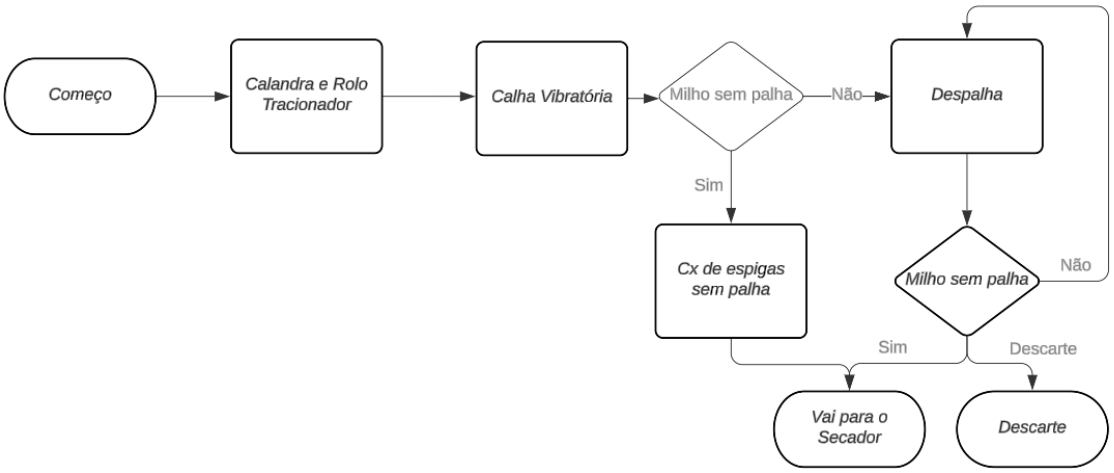
4 RESULTADOS

4.1 DESENVOLVIMENTO DA AUTOMAÇÃO POR CLP

Para o desenvolvimento de um sistema de automação industrial destinado a uma Unidade de Beneficiamento de Sementes (UBS), é imprescindível compreender o processo de beneficiamento, observando o fluxo produtivo e definindo a sequência de acionamento de cada equipamento da planta industrial. Com esse propósito, foi realizado um levantamento em indústrias que efetuam o beneficiamento de sementes de milho, visando obter um fluxograma produtivo que servirá como referência para a elaboração do projeto de automação.

Com o objetivo de otimizar a organização da planta industrial nos softwares de programação da automação e do sistema SCADA, a produção foi setorizada em três etapas principais: (i) recebimento das sementes; (ii) secagem e debulha; e (iii) classificação e ensaque. A Figura 8 apresenta o fluxograma do processo de beneficiamento de sementes, iniciado pelo recebimento das espigas de milho. Nessa etapa, as espigas são encaminhadas para a despalha, de modo que apenas as espigas sem palha sigam para o secador, elevando a eficiência do processo.

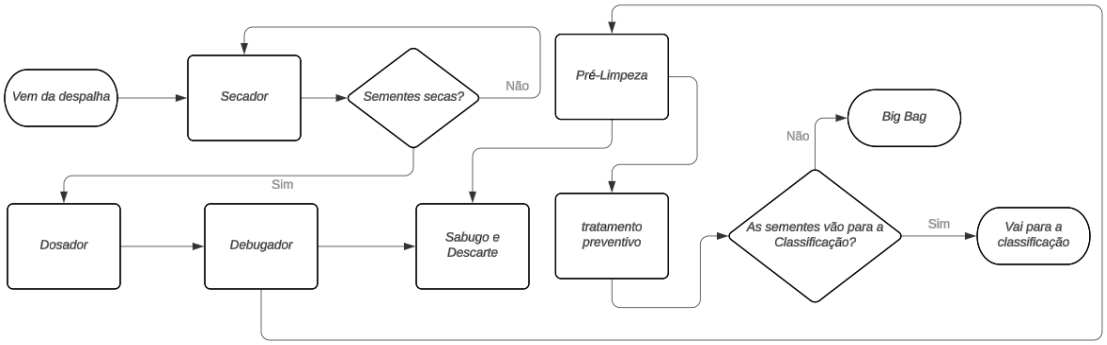
Figura 08: Fluxograma do recebimento.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

A Figura 9 dá continuidade ao processo apresentado na Figura 8, exibindo o fluxograma da etapa de secagem das espigas de milho já despalhadas. Em seguida, ocorre o processamento no debulhador, com o objetivo de separar as sementes dos sabugos. Apenas as sementes são direcionadas para a peneira, onde se inicia o processo de classificação dos grãos, enquanto os sabugos são descartados.

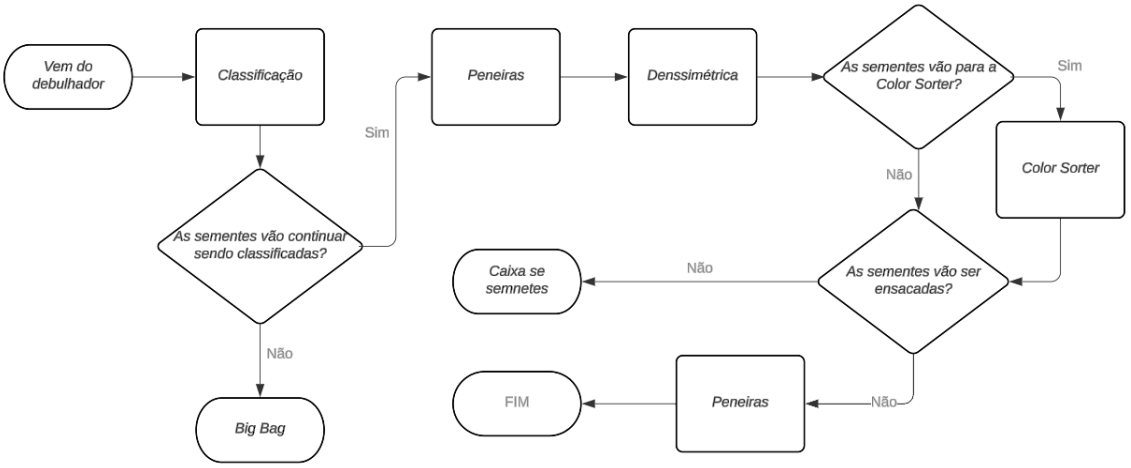
Figura 9: Fluxograma do secador e debulhador.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

A Figura 10 apresenta a etapa final do processo, correspondente à classificação dos grãos por meio de peneiras com diferentes calibres e à adição de agentes químicos, conforme o tratamento específico de cada tipo de semente. Após a classificação química, o beneficiamento pode ser encerrado, dependendo da qualidade do grão exigida, ou prosseguir com a classificação na mesa densimétrica, que separa as sementes de acordo com sua densidade. Em seguida, os grãos podem passar pelo *Color Sorter*, equipamento que realiza a classificação por cor. Por fim, as sementes são direcionadas para a caixa de armazenamento ou para o ensaque, concluindo o processo de beneficiamento.

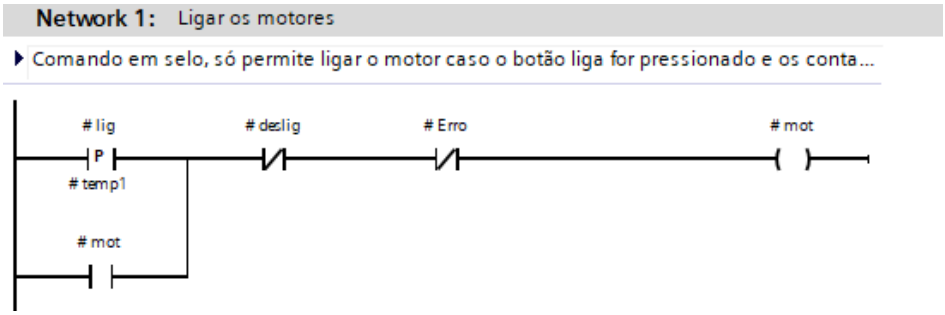
Figura 10: Fluxograma do secador e debulhador.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

Com o fluxo de produção definido, o passo seguinte consiste na descrição dos motores presentes na planta, estabelecendo nomenclaturas que facilitem a identificação dos equipamentos e agilizem a programação da lógica no software. Em seguida, realiza-se a programação desses motores no TIA Portal, utilizando o CLP Siemens S7-1214C DC/DC/DC, destinado ao processo de beneficiamento das sementes, conforme o fluxograma produtivo. A Figura 11 apresenta parte do diagrama lógico em *Ladder* utilizado no CLP para o controle dos motores. A *Network* 1 assegura que o motor somente seja acionado caso o comando de partida seja emitido e todas as condições operacionais estejam normais.

Figura 11: Programação *Ladder* dos motores



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO PLANO DE MANUTENÇÃO

O passo seguinte consiste na elaboração de um plano de manutenção preventiva, considerando o tempo de operação das máquinas desta UBS, conforme as recomendações dos fabricantes. Cada equipamento recebe manutenção de acordo com seu tempo de funcionamento, conforme apresentado no Quadro 1. Além disso, são

observados o tipo de atividade executada por cada motor e as respectivas observações de manutenção.

Quadro 1: Plano de manutenção por hora de operação.

Atividade	Periodicidade em horas	Observações
Inspeção visual geral do motor	40	Verificar possíveis vazamentos, corrosão ou danos externos.
Verificar nível de ruído e vibração	40	Identificar ruídos anormais ou aumento de vibração.
Limpeza externa do motor	40	Remover poeira, resíduos e partículas acumuladas.
Verificação do aperto de parafusos	150	Certificar-se de que os parafusos de fixação estão firmes.
Lubrificação de mancais e rolamentos	450	Seguir as especificações do fabricante do motor.
Inspeção das conexões elétricas	450	Verificar terminais de cabos e conectores para evitar mau contato.
Medição da corrente elétrica	450	Comparar com os valores de referência fornecidos pelo fabricante.
Verificação do alinhamento com a carga	900	Certificar que o motor está alinhado com o equipamento acionado.
Substituição da graxa dos rolamentos	1800	Usar graxa recomendada pelo fabricante.
Revisão geral do motor	1800	Realizar desmontagem, limpeza e análise interna, se necessário.

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

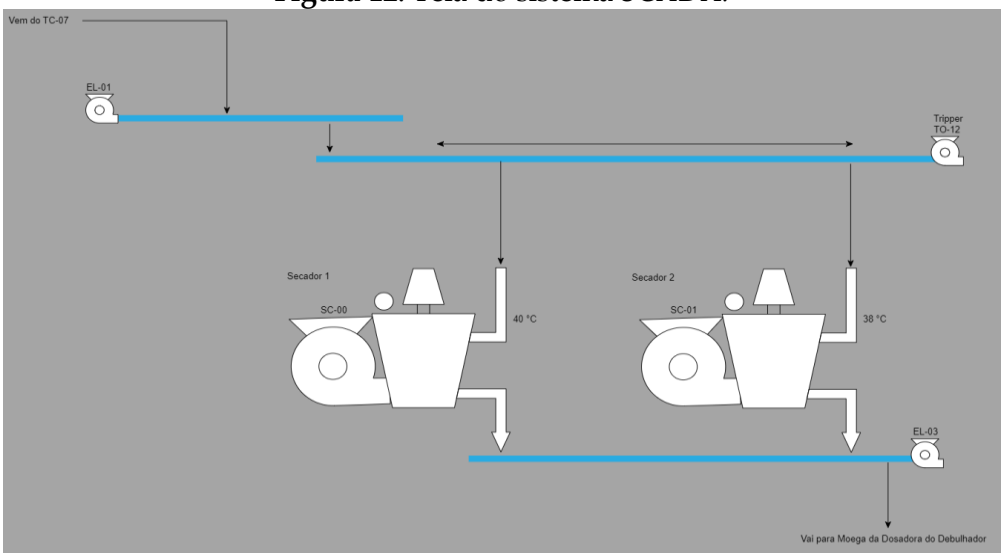
No sistema de automação, é emitido um aviso referente ao período programado para a manutenção de cada máquina. Quando o equipamento atinge esse limite, o sistema gera um alerta, informando o tipo de atividade a ser realizada e sua respectiva descrição, por meio do sistema SCADA. O operador pode optar por adiar a manutenção ou reiniciar a contagem do tempo de operação, caso a intervenção seja executada. Entretanto, caso os avisos para inspeção sejam ignorados, o sistema realizará o bloqueio da máquina.

4.3 DESENVOLVIMENTO DAS TELAS DO *SCADA*

No TIA Portal, também é realizado o desenvolvimento das telas do sistema supervisório, permitindo o controle centralizado dos motores presentes na planta

industrial, com monitoramento e acionamento de forma interativa e de fácil compreensão, seguindo o fluxograma produtivo estabelecido. A Figura 12 apresenta a tela referente aos secadores de sementes, conforme o fluxograma da UBS. Os motores são acionados por meio de um computador conectado ao CLP, utilizando redes industriais. Além do acionamento, o sistema supervisório realiza a coleta de dados relevantes para a manutenção, como o tempo de operação dos motores, parâmetro essencial para a execução do plano de manutenção preventiva.

Figura 12: Tela do sistema *SCADA.*



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

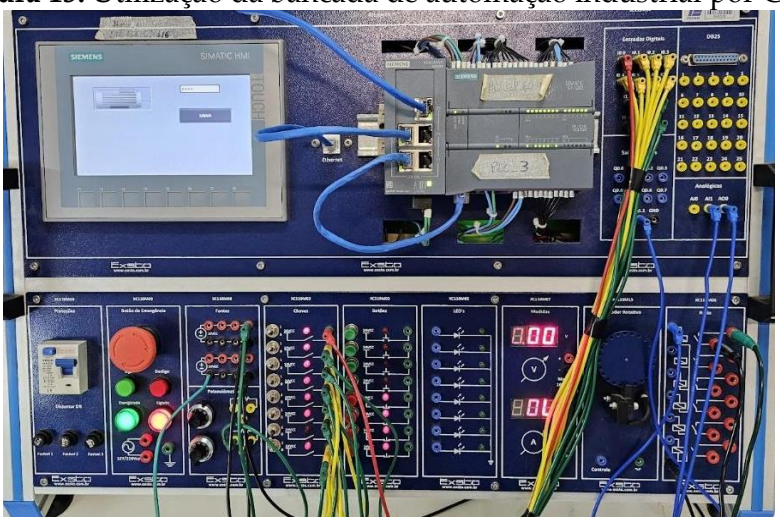
4.4 SIMULAÇÃO EM BANCADA

A simulação em bancada do sistema de automação industrial por meio de CLP tem como objetivo validar a lógica de programação e identificar possíveis falhas antes de sua implementação em ambiente real. Essa prática possibilita ajustes e otimizações no programa do CLP, assegurando que o sistema opere conforme o especificado. Ao integrar um plano de manutenção preventiva ao sistema de supervisão SCADA conectado ao CLP, torna-se viável monitorar em tempo real o desempenho dos equipamentos, detectar anomalias e realizar ações corretivas de forma proativa.

A simulação em bancada contribui para a definição dos parâmetros de monitoramento e alarmes do SCADA. Por meio da reprodução de diferentes cenários de operação e falhas, é possível configurar o sistema de supervisão para emitir alertas precisos e oportunos, auxiliando a tomada de decisão dos técnicos de manutenção.

A Figura 13 apresenta a bancada de automação industrial montada, composta por um CLP Siemens, IHM, módulos de entrada e saída, cabos de conexão e painel de controle. Essa estrutura possibilita a simulação de processos industriais reais, a programação de CLPs, a configuração de IHMs e o diagnóstico de falhas. Por meio dessa simulação, torna-se possível desenvolver e testar o projeto de automação, bem como capacitar profissionais para a manutenção de sistemas industriais.

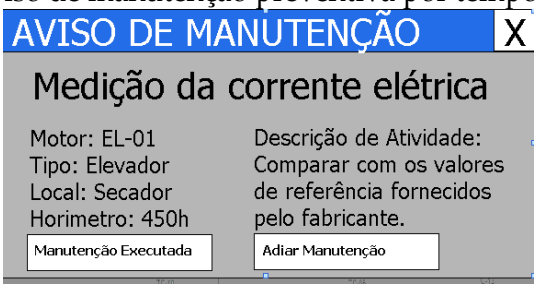
Figura 13: Utilização da bancada de automação industrial por CLP.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

A Figura 14 apresenta um aviso de manutenção referente ao motor do elevador localizado no secador. Esse aviso é emitido pelo sistema de automação por meio do SCADA. A atividade de manutenção consiste na medição da corrente elétrica do motor, com o objetivo de verificar seu correto funcionamento. O sistema permite registrar se a manutenção foi executada ou se será adiada.

Figura 14: Aviso de manutenção preventiva por tempo de operação.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conclusão deste projeto de desenvolvimento de um sistema de automação industrial, com sistema supervisório e plano de manutenção integrado para uma unidade de beneficiamento de sementes, foi satisfatória, atendendo plenamente aos objetivos inicialmente propostos. O sistema implementado demonstrou eficácia na automação do processo de beneficiamento, desde a recepção das sementes até a obtenção do produto final, assegurando maior produtividade e qualidade. Destaca-se, ainda, a centralização dos acionamentos, que resultou em melhor aproveitamento do tempo, eliminando a necessidade de acionamento manual das máquinas por meio dos painéis distribuídos na planta fabril.

A integração do sistema supervisório SCADA possibilitou o monitoramento em tempo real de todas as etapas do processo, favorecendo a rápida identificação de desvios

e a tomada de decisões assertivas. Além disso, o plano de manutenção preventiva, incorporado ao sistema, contribuiu para a longevidade dos equipamentos e para a confiabilidade do processo, reduzindo paradas não programadas e minimizando perdas de produção.

A implementação desse sistema trouxe benefícios expressivos para a UBS, como o aumento da eficiência operacional, a redução dos custos de produção, a melhoria da qualidade do produto final, o incremento da segurança dos operadores e o maior controle sobre o processo produtivo. Com a automação, foi possível padronizar procedimentos, reduzir a variabilidade dos produtos e atender com maior precisão às demandas do planejamento de produção.

Por fim, o projeto evidenciou a viabilidade e a relevância da automação industrial para o setor de beneficiamento de sementes. A combinação de hardware e software, associada a um planejamento criterioso nas áreas de produção e manutenção, resultou em um sistema eficiente, robusto e escalável, passível de adaptação a diferentes contextos e necessidades. Os resultados obtidos servem como referência para futuras implementações de sistemas de automação em outras unidades de beneficiamento, contribuindo para o avanço e a modernização do setor.

REFERÊNCIAS

ABB. **Linguagem Ladder**: principais fundamentos. ABB. 2022. Disponível em: https://loja.br.abb.com/blog/post/linguagem-ladder-principais-fundamentos.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade – instalações elétricas. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Manutenção Mecânica Industrial**: Princípios Técnicos e Operações. [*S. l.*]: Editora Saraiva, 2016.

BAYER, Fernando Mariano; ECKHARDT, Moacir; MACHADO, Renato. **Automação de Sistemas**. Santa Maria: E-tec Brasil, 2011.

CORMEN, Thomas H., LEISERSON, Charles E., RIVEST, Ronald L., STEIN, Clifford. **Algoritmos:** Teoria e Prática. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

FELGUEIRAS, Carlos Alberto. **Organização Estruturada de Computador**: nível da lógica digital - Parte I. 2003.

FERRARI, Fabricio; CECHINEL, Cristian. **Introdução a algoritmos e programação**. Bagé: Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, 2008. Disponível em: https://lief.if.ufrgs.br/pub/linguagens/FFerrari-CCechinel-Introducao-a-algoritmos.pdf.

FRACTTAL. **A transformação digital na manutenção**. 2022. Disponível em: https://www.fracttal.com/pt-br/blog/transformacao-digital-na-manutencao.

FUJISAWA, Cassio H. *et al*. I**nstrumentação e Automação Industrial**. Porto Alegre: SAGAH, 2022. Ebook. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556902081.

GREGÓRIO, Gabriela F P.; SILVEIRA, Aline M. **Manutenção industrial**. [*S. l.*]: Grupo A, 2018.

NATALE, Ferdinando. **Automação industrial**: Série Brasileira de Tecnologia. [*S. l.*]: Editora Saraiva, 2000.

NEVES, Dayane. **TIA Portal SIEMENS**: o que é para que serve. 2023. Disponível em: https://inetec.com.br/tia-portal-siemens-o-que-e-para-que-serve/.

PETRUZELLA, Frank D. **Controladores lógicos programáveis**. 4. ed. [*S. l.*]: Grupo A, 2014.

REVISTA FERRAMENTAL. **Automação industrial**: o que é, benefícios e tecnologias. 2022. Disponível em: https://www.revistaferramental.com.br/artigo/automacao-industrial-o-que-e-beneficios-e-tecnologias/.

ROGGIA, Leandro; FUENTES, Rodrigo Cardozo. **Automação industrial**. Santa Maria: Rede E-Tec Brasil, 2016. 102 p. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/12/06_automacao_industrial.pdf.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Softwares de automação industrial**. [202?]. Disponível em: https://www.se.com/br/pt/product-category/5100-softwares-de-automação-industrial/?filter=business-1-automação-e-controle.

SELEME, R. **Manutenção industrial**: mantendo a fábrica em funcionamento. Curitiba: Intersaberes, 2015.

SIELCO SISTEMI. **O que é SCADA**. [202?]. Disponível em: https://www.sielcosistemi.com/pt/o-que-é-scada.html.

SIEMENS. **Imprensa**: Siemens apresenta novidades do TIA Portal V15. 2017. Disponível em: https://www.siemens.com/br/pt/empresa/release/siemens-apresenta-novidades-do-tia-portal-v15.html.

TOTVS. **Entenda o que é SCADA e o seu papel dentro da indústria**. 2023. Disponível em: https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/scada/

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 174-194, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Comparativo entre soldagem GTAW e SMAW na soldagem de ferro fundido

Comparative study between GTAW and SMAW welding processes in cast iron welding

CLANDERSON HENRIQUE DA SILVA
Discente de Engenharia Mecânica (UNIPAM)
clandersonhenrique@unipam.edu.br

JANAÍNA APARECIDA PEREIRA
Professora orientadora (UNIPAM)
janainaap@unipam.edu.br

Resumo: Este trabalho realiza uma comparação entre técnicas de soldagem aplicadas ao ferro fundido, com ênfase nos processos GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), utilizando metal de adição, e SMAW (Shielded Metal Arc Welding), com eletrodo revestido. O objetivo é identificar qual técnica apresenta melhor aplicabilidade e qualidade em peças de ferro fundido nodular, material caracterizado por sua elevada resistência mecânica. Após uma revisão teórica sobre as propriedades do ferro fundido, o estudo analisa a soldabilidade do material, considerando dificuldades recorrentes, como trincas e porosidades. A metodologia envolveu a execução de soldagens em amostras sob condições controladas de temperatura, corrente elétrica e atmosfera de proteção gasosa. As juntas soldadas foram avaliadas por meio de inspeção visual, análise micrográfica e ensaios mecânicos. Os resultados indicam que a escolha do processo de soldagem é determinante para a integridade estrutural da peça: o processo GTAW proporciona melhor acabamento superficial, enquanto o SMAW apresenta desempenho superior em termos de resistência mecânica.
Palavras-chave: soldagem; manutenção; TIG; eletrodo revestido; engenharia mecânica.

Abstract: This study presents a comparison between welding techniques applied to cast iron, with an emphasis on the GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) process, using filler metal, and SMAW (Shielded Metal Arc Welding), using covered electrodes. The objective is to identify which technique offers better applicability and quality in ductile cast iron components—a material known for its high mechanical strength. After a theoretical review of the properties of cast iron, the study analyzes the weldability of the material, taking into account common issues such as cracking and porosity. The methodology involved performing welds on samples under controlled conditions of temperature, electrical current, and shielding gas atmosphere. The welded joints were evaluated through visual inspection, micrographic analysis, and mechanical testing. The results indicate that the choice of welding process is crucial for the structural integrity of the component: the GTAW process provides a superior surface finish, while the SMAW process delivers better performance in terms of mechanical strength.
Keywords: welding; maintenance; TIG; shielded electrode; mechanical engineering.

---

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Pereira, L. (2021), a soldagem é uma das técnicas fundamentais na indústria, desempenhando um papel crucial na união de diferentes materiais metálicos. Entre esses materiais, destaca-se o ferro fundido, cuja presença é notável devido às suas características particulares de resistência, durabilidade e versatilidade em diversas aplicações industriais.

Segundo Souza (2021), o ferro fundido é definido como uma liga metálica composta por ferro (Fe) e carbono (C), com teor de carbono superior a 2%. Considerando a influência do silício (Si) em sua estrutura, o ferro fundido é geralmente classificado como uma liga ternária Fe-C-Si, uma vez que o teor de silício costuma ser superior ao de carbono.

Conforme Li *et al*. (2018), o ferro fundido nodular desempenha um papel relevante em diversos setores industriais, como motores navais, máquinas-ferramenta, tubulações de pressão e válvulas industriais. Essa classe de ferro fundido é composta predominantemente por grafita, perlita e ferrita. Os nódulos de grafita, característicos desse material, são geralmente circundados por ferrita, formando uma estrutura esferoidal que confere ao material suas propriedades mecânicas específicas.

A indústria brasileira de ferros fundidos registra, em média, uma produção anual de aproximadamente 3.000.000 de toneladas, posicionando o Brasil na décima colocação no ranking mundial. Esse setor é responsável por cerca de 55.000 empregos diretos e apresenta um crescimento médio anual de aproximadamente 0,1% (ABIFA, 2019).

A soldagem do ferro fundido impõe desafios técnicos específicos, decorrentes de sua natureza frágil e da elevada suscetibilidade à formação de trincas durante o processo de soldagem. Diante disso, torna-se imprescindível investigar técnicas que proporcionem a melhor combinação entre desempenho mecânico, resistência estrutural e confiabilidade na união de componentes de ferro fundido (Pereira, L. 2021).

Além do mercado consolidado, as perspectivas futuras para a indústria e a aplicação do ferro fundido concentram-se nas novas possibilidades de uso. Conforme destacado por Feres [201?], a substituição do aço carbono por barras de ferro fundido nodular tem se mostrado uma alternativa vantajosa, contribuindo para a redução dos custos de fabricação e para o aumento da produtividade.

No decorrer deste estudo, busca-se contribuir para o avanço do conhecimento na área de soldagem de ferro fundido, fornecendo informações relevantes para engenheiros, fabricantes e demais profissionais da indústria interessados em alcançar soldagens de alta qualidade e eficiência em componentes fabricados com esse material.

Dessa forma, o objetivo geral desta pesquisa é avaliar, entre as técnicas de soldagem TIG e a soldagem com eletrodo revestido, qual apresenta melhor aplicabilidade em peças confeccionadas em ferro fundido nodular.

Para atingir tal objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão da literatura científica e técnica relacionada à soldagem de ferro fundido;
- Selecionar e preparar amostras representativas de ferro fundido a serem utilizadas nos experimentos de soldagem;

- Executar os procedimentos de soldagem utilizando as técnicas TIG e eletrodo revestido, sob condições pré estabelecidas;
- Avaliar a qualidade das juntas soldadas por meio de inspeção visual e ensaios metalográficos (micrografia);
- Analisar as propriedades mecânicas das juntas soldadas por meio de ensaios de tração e impacto.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 TIPOS DE FERRO FUNDIDO MAIS COMUNS

Modenesi (2008) classifica os ferros fundidos em três principais tipos: branco, cinzento e nodular. O ferro fundido branco é caracterizado pela ausência de grafita em sua estrutura microestrutural e por apresentar alto teor de cromo, o que lhe confere elevada resistência ao desgaste. Por essa razão, é empregado em componentes que exigem resistência à abrasão e demandam mínima usinagem após a fundição (Vidal, 2013).

De acordo com Reis (2021), o ferro fundido cinzento apresenta grafita livre em sua microestrutura, o que proporciona boa usinabilidade, alta fluidez, baixo custo de produção e facilidade de fabricação. Trata-se de um material amplamente utilizado nas indústrias de máquinas, automotiva, ferroviária e naval.

Por sua vez, o ferro fundido nodular, conforme descrito Souza (2021), apresenta o carbono na forma de grafita esferoidal, em uma matriz metálica que pode ser ferrítica, perlítica ou mista. Esse tipo de ferro fundido destaca-se por sua elevada ductilidade, resistência mecânica, alto módulo de elasticidade, boa usinabilidade, resistência à corrosão e facilidade de fundição.

No quadro 1 encontram-se as propriedades de resistências mecânicas dos ferros fundidos.

Quadro 1: Relação tipos de ferro fundido e suas propriedades mecânicas

Tipo	Microestrutura da matriz	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)
Cinzento	Ferrítica-perlítica	-	125	-
Cinzento	Perlítica	-	275	-
Maleável	Ferrítica	225	345	10
Maleável	Perlítica	350	480	5
Nodular	Ferrítica	275	415	18
Nodular	Perlítica	380	550	6

Fonte: Silva *et al.*, 2015.

Os ferros fundidos apresentam propriedades mecânicas comparáveis às dos aços estruturais, embora possuam um teor de carbono significativamente mais elevado, o que dificulta sua soldabilidade (Silva *et al.*, 2015). No Quadro 2, os autores referenciados apresentam a composição química típica dos diferentes tipos de ferro fundido.

Quadro 2: Composição química (% em peso) de ferros fundidos não ligados

Tipos	C	Si	Mn	S	P
Branco	1,8-3.6	0.5-1.9	0.25-0.8	0.06-0.2	0.06 -0.2
Maleável	2,2-2.9	0.9-1.9	0.15-1.2	0.02-0.2	0.02-0.2
Cinzento	2,5 a 4	1,0 a 3,0	0,20 a 1, 0	0,2 a 0,25	0.02-1.0
Nodular	3,0-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
Vermicular	2,5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1

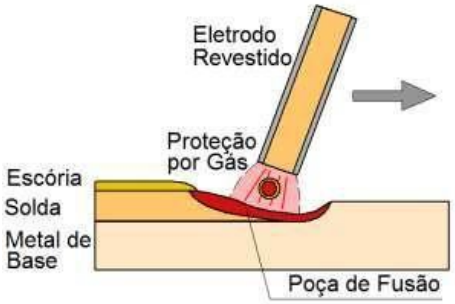
Fonte: Silva *et al.*, 2015.

Segundo Silva *et al*. (2015), a classificação do ferro fundido pode ser determinada a partir da análise de sua estrutura metalúrgica e do teor de carbono presente na liga. Com base nessas informações, torna-se possível selecionar o processo de soldagem mais adequado, bem como definir os procedimentos complementares necessários, tais como o preaquecimento e o tratamento térmico para alívio de tensões residuais.

2.2 SOLDAGEM POR ELETRODOS REVESTIDOS

O eletrodo utilizado na soldagem apresenta um núcleo metálico, chamado "alma", responsável pela condução da corrente elétrica e pelo fornecimento do metal de adição. O revestimento do eletrodo tem a função de gerar escória e gases de proteção, que estabilizam o arco elétrico e evitam a contaminação da poça de fusão. Além disso, esse revestimento pode influenciar diretamente a composição química e as propriedades mecânicas da junta soldada (Modenesi; Marques; Santos, 2012).

Figura 1: Soldagem com eletrodo revestido



Fonte: Modenesi, Marques e Santos, 2012.

Segundo Tigre Júnior e Folha (2020), a soldagem com eletrodo revestido, também conhecida como processo SMAW (Shielded Metal Arc Welding), utiliza um arco elétrico para fundir o eletrodo, formando o cordão de solda e, simultaneamente, promovendo a proteção da poça de fusão contra contaminações atmosféricas por meio

da geração de escória e gases oriundos do revestimento. A especificação dos eletrodos empregados na soldagem de ferro fundido é regulamentada pela norma AWS A5.15-69, a qual também estabelece as faixas recomendadas de corrente elétrica para aplicação, conforme ilustrado no Quadro 3.

Quadro 3: Processos de soldagem para ferro fundido

AWS Classe	Tamanho do eletrodo (in)			Polaridade
	1/8	5/32	3/16	
ECI	150 – 175 A		175 – 200 A	DCRP ou AC
Est	80 – 100 A			DCRP ou AC
Eni- CI	60 – 110 A	100 – 135 A		DCRP
	65 - 120 A	110 – 150 A		AC
EcuSn-c	50 - 125 A	70 - 170 A	90 - 220 A	DCRP

Fonte: Bueno, 2016.

Segundo Bueno (2016), os eletrodos listados no Quadro 3 dividem-se em grupos conforme sua aplicação específica. O grupo ECI oferece soldas semelhantes ao metal base, mas exige alto pré-aquecimento. O grupo EST é ideal para baixo custo e alta resistência, embora as soldas não sejam usináveis. Já o grupo ENI produz soldas usináveis e dúcteis, mas com menor resistência na zona de fusão e custo elevado devido ao níquel.

2.3 SOLDAGEM TIG

De acordo com Tigre Júnior e Folha (2020), o processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível para estabelecer o arco elétrico, gerando o calor necessário para fundir e unir os metais, inclusive o ferro fundido. No entanto, devido à elevada fragilidade dessa liga, as soldas obtidas por esse processo são suscetíveis à formação de fissuras, o que demanda cuidados específicos para obter bons resultados.

Figura 2: Processo de soldagem TIG

Fonte: Marques *et al.*, 2012.

Conforme destaca Tigre Júnior e Folha (2020), na soldagem de ferro fundido devem ser utilizadas varetas de ligas à base de níquel, devido à sua similaridade de coeficiente de dilatação térmica em relação ao metal base, o que contribui para a redução

das tensões residuais e da ocorrência de trincas. No processo de soldagem a quente, recomenda-se o aquecimento das peças entre 400 °C e 500 °C, seguido de um resfriamento lento e uniforme, a fim de evitar a formação de trincas por choque térmico. Segundo Silva (2017), o aumento brusco da temperatura em seções delgadas pode ocasionar a formação de ferro fundido branco, uma microestrutura indesejável em que a cementita não se decompõe em grafita. O processo de soldagem deve seguir normas técnicas específicas, como a NBR 14842:2016, que trata da qualificação de procedimentos de soldagem, e a NBR ISO 3834, referente aos requisitos de sistemas de gestão da qualidade para processos de soldagem. Além disso, as normas ISO 15614-2 e ASTM A159 estabelecem critérios e métodos para a realização de ensaios e a verificação de requisitos técnicos aplicáveis à soldagem e às fundições em ferro fundido.

2.4 DEFEITOS DE SOLDAGEM EM FERRO FUNDIDO

A descontinuidade na solda é definida como uma interrupção na estrutura esperada de uma junta soldada, comprometendo sua integridade e desempenho. Tais imperfeições podem ser provocadas por diversos fatores, como a falta de homogeneidade do material base, as propriedades metalúrgicas da liga e as condições do processo de soldagem. No caso do ferro fundido, as soldas apresentam elevada suscetibilidade a defeitos, sendo os mais recorrentes: trincas, porosidades, inclusões de escória e falta de fusão (Modenesi, 2008).

2.5 TRINCAS

As trincas a quente ocorrem durante o resfriamento do metal fundido após a soldagem, causadas pela contração do material. Para evitá-las, é essencial utilizar técnicas de pré-aquecimento e pós-aquecimento controlados. Trincas a frio podem se desenvolver após a soldagem, mesmo que a peça pareça estar em boas condições inicialmente. Elas surgem devido a tensões residuais e podem aparecer horas ou dias depois. Para sua prevenção, recomenda-se a elaboração de um planejamento adequado do procedimento de soldagem, associado a um resfriamento gradual e uniforme da peça (Souza, 2018).

2.6 POROSIDADE

A porosidade ocorre quando bolhas de gás ficam presas no metal solidificado, pode ser causado por contaminantes como umidade, óleo, sujeira ou oxidação, a limpeza adequada das superfícies, o uso de materiais de adição limpos e a proteção adequada do arco de soldagem podem minimizar a porosidade (Mol; Silva, 2016).

2.7 INCLUSÕES DE ESCÓRIA OU MATERIAL NÃO FUNDIDO

De acordo com Tigre Júnior (2020), inclusões de escória ou de materiais não fundidos podem ser incorporadas à zona fundida durante o processo de soldagem, caracterizando descontinuidades que comprometem as propriedades mecânicas da junta

soldada. A ocorrência desse tipo de defeito pode ser minimizada por meio da limpeza adequada das superfícies, bem como da correta seleção dos parâmetros de soldagem e dos sistemas de proteção do arco.

2.8 FALTA DE FUSÃO OU PENETRAÇÃO INADEQUADA

Segundo Souza (2018), a falta de fusão ocorre quando o material de adição ou o metal base não se fundem adequadamente, resultando em ligações frágeis ou descontínuas. Para evitar esse tipo de descontinuidade, é necessário ajustar corretamente parâmetros como a corrente de soldagem, a velocidade de avanço e o ângulo do eletrodo. Modenesi (2001) complementa que, devido à elevada suscetibilidade do ferro fundido à formação de trincas, é imprescindível adotar técnicas de controle térmico, como a soldagem em etapas e o resfriamento lento, além de contar com a atuação de profissionais qualificados para assegurar a integridade da junta soldada.

2.9 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

De acordo com Lopes *et al.* (2023), os ensaios não destrutivos (END) permitem identificar descontinuidades em materiais sem alterar suas propriedades. Andreucci (2010) destaca que esses ensaios são ferramentas essenciais na engenharia para controlar a qualidade de materiais e produtos, garantindo maior confiabilidade nos processos.

2.10. LÍQUIDOS PENETRANTES

O ensaio por líquidos penetrantes é usado para detectar descontinuidades superficiais abertas na superfície do material, baseando-se no princípio da capilaridade. Essa técnica, sensível a pequenos defeitos, identifica problemas como trincas, costuras, laminações, sobreposições e falhas causadas por fadiga ou corrosão sob tensão (Andreucci, 2012).

A aplicação do ensaio por líquido penetrante deve seguir uma sequência específica: inicialmente, utiliza-se o limpador ou removedor; em seguida, aplica-se o líquido penetrante; e, por fim, o revelador. Este método é restrito à detecção de descontinuidades abertas na superfície do material, uma vez que o líquido precisa penetrar nas falhas para que possam ser reveladas adequadamente.

Figura 3: Ensaio não destrutivo por Líquido Penetrante

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

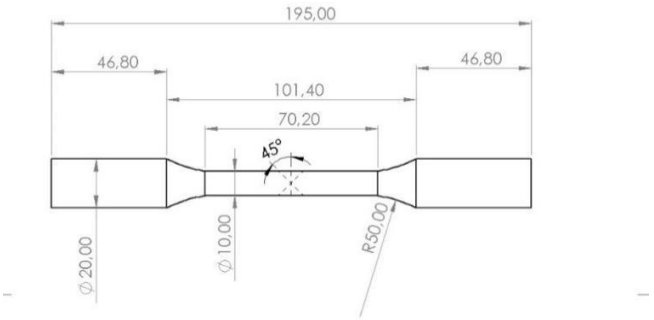
2.11 ENSAIOS DESTRUTIVOS

De acordo com Coroa (2023), os ensaios mecânicos destrutivos são caracterizados por deixarem marcas ou danos permanentes nos materiais após sua realização, sendo amplamente utilizados na indústria para a análise de falhas e verificação do comportamento mecânico dos materiais. Entre os tipos mais comuns, destacam-se os ensaios de tração, dobramento e cisalhamento. Zolin (2011) ressalta que, mesmo quando os danos aparentes são mínimos, como ocorre no ensaio de dureza, o material torna-se inutilizável, uma vez que as marcas geradas podem atuar como concentradores de tensões, favorecendo o surgimento de falhas estruturais.

2.11.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração tem como objetivo avaliar a resistência mecânica e a ductilidade da junta soldada. Em geral, para juntas de baixa espessura, o corpo de prova é retirado transversalmente ao cordão de solda (Madeira; Modenesi, 2010), conforme ilustrado na Figura 5. O procedimento consiste em submeter o metal base (MB) a um esforço uniaxial de tração progressiva até o ponto de ruptura.

Figura 5: Desenho técnico para confecção de corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: adaptado da norma ISO 6892-1:2013.

Segundo Castro *et al.* (2017), a ruptura do corpo de prova pode ocorrer tanto no metal base (MB) quanto no metal de solda (MS), sendo analisados, para fins de avaliação da viabilidade da solda, o limite de resistência (LR) e o alongamento (AL). Quando a ruptura ocorre no MB, a junta soldada não é submetida ao seu limite máximo de resistência, o que inviabiliza comparações precisas entre as propriedades mecânicas da solda e do material de base. Por outro lado, quando a fratura ocorre na junta, os resultados obtidos sofrem influência direta da deformação do MB.

2.11.2 Ensaio de impacto (Charpy)

Pereira, B. (2020) explica que o ensaio de impacto do tipo Charpy tem como objetivo avaliar a tenacidade dos materiais ao submetê-los a um golpe de pêndulo em um corpo de prova entalhado, sendo a energia absorvida determinada com base no movimento residual do pêndulo após o impacto. Realizado em diferentes temperaturas,

o teste permite distinguir rupturas frágeis das dúcteis, sendo amplamente utilizado na certificação de aços e em aplicações industriais que exigem segurança estrutural. Segundo Guesser (2009), conforme estabelecido pela norma ISO 1083/JS350-22RT/S, a resistência ao impacto do ferro fundido nodular à temperatura ambiente apresenta, em média, um valor de 17 J, conforme demonstrado no Quadro 4.

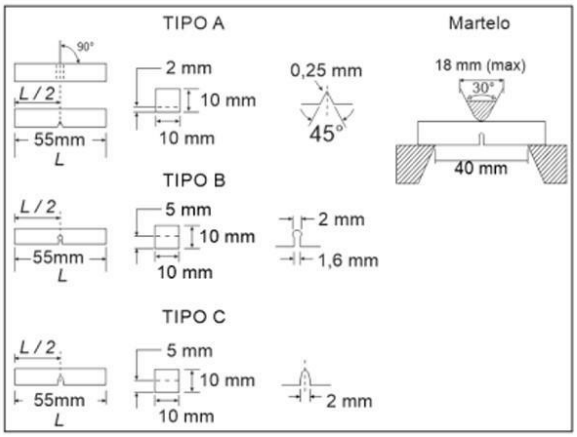
Quadro 4: Resistência ao impacto

	Valores mínimos de resistência ao impacto, em Joules					
	À temperatura ambiente 18-28°C		a −20°C		a −40°C	
	média de 3 ensaios	Valor mínimo	média de 3 ensaios	Valor mínimo	média de 3 ensaios	Valor mínimo
ISO1083/JS/350-22-LT/S	-	-	-	-	12	9
ISO1083/JS/350-22-RT/S	17	14	-	-	-	-
ISO1083/JS/400-18-LT/S	-	-	12	9	-	-
ISO1083/JS/400-18-RT/S	14	11	-	-	-	-

Fonte: Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos, Guesser, 2009.

De acordo com a norma ASTM E-23, conforme descrito por Cardoso (2023), os corpos de prova utilizados no ensaio de impacto do tipo Charpy são classificados em três categorias, com base no formato do entalhe: o tipo A apresenta um entalhe em "V", com ângulo de 45° e profundidade de 2 mm; o tipo B possui um entalhe cilíndrico em forma de "chave de fechadura"; e o tipo C apresenta um entalhe em "U", com 2 mm de diâmetro na extremidade e 5 mm de profundidade. Neste estudo, foi adotado o corpo de prova tipo A, considerado adequado para materiais de menor resistência mecânica, conforme a recomendação do autor.

Figura 6: Desenho técnico para confecção do corpo de prova para ensaio Charpy



Fonte: Medidas recomendadas pela ASMT E-23, Cardoso, 2023.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa, de natureza experimental e bibliográfica, conduziu as etapas de usinagem, pré-aquecimento, soldagem, ensaios de resistência mecânica e análises micrográficas foram realizadas nos Laboratórios de Processos de Fabricação,

Resistência dos Materiais e Ciência e Tecnologia dos Materiais do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), situado no Bloco I, no município de Patos de Minas, MG.

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O Quadro 5 apresenta a quantidade de amostras confeccionadas, a partir de uma barra de ferro fundido nodular fornecida pelo UNIPAM. Esse tipo de ferro fundido é amplamente utilizado na fabricação de peças e componentes de diversos equipamentos e máquinas, em função de suas propriedades mecânicas favoráveis.

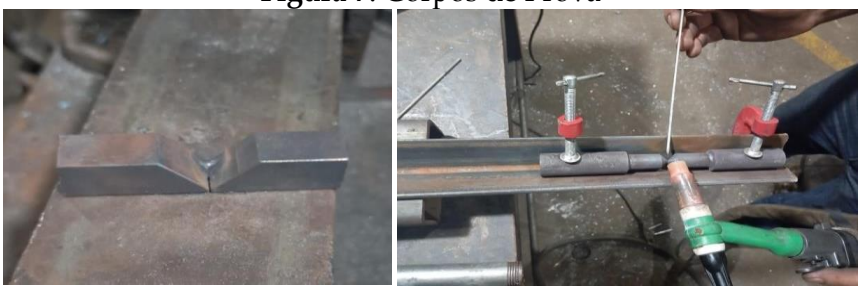
Quadro 5: Quantidade de amostras confeccionadas

Tração	Quantidade	Charpy	Quantidade
Eletrodo	3	Eletrodo	3
TIG	3	TIG	3

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com os desenhos técnicos apresentados nas Figuras 5 e 6, correspondentes, respectivamente, aos ensaios de tração e de impacto Charpy. A usinagem foi realizada utilizando uma fresadora KONE, modelo KFU2 (Apêndice – Figura 1A), para os corpos de prova destinados ao ensaio Charpy, e um torno mecânico Clever L-1640 (Apêndice —Figura 1B) para os corpos de prova do ensaio de tração, em conformidade com as normas técnicas aplicáveis. Os chanfros para a soldagem foram executados com ângulos de 45°, conforme padrão técnico. A Figura 7 apresenta os corpos de prova prontos para o processo de soldagem.

Figura 7: Corpos de Prova



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Após o processo de usinagem, as amostras foram submetidas ao pré-aquecimento em um forno tipo mufla, conforme ilustrado na Figura 8. As amostras permaneceram a uma temperatura de 500 °C por 20 minutos. Tal procedimento segue a recomendação de Júnior Tigre e Folha (2020), segundo a qual, na soldagem a quente, as peças devem ser aquecidas entre 400 °C e 500 °C, sendo imprescindível um resfriamento uniforme e lento após a soldagem. Essa etapa é fundamental para evitar contrações térmicas abruptas que podem ocasionar fissuras no material.

Figura 8: Mufla ou forno mufla

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Após o aquecimento, as amostras foram soldadas utilizando a fonte de soldagem multiprocessos ESAB EMP 215ic, pertencente ao Laboratório de Processos de Fabricação do UNIPAM, conforme ilustrado na Figura 9. Todas as amostras foram soldadas imediatamente após a retirada do forno, de modo a preservar a temperatura adequada para o procedimento de soldagem a quente.

Figura 9: Fonte de solda ESAB EMP 215ic

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Metade das amostras foi soldada pelo processo SMAW, utilizando eletrodo revestido com alma de níquel puro (2,5 × 210 mm) e três faixas de corrente: 70 A, 80 A e 90 A. A outra metade foi submetida ao processo TIG (GTAW), empregando varetas de níquel puro com as mesmas dimensões e faixas de corrente. A seleção dessas intensidades de corrente baseou-se em testes preliminares, que permitiram determinar os limites operacionais aceitáveis para este estudo.

Figura 10: Eletrodo com alma de níquel puro, OK 92.18

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Após a soldagem, iniciaram-se os testes e análises da resistência das juntas soldadas, com a aplicação preliminar de ensaios não destrutivos. A primeira etapa consistiu na inspeção visual das regiões soldadas, com o objetivo de descartar quaisquer amostras que apresentassem descontinuidades ou trincas visíveis a olho nu, conforme demonstrado na Figura 11.

Figura 11: Corpos e prova soldados, análise visual

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Todos os corpos de prova foram confeccionados com sobremetal, de modo a permitir nova usinagem após a soldagem, garantindo uniformidade nas dimensões de diâmetro e comprimento, conforme ilustrado na Figura 2 do Apêndice. Após essa etapa e a realização da inspeção visual, aplicou-se o ensaio por líquido penetrante, com o uso de revelador específico, a fim de identificar fraturas ou trincas não detectadas na análise inicial, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12: Analise com líquido penetrante

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

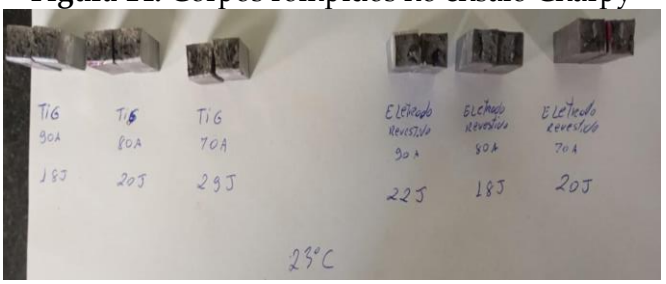
Com as amostras devidamente inspecionadas, iniciaram-se os ensaios mecânicos destrutivos, sendo o primeiro o ensaio de tração. Para esse procedimento, foi utilizada uma máquina universal de ensaios do modelo EMIC, conforme ilustrado na Figura 3(A) do Apêndice. A Figura 13 apresenta os corpos de prova após a fratura provocada pelo ensaio.

Figura 13: Corpos de prova tracionados

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Após os ensaios de tração, foram realizados os ensaios de resistência ao impacto, utilizando o equipamento Pêndulo de Impacto Penamatec ATMI, conforme apresentado na Figura 3(B) do Apêndice. O ensaio foi conduzido com um martelo capaz de aplicar uma energia de impacto de até 300 Joules. A Figura 14 mostra os corpos de prova fraturados em decorrência do ensaio Charpy.

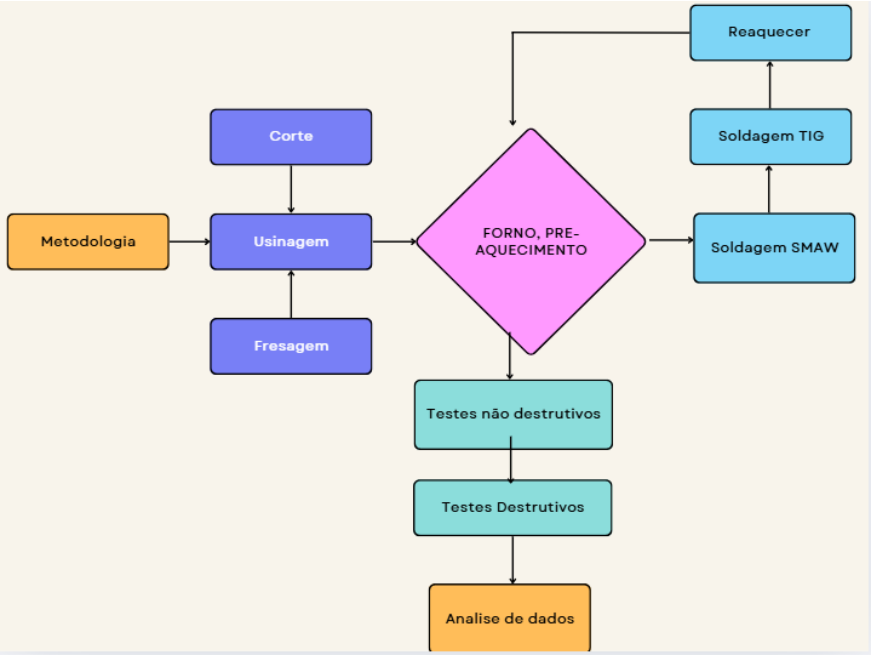
Figura 14: Corpos rompidos no ensaio Charpy



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

A Figura 15 apresenta o fluxograma da metodologia empregada, conforme descrito anteriormente.

Figura 15: Fluxograma da metodologia



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciaram que, durante os ensaios, o processo de soldagem TIG apresentou superioridade no acabamento dos cordões, demonstrando boa qualidade visual e ausência de defeitos aparentes. Em contrapartida, as juntas soldadas pelo processo de eletrodo revestido (SMAW) apresentaram irregularidades, como respingos, presença de escória, falta de fusão e porosidade — defeitos mais recorrentes nas amostras soldadas com corrente de 70 A. Tais falhas foram confirmadas por meio dos ensaios com líquido penetrante e observação das fraturas.

Observou-se, ainda, que o tratamento térmico adequado, especialmente o pré-aquecimento e o resfriamento controlado, foi determinante para o sucesso dos processos de soldagem, uma vez que nenhuma das amostras apresentou trincas ou descontinuidades nas juntas soldadas ou nas zonas termicamente afetadas (ZTA).

O Quadro 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração e impacto (Charpy). De acordo com a norma ISO 15614-1, a tensão de ruptura das juntas soldadas não deve ser inferior ao limite mínimo de resistência à tração do material base, que, no caso do ferro fundido nodular, é de 380 MPa. Quanto à resistência ao impacto, segundo a norma ISO 1083/JS350-22RT/S, o valor médio aceitável, à temperatura ambiente, é de 17 J.

Quadro 6: Resultados dos ensaios destrutivos

Número das amostras e corrente de soldagem (A)	**Tipos de Soldagem**	**Resistência à tração [MPa]**	**Limite de escoamento [MPa]**	**Energia Absorvida (Charpy) [J]**
(1) 90A	TIG	281,64	279,48	18
(2) 80A	TIG	339,95	280,88	20
(3) 70A	TIG	346,07	306,47	29
(1) 90A	ELETRODO	351,29	326,33	22
(2) 80A	ELETRODO	213,39	205,37	18
(3) 70A	ELETRODO	91,38	33,75	20
Média total dos ensaios Chapy				21

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Os dados apresentados no Quadro 6 indicam que o processo de soldagem por eletrodo revestido (SMAW) demonstrou-se mais vantajoso quando aplicado com corrente elétrica adequada. A amostra 1, soldada com 90 A, obteve um valor de 351,29 MPa no ensaio de tração, aproximando-se do limite mínimo estabelecido pela norma para o ferro fundido nodular (380 MPa). Esse processo mostrou-se eficiente para aplicações em áreas extensas, dada sua maior rapidez de execução. No entanto, em regiões de menor dimensão, observou-se dificuldade na remoção da escória e de impurezas, principalmente quando utilizadas correntes mais baixas, o que resultou em inclusões de escória e falhas de fusão.

Por sua vez, o processo de soldagem TIG (GTAW), apesar de mais lento, proporcionou cordões de solda mais limpos, com ausência de escória e menor incidência de defeitos de fusão. Nos ensaios de tração, a amostra soldada com corrente de 70 A apresentou o melhor desempenho. As amostras soldadas com 80 A e 90 A, contudo, mostraram queda de resistência, atribuída à formação de zonas de aquecimento excessivo. Conforme evidenciado na revisão bibliográfica, esse superaquecimento pode promover a transformação da estrutura do ferro fundido nodular em ferro fundido branco, reduzindo significativamente sua resistência à tração do material.

Os ensaios de resistência à tração apresentaram resultados inferiores aos limites estabelecidos pelas normas de referência. Contudo, os ensaios de impacto Charpy demonstraram desempenho satisfatório, com média de 21 J. Destacou-se, nesse contexto, a amostra soldada pelo processo TIG com corrente de 70 A, que apresentou os melhores

resultados de tenacidade. As Figuras 5, 6 e 7 do apêndice ilustram os gráficos de tensão versus deformação obtidos nos ensaios de tração.

Dessa forma, conclui-se que, sob condições controladas de pré-aquecimento, soldagem e resfriamento, ambas as técnicas analisadas (SMAW e TIG) apresentam aplicabilidade mínima aceitável para intervenções de manutenção ou recuperação de componentes fabricados em ferro fundido nodular.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que ambas as técnicas de soldagem analisadas – TIG (GTAW) e eletrodo revestido (SMAW) – apresentaram características relevantes e aplicabilidades distintas, a depender das condições operacionais e do objetivo do processo. O processo TIG, embora mais lento e com custos elevados devido ao uso de gás inerte e à necessidade de maior qualificação técnica, demonstrou ser adequado para aplicações de menor escala, nas quais se exige melhor acabamento superficial e maior controle da qualidade da solda, evidenciado pela ausência de defeitos como inclusões de escória ou falta de fusão.

Por outro lado, o processo de soldagem com eletrodo revestido apresentou-se mais vantajoso para aplicações de maior porte, especialmente quando operado em faixas de corrente adequadas. Sua simplicidade operacional, menor custo e maior produtividade fazem dele uma alternativa economicamente viável, sobretudo quando se considera a necessidade de recuperação ou manutenção de peças em ferro fundido nodular.

Embora os resultados dos ensaios de tração tenham se mostrado abaixo dos limites estabelecidos pelas normas de referência para ambas as técnicas, o processo de eletrodo revestido obteve desempenho superior, sobretudo em termos de custo-benefício e resistência mecânica relativa. Assim, com base nos parâmetros experimentais adotados neste estudo, a soldagem de ferro fundido nodular utilizando eletrodo revestido demonstrou ligeira vantagem em relação ao processo TIG.

REFERÊNCIAS

ABIFA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Relatório de desempenho do setor de fundição** — dezembro/ 2020. Disponível em: https://www.abifa.org.br.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A159**: Standard Specification for Automotive Gray Iron Castings. Pennsylvania: ASTM, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**. ASTM-G E190-92**. Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds. American Society for testing and Materials. West Conshohocken, 2008.

ANDREUCCI, Ricardo. **Líquidos penetrantes**. ABENDI, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 13187**: requisitos da qualidade para soldagem por fusão de materiais metálicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 13187**: tratamentos térmico e termoquímico de ferro fundido – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 14842**: soldagem - critérios para a qualificação e certificação de inspetores para o setor de petróleo e gás, petroquímico, fertilizante (exceto nucleares). Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR ISO 6892-1**: materiais metálicos-ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. 2013.

BUENO, Alex Fabiano. **Utilização de insertos com agregado sólido de lubrificantes confeccionados por metalurgia do pó convencional**. 2016. 97 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/134921.

CARDOSO, Vinicius Sales. **Análise por elementos finitos de um corpo de prova Charpy-V de um aço API 5CT N80Q**. 2023. 72 p. TCC (Graduação Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2023. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/242500.

CASTRO, Nara Linhares B. *et al*. Ensaios para determinação de resistência em juntas soldadas. **Revista Construindo**, v. 09, n. 02, p. 57, dez. 2017. Disponível em: https://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/5759.

COROA, Edgar Bergo. **Ensaios destrutivos e não destrutivos em cordão de solda a gás inerte com eletrodo de tungstênio na fabricação de tanques de aquecedor solar com espessura de chapa reduzida**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/19700.

FERES, Fernanda. Ferro fundido nodular pode substituir o aço carbono: utilização de barras de ferro fundido nodular na fabricação de componentes originalmente produzidos com aço resulta em redução de custos. **O mundo da usinagem**, Online, n. 65, p. 34-35, 201?. Disponível em: https://www.tupy.com.br/downloads/pdfs/omu65_15_03_10.pdf.

GUESSER, Wilson Luiz. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Pauo: Editora Blucher, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF NORMALIZATION. **ISO 15614-2**: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 2: Arc welding of cast iron. Londres: ISO, 2005.
LI, Yongjian *et al*. Surface remanufacturing of ductile cast iron by laser cladding Ni-Cu alloy coatings. **Surface and Coatings Technology**, [*S. l.*], v. 347, p. 20-28, ago. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.04.065.

LOPES, Francisco Luiz Campos *et al*. Diagnóstico da durabilidade e capacidade mecânica de uma viga portuária em concreto armado através de ensaios não destrutivos, semi destrutivos, destrutivos e laboratoriais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 14., 2023, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. CBPE, 2024. p. 1-10.

MADEIRA, Rodrigo Pereira; MODENESI, Paulo J. Utilização do ensaio erichsen para a avaliação do desempenho de juntas soldadas. **Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 1, p. 22-30, mar. 2010. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242010000100004.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Belo Horizonte: UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, v. 26, 2008.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MOL, Natália Sodré da Silveira; SILVA, Charles Luís da. Comparação do desempenho dos processos TIG e eletrodo revestido na soldagem do ferro fundido vermicular. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, [*S. l.*], v. 2, n. 4, p. 004-006, 27 nov. 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.18540/jcecvl2iss4pp004-006.

PEREIRA, Bruno Domingues. **Inspeção de Juntas Soldadas**: estudo da influência da entrega térmica. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2020.

PEREIRA, Lucas Andrade Guerra. **Inspeção visual e avaliação de juntas soldadas da estrutura metálica de um prédio por meio do ensaio não destrutivo de líquido penetrante**. 2021. 71 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

REIS, Alcione dos. **Fresamento frontal de ferros fundidos de alta resistência**. 2019. 172 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. DOI: http://doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2543.

REIS, Bárbara Cristina Mendanha. **Influência da adição de nióbio sobre a usinabilidade de ferro fundido cinzento perlítico na operação de torneamento**. 2021. 200 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, ENG - Departamento de Engenharia Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: http://hdl.handle.net/1843/35884.

SILVA, Joélson Vieira da. **Estudo da influência do tratamento térmico de austenitização seguida de resfriamento ao ar forçado na resistência ao desgaste abrasivo do ferro fundido branco ASTM A532 II D**. 2017. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/170956.

SILVA, Mário Lucas Santana *et al*. Soldabilidade em ferro fundido. **Perspectivas Online**: Exatas & Engenharias, [*S. l*], v. 4, n. 10, p. 26-34, 2015. Disponível em: https://www.perspectivasonline.com.br/exatas_e_engenharia/article/view/454.

SOUZA, Alan Douglas Silva e. **Estudo sobre o ferro fundido nodular**. 2021. 15 f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica), Faculdade Anhanguera, Pindamonhangaba, 2021. Disponível em: https://repositorio.pgsscogna.com.br//handle/123456789/50223.

SOUZA, Augusto César de. **Estudo da recuperação de peças de ferro fundido modular por processo de soldagem**. 2018. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2018. Disponível em: https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/229.

TIGRE JÚNIOR, Ademilson Garcia; FOLHA, Marlan dos Santos. **Análise de juntas soldadas por processos de soldagem tig e eletrodo revestido através de técnicas de inspeção não destrutivas**. 2020. 43 f. TCC (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Mecânica, Faculdade Vale do Cricaré, São Mateus, Espírito Santo, 2020.

VIDAL, Douglas Ferreira. **Análise de estrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular em processo de fundição produzido pela técnica de imersão de sino**. 2013. 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.

ZOLIN, I. **Ensaios mecânicos e análises de falhas**. 3. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria — Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.

APÊNDICE

Figura 1: Máquinas para usinagem: (A) Fresadora Universal KFU 2 e (B) Torno Clever L – 1640

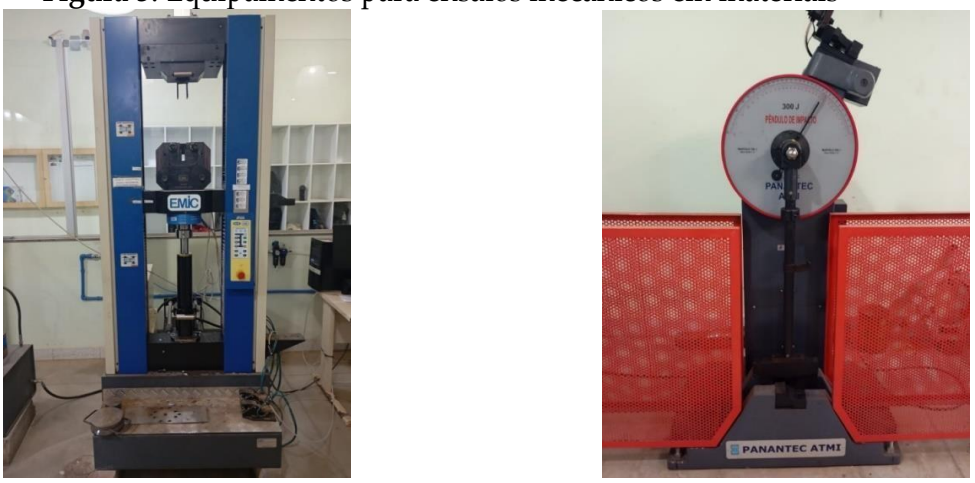
(A) (B)

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Figura 2: Corpos de prova soldados e com medidas finais

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Figura 3: Equipamentos para ensaios mecânicos em materiais



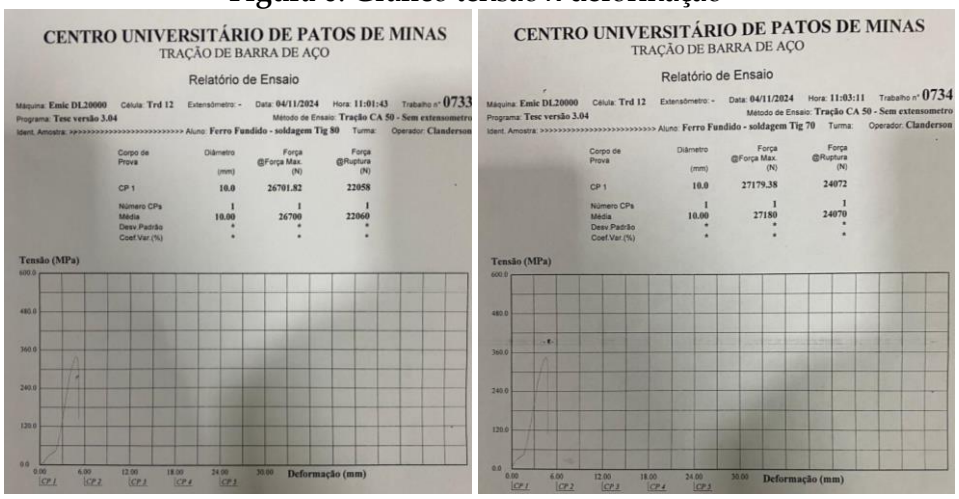
(A) (B)

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Figura 5: Gráfico tensão x deformação

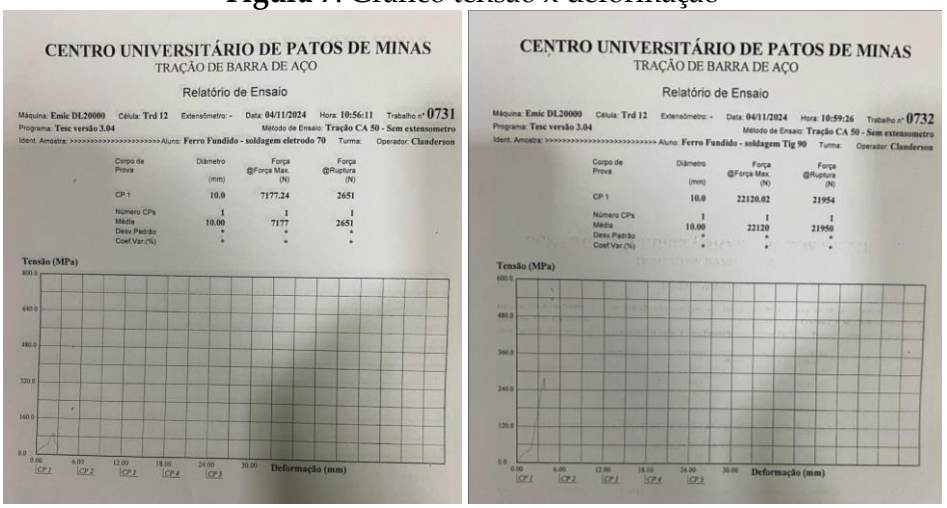
Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Figura 6: Gráfico tensão x deformação



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Figura 7: Gráfico tensão x deformação



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 195-210, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Inovação no desempenho de fluidos de corte: nanopartículas de prata e de óxido de zinco como aditivos multifuncionais

Innovation in cutting fluid performance: silver and zinc oxide nanoparticles as multifunctional additives

SARAH CRISTINA MAGALHÃES MACHADO
Discente de Engenharia Mecânica (UNIPAM)
sarahcristina@unipam.edu.br

HUGO CAMPOS LIMA SILVA
Bacharel em Engenharia Mecânica (UNIPAM)
hugocls@unipam.edu.br

SANDRA LÚCIA NOGUEIRA
Professora orientadora (UNIPAM)
sandraln@unipam.edu.br

Resumo: A utilização de fluidos de corte é uma prática indispensável nos processos industriais de usinagem, garantindo a eficiência e a qualidade de peças. A busca por soluções inovadoras, como a nanotecnologia, é fundamental para aumentar a competitividade no setor. Este artigo tem como objetivo analisar o uso de nanopartículas como aditivos para fluidos de corte, avaliando suas propriedades e sua eficiência. Foram sintetizadas e caracterizadas nanopartículas de prata e de óxido de zinco, posteriormente incorporadas aos fluidos de corte. As amostras passaram por análises de pH, viscosidade e condutividade. A análise experimental desses valores demonstrou um aumento no pH das amostras, que permaneceu básico, indicando ausência de atividade microbiana nelas, um aumento na condutividade elétrica, associada a uma maior capacidade de dissipar calor gerado no processo de usinagem, e maior viscosidade, favorecendo a diminuição da temperatura de corte na usinagem e de forças envolvidas nesse processo.
Palavras-chave: fluidos de corte; nanopartículas; usinagem.

Abstract: The use of cutting fluids is an essential practice in industrial machining processes, ensuring both efficiency and product quality. The search for innovative solutions, such as nanotechnology, is crucial to increasing competitiveness in the sector. This study aims to analyze the use of nanoparticles as additives for cutting fluids, evaluating their properties and efficiency. Silver and zinc oxide nanoparticles were synthesized and characterized, then incorporated into cutting fluids. The samples were subjected to pH, viscosity, and conductivity analyses. Experimental evaluation of these parameters showed an increase in pH, which remained basic, indicating the absence of microbial activity in the samples; an increase in electrical conductivity, associated with a higher capacity to dissipate heat generated during machining; and higher viscosity, contributing to reduced cutting temperature and decreased forces involved in the machining process.
Keywords: cutting fluids; nanoparticles; machining.

---

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fluidos de corte é uma prática indispensável nos processos industriais de usinagem, sendo fundamentais para garantir a eficiência e a qualidade na produção de peças. Eles atuam como lubrificantes, reduzindo o atrito entre a ferramenta e a peça, o que evita o superaquecimento e o desgaste excessivo nos processos de fabricação. Além disso, esses fluidos têm a capacidade de dissipar o calor gerado durante o corte, o que é fundamental para prevenir danos térmicos às peças usinadas e às ferramentas. Outra propriedade importante é a capacidade de remover as partículas e cavacos gerados durante a usinagem, mantendo a área de corte limpa e proporcionando uma maior precisão no processo. Também se espera que o fluido previna a oxidação e demais corrosões das peças e ferramentas durante o processo de usinagem (Kiminami; Castro; Oliveira, 2013, p. 112).

Como descrito por Machado, Coelho e Abrão (2015, p. 185), "Tratando-se de sistemas de manufatura, qualquer esforço para aumentar a produtividade e/ou reduzir custos deve ser considerado". Nesse contexto, é de se esperar que um elemento tão importante quanto o fluido de corte seja alvo de constante aprimoramento. A otimização das propriedades mecânicas desses fluidos é fundamental para obter resultados eficientes e de alta qualidade na usinagem e, portanto, a tecnologia de fluidos de corte é pressionada pelo próprio mercado a requerer uma constante evolução, sendo necessário aprimorar a capacidade de lubrificação e condução térmica e elétrica dos fluidos de corte para maximizar sua eficiência durante o processo de usinagem.

Uma alternativa com potencial para solucionar as problemáticas apresentadas é a nanotecnologia, através do uso de nanopartículas como aditivo aos fluidos de corte, devido às suas aplicações promissoras. No setor industrial, por exemplo, as nanopartículas de prata têm sido investigadas como alternativas de lubrificação viáveis e vêm mostrando resultados positivos, como pesquisado pelos autores Melo e Nogueira (2021). Além da capacidade lubrificante, em outro estudo, Pessoa e Nogueira (2022) concluíram que o uso de nanopartículas de prata não agride o meio ambiente, pelo contrário, tem um impacto positivo sobre o solo e as plantas. Esses fatos estudados e comprovados cientificamente, contribuem para descrever as nanopartículas de prata como um eficiente lubrificante, que, além de eficaz, não prejudica o meio ambiente, podendo ter o seu descarte facilitado e reduzindo custos e riscos com contaminações ao ser humano.

Um outro tipo de nanopartícula que é amplamente utilizado no setor industrial são as nanopartículas de óxido de zinco. Essas nanopartículas são altamente aplicadas como agente antimicrobiano e antifúngico, como relatado por Porto *et al*. (2017). Ademais, o óxido de zinco é uma composição química estável e inerte e, por conta disso, não demonstra reatividade significativa em condições normais de temperatura e pressão, tornando o seu uso comum na indústria química (Mayrinck *et al*., 2014).

Partindo-se das propriedades específicas já consolidadas pela literatura, o uso das nanopartículas de prata e de óxido de zinco como aditivos para fluidos de corte pode oferecer benefícios notáveis, incluindo ações antimicrobianas eficazes contra diversos tipos de microrganismos que contaminam os fluidos de corte. Acrescenta-se a isso o

potencial de melhorar a capacidade de lubrificação e condução térmica e elétrica dos fluidos, tornando-os mais eficientes e aumentando a sua vida útil.

Em síntese, cria-se a hipótese de que a utilização dessas nanopartículas como aditivos aos fluidos de corte pode ser uma estratégia inovadora e promissora para enfrentar os desafios associados ao desempenho desses fluidos, melhorando a capacidade de lubrificação e condução térmica, e tornando o processo de usinagem mais seguro, econômico, sustentável e eficiente. Dessa forma, o presente estudo objetiva analisar o potencial do uso de nanopartículas de prata e de óxido de zinco como aditivos para fluidos de corte em processos de usinagem, avaliando suas propriedades mecânicas e sua eficiência. Busca-se a caracterização desses nanomateriais e a avaliação de sua estabilidade e suas propriedades, comparando valores de pH, viscosidade e condutividade em relação ao fluido base.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 NANOTECNOLOGIA E NANOPARTÍCULAS METÁLICAS

A nanotecnologia é uma ciência que estuda a manipulação da matéria em uma escala atômica e molecular, lidando com estruturas denominadas nanopartículas (NPs), que possuem dimensões em escala nanométrica, ou seja, o seu tamanho varia entre 1 e 100 nanômetros (1nm = 10^{-9} m). Essas partículas têm propriedades físicas e químicas únicas, diferentes das partículas em escalas maiores do mesmo material. Devido ao seu tamanho reduzido, as nanopartículas podem exibir um aumento significativo na relação superfície-volume, tornando-as altamente reativas e potencialmente influenciando as suas propriedades e comportamentos (Toma; Condomitti, 2016).

Entre os nanomateriais mais estudados estão as nanopartículas metálicas. Elas têm despertado interesse devido à elevada condutividade térmica e elétrica, estabilidade química e alta atividade antimicrobiana (Naikoo *et al.*, 2021). Quanto ao desenvolvimento de nanoestruturas com propriedades antibacterianas, é possível encontrar na literatura estudos envolvendo o uso de nanopartículas de prata (Ag-NPs) e de óxido de zinco (ZnO-NPs), principalmente. As ZnO-NPs são efetivas no controle de uma grande quantidade de microrganismos, pois tem a capacidade de alterar os componentes da membrana celular da bactéria, fazendo-a romper, o que causa a perda do componente intracelular e, consequentemente, a morte do microrganismo (Porto *et al.*, 2017). Além de possuírem as propriedades mencionadas, as Ag-NPs também apresentaram resultados promissores na transferência de calor, demonstrando grande potencial para serem aplicadas em fluidos de refrigeração comercial (Santos, 2019).

2.2 FLUIDOS DE CORTE

Os fluidos de corte são empregados nas operações de usinagem para melhorar os processos tribológicos que ocorrem quando as superfícies da peça e da ferramenta entram em contato. Eles têm como principais funções: lubrificar a baixas velocidades de corte, refrigerar a altas velocidades, remover os cavacos da zona de usinagem e proteger a máquina-ferramenta e a peça contra a oxidação (Machado; Coelho; Abrão, 2015, p. 187).

No entanto, alguns problemas estão relacionados ao uso desses fluidos, como a contaminação por microrganismos, que provocam uma alteração em seus componentes, tornando-os impróprios para o uso, reduzindo a sua vida útil e acarretando a necessidade de seu descarte. Além disso, essa contaminação gera riscos à saúde dos operadores, ocasionando principalmente infecções dermatológicas e respiratórias (Grespan, 2020).

O uso de nanopartículas em fluidos de corte tem mostrado um aumento em suas propriedades lubrificantes e refrigerantes, reduzindo a força de usinagem, a temperatura de corte, a rugosidade da peça, o coeficiente de atrito e o desgaste das ferramentas de corte. Nanopartículas de 5 a 100 nm são geralmente dispersas em fluido de corte de base vegetal, o que melhora significativamente as propriedades tribológicas do nanofluido e a usinabilidade de ligas metálicas (Baldin, 2022).

2.3 SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS

Os nanomateriais podem ser obtidos por duas abordagens: *bottom up* ("de baixo para cima"), em que os materiais se constroem a partir de átomos ou moléculas, ou *top-down* ("de cima para baixo"), em que há a quebra de um material que irá ser trabalhado em nanopartículas, com o uso de técnicas específicas. Partindo da primeira abordagem, um dos métodos mais comuns para obter nanopartículas metálicas é através da redução química, que geralmente utiliza três componentes principais: precursores metálicos, agentes redutores e agentes estabilizantes, sendo os últimos utilizados para evitar a aglomeração indesejada das partículas no fim da reação. A redução dos sais é composta pelas fases de nucleação e crescimento, respectivamente (Ju-Nam; Lead, 2008). As sínteses via *bottom up* têm se mostrado mais viáveis, pois desempenham um melhor controle de importantes propriedades, como distribuição de tamanho e morfologia, além de utilizarem procedimentos mais acessíveis e sem a demanda de equipamentos complexos (Chhabra *et al*., 2018).

As nanopartículas de óxido de zinco podem ser obtidas pela rota de síntese sol-gel, em que ocorre uma transição do sistema sol (suspensão de partículas coloidais com dimensão entre 1 e 1000 nm) para um sistema gel (estrutura rígida de partículas coloidais - gel coloidal), formando agregados esféricos (Mayrinck *et al*., 2014). Entre os métodos de síntese sol-gel mais utilizados, destaca-se a rota dos precursores poliméricos (Método de Pechini). Ele consiste na formação de uma resina polimérica, produzida pela poliesterificação entre um complexo metálico quelatado, usando ácidos hidroxicarboxílicos e um álcool polihidroxilado. Durante o aquecimento em temperaturas controladas, ocorrem as reações de esterificação e poliesterificação, formando assim uma resina polimérica e água. Após a secagem, o polímero formado apresenta grande homogeneidade e deve ser submetido a um tratamento térmico adequado para a eliminação da parte orgânica e obtenção da fase desejada (Pechini, 1967).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização dos objetivos propostos, foi desenvolvida uma pesquisa experimental, com a manipulação de variáveis independentes (causas antecedentes), para uma posterior análise das consequências dessa manipulação sobre as variáveis dependentes (efeitos consequentes). A pesquisa teve um enfoque quantitativo, através da coleta de dados para testar hipóteses, baseando-se na medição numérica e na análise estatística para estabelecer padrões e comprovar teorias. Ela também teve caráter qualitativo e envolveu a combinação de estudos exploratórios e descritivos, identificando conceitos promissores e perspectivas inovadoras através da especificação de propriedades, características e traços importantes de um determinado fenômeno (Sampieri; Collado; Lucio, 2013, p. 30-141).

3.1 SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS DE PRATA E DE ÓXIDO DE ZINCO

As nanopartículas de prata foram sintetizadas pelo método *Bottom Up*, utilizando os seguintes reagentes: nitrato de prata ($AgNO_3$), borohidreto de sódio ($NaHB_4$) e ácido cítrico ($C_6H_8O_7$). Primeiramente, foram preparados 75 mL de solução 2,0 x 10^{-3} mol. L^{-1} de borohidreto de sódio. O recipiente passou por banho de gelo por um período de 15 minutos. Em seguida, com o auxílio de uma bureta, a uma taxa de 1 gota/s, foram adicionados 25 mL de solução 1,0 x 10^{-3} mol.L^{-1} de nitrato de prata, com o objetivo de encontrar uma solução amarelada. O sistema foi composto por uma barra magnética, a fim de levá-lo à agitação por 15 minutos (Pessoa; Nogueira, 2022).

As nanopartículas de óxido de zinco foram obtidas pelo método dos precursores poliméricos (Método de Pechini), conforme a bibliografia. Para isso, foram utilizados os seguintes reagentes e suas respectivas proporções em massa: ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) - 47,7%, etilenoglicol ($C_2H_4(OH)_2$) - 20,6%, nitrato de zinco hexa-hidratado ($Zn(NO_3)_2\ 6H_2O$) - 31,7% e água destilada. As massas dos reagentes foram medidas em uma balança analítica e as temperaturas foram aferidas com um termômetro analógico. A síntese foi realizada em uma capela de exaustão devido aos gases liberados no processo. Inicialmente, o etilenoglicol foi aquecido sob constante agitação, em um agitador magnético, à temperatura de 70°C. Posteriormente, o ácido cítrico e o nitrato de zinco hexa-hidratado foram diluídos neste líquido e, em seguida, foi adicionada a água destilada. Após atingir uma certa temperatura, formou-se um gel ou resina polimérica. Essa resina foi levada para um forno mufla em uma temperatura de 500°C por 12 horas, ocorrendo o processo de calcinação (Castro *et al*., 2022).

Para a caracterização de ambas as nanopartículas, as soluções tiveram o seu espectro eletrônico medido, bem como o comprimento de onda de máxima absorção. Para isso, foi utilizado um espectrofotômetro de absorção de UV-visível (Pessoa; Nogueira, 2022). Para as NPs de óxido de zinco, houve diluição (0,01g de sólidos para 100,0 mL de água destilada) antes de efetuar análise UV-vis. A solução foi colocada em um béquer de 100 ml e levada ao banho de ultrassom por uma hora, no laboratório de ciência e tecnologia dos materiais, a fim de se obter uma mistura homogênea (Porto *et al*., 2017).

3.2 SÍNTESE DE NANOFLUIDOS

A síntese de nanofluidos para a incorporação das nanopartículas nos fluidos de corte foi baseada no método de dois passos, em que as nanopartículas em solução coloidal e em forma de pó foram dispersas nas amostras de fluido base. Foram consideradas as concentrações de 0,01% de nanomaterial sólido e 10% de nanomaterial líquido. Inicialmente, as massas das amostras de nanopartículas foram medidas em uma balança analítica. Em seguida, elas foram adicionadas ao fluido base com o auxílio de um agitador magnético e a mistura resultante foi submetida ao procedimento de vibração ultrassônica ou banho de ultrassom (sonicador) para obtenção do nanofluido (Oliveira, 2018).

3.3 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DE CORTE

Os fluidos de corte tradicionais (por aplicação em jato) podem ser divididos em três grupos: óleos, emulsões e soluções (Machado; Coelho; Abrão, 2015, p. 187-192). Para todos os testes e ensaios realizados, foram adotadas quatro populações de fluido:

1. fluido de corte sintético;
2. fluido de corte sintético com nanopartículas de prata;
3. fluido de corte sintético com nanopartículas de óxido de zinco;
4. fluido de corte sintético misto (nano-aditivos de prata e óxido de zinco).

Essa metodologia foi adaptada de Sales (1999) e tem o objetivo de representar populações distintas de fluidos.). A opção por reduzir o escopo a esses tipos de fluidos se deu para tornar a pesquisa mais eficiente e a escolha específica de suas composições se deu pelo uso deles na região onde se executou a pesquisa. Assim sendo, sua obtenção foi de fácil acesso aos pesquisadores e os resultados obtidos foram mais relevantes à região de origem do estudo.

3.4 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS

Para Machado, Coelho e Abrão (2015, p. 185), as principais características para um fluido de corte são refrigeração, lubrificação, viscosidade, e ausência de contaminação. Delimitado o escopo, faz se necessário então a aquisição e a análise de dados específicos para quantificar e qualificar algumas dessas características. Também foi monitorado o pH (potencial hidrogeniônico) das amostras, uma vez que ele tem ligação direta à suscetibilidade de contaminação microbiológicas do fluido e no seu potencial corrosivo.

Para a análise do pH, foram realizadas medições em um *p*Hmetro MS Tecnopon, mPA-210, assim como exposto por Postal (2016). A capacidade de refrigeração depende de vários fatores, como a sua condutividade elétrica e dureza, que geralmente estão associadas a uma maior capacidade de dissipar calor gerado no processo de usinagem. Visando-se obter informações relacionadas à dureza das

amostras, fator de fundamental importância para a estabilidade de emulsões, foram realizados ensaios de condutividade em um condutivímetro MS Tecnopon, mCA 150P. A dureza, que pode ser correlacionada com a sua respectiva condutividade (Postal, 2016), mostra-se como um fator que contribui para o aumento da instabilidade de emulsões, entre elas aquelas preparadas utilizando-se fluidos de corte.

Por fim, para a obtenção dos valores de viscosidade das diferentes amostras foi utilizado um viscosímetro rotativo analógico Q860A21, cujas medições dependem da termostatização das amostras (Postal, 2016). A medição foi realizada com o uso do rotor 0 do equipamento, utilizado para líquidos de baixa viscosidade, e com velocidade de 30 rpm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS

4.1.1 Nanopartículas de prata

Durante o processo da síntese, com a adição controlada do nitrato de prata, a solução, ainda em agitação magnética e em banho de gelo, atingiu uma coloração cada vez mais amarelada, conforme o esperado e, ao final da reação, obteve um tom amarelo escuro, condizentes com os resultados reportados por Pessoa e Nogueira (2022). As Figuras 1 e 2 evidenciam a parte inicial e final da reação.

Figura 1: Coloração durante a síntese

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Figura 2: Coloração ao final da síntese

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

4.1.2 Nanopartículas de óxido de zinco

A solução formada durante a reação adquiriu uma coloração amarelada após atingir a temperatura de 110°C, representada na Figura 3 e, aos 130°C, obteve uma

consistência de gel/resina, momento em que o aquecimento foi interrompido devido ao excesso de precipitação no béquer, conforme a Figura 4.

Figura 3: Coloração em 110°C

Fonte: Autoria Própria, 2024.

Figura 4: Aspecto ao final da reação

Fonte: Autoria Própria, 2024.

A resina obtida foi levada para um forno mufla a uma temperatura de 500°C por 12 horas, passando pelo processo de calcinação, em que houve a eliminação da parte orgânica e o surgimento de um material de aparência esponjosa, mas que é facilmente quebrável, originando as nanopartículas de óxido de zinco em forma de pó, conforme representado na Figura 5.

Figura 5: Nanopartículas na forma sólida

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

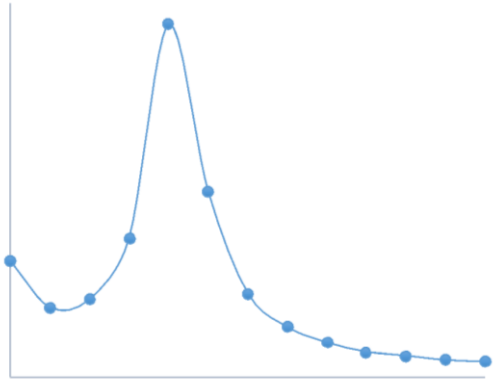
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS

4.2.1 Nanopartículas de prata

A fim de caracterizar as nanopartículas de prata, utilizou-se o método da espectrofotometria de absorção, que consistiu em uma análise partindo do comprimento de onda de 200 nm até 800 nm, de modo a evidenciar a formação das AgNPs. A solução de nanopartículas foi colocada em uma cubeta de quartzo e levada a um espectrofotômetro de UV-vis Genesys 10uv. A amostra foi analisada logo após a sua preparação (t = 0) e 60 dias após a síntese. Dessa forma, foi possível comprovar que a solução se manteve estável.

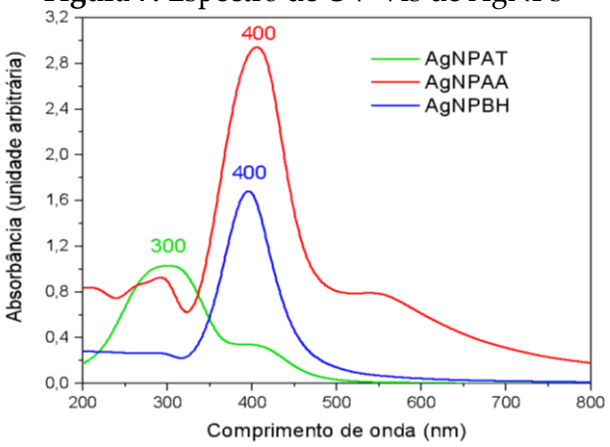
O comprimento de onda de máxima absorção se deu na faixa dos 400 nm, evidenciado na Figura 6, e permaneceu estável, uma vez que o borohidreto de sódio, adicionado em excesso em relação ao nitrato de prata (2:1), atua na estabilização das nanopartículas, além de ser um forte redutor na presença de íons prata, conforme evidenciado por Pessoa e Nogueira (2022), na curva em azul representada na Figura 7.

Figura 6: Espectro de UV-Vis das AgNPs



Fonte: dados da pesquisa, 2024

Figura 7: Espectro de UV-Vis de AgNPs

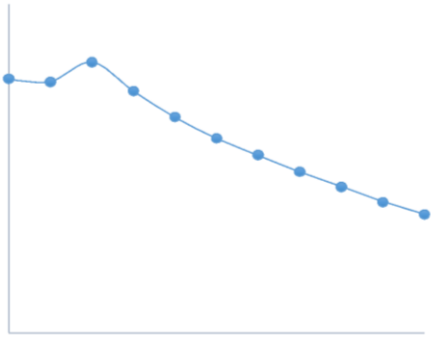


Fonte: Pessoa e Nogueira, 2022.

4.2.2 Nanopartículas de óxido de zinco

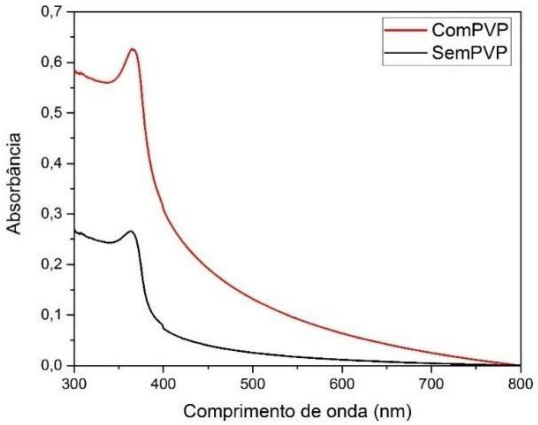
Após passar pelo banho de ultrassom para se homogeneizar, a solução de nanopartículas em pó e água destilada foi também colocada em uma cubeta de quartzo e submetida ao processo de espectrofotometria de absorção. A análise foi realizada partindo do comprimento de onda de 300 nm até 800 nm, conforme a Figura 8. O espectro da amostra apresentou resultados semelhantes aos de Porto *et al* (2017), tendo sua maior absorção próxima ao comprimento de onda de 400 nm, evidenciado na Figura 9 pela curva em preto.

Figura 8: Espectro de UV-Vis de ZnO NPs



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Figura 9: Espectro de UV-Vis de ZnO NPs



Fonte: Porto *et al*, 2017.

4.3 SÍNTESE DE NANOFLUIDOS

O fluido base utilizado foi o Fluido de Corte de base sintética isento de óleo mineral, fabricado pela Synergy, com concentração de 5-15%, miscível em água. As quatro amostras em estudo passaram por banho de ultrassom por 30 minutos, garantindo a homogeneização dos fluidos de corte nano-aditivados. Durante esse processo, a temperatura foi monitorada para que não ultrapassasse os 40°, que é a

temperatura máxima de estocagem recomendada pelo fabricante, a fim de não alterar a sua estabilidade. As quantidades utilizadas se encontram na Tabela abaixo.

Tabela 1: Concentrações dos fluidos e NPs para síntese de nanofluidos

Fluido de Corte	Água	AgNps	ZnONps
10 ml	90 ml	-	-
10 ml	80 ml	10 ml	-
11,1 ml	100 ml	-	0,0111 g
12,5 ml	100 ml	12,5 ml	0,0125 g

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

A Figura 10 ilustra as soluções de fluido de corte e de água juntamente com nanopartículas de óxido de zinco em pó após o banho de ultrassom, que se apresentaram homogêneas ao final do processo.

Figura 10: Amostras em banho de ultrassom

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

4.4 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DE CORTE

As propriedades das soluções de fluido de corte foram avaliadas logo após passarem pelo banho de ultrassom, momento em que todas se encontravam estáveis e homogêneas. Entretanto, após uma semana de armazenamento das amostras que continham nanopartículas de óxido de zinco em pó, observou-se que este nanomaterial havia se aglomerado no béquer, formando um precipitado sólido e demonstrando baixa afinidade para dispersão em água, observado na Figura 11. Ainda assim, a análise das propriedades mencionadas neste estudo foi possível, com medições realizadas imediatamente após o banho ultrassônico.

Figura 11: Aglomerado de nanopartículas de óxido de zinco

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

4.4.1 Medição de pH

O pH das amostras foi medido submergindo o eletrodo do equipamento em um béquer contendo quantidade suficiente dos líquidos analisados. O pH previsto, segundo o fornecedor, para uma emulsão preparada com o fluido em questão está entre 8,7 e 9,5. O pH resultante da dispersão das soluções de fluidos de corte nano aditivados permaneceu básico, o que pode ser considerado como indicativo de ausência de atividade microbiana, assim como evidenciado por Postal (2016). Observando-se a Tabela 2, percebe-se que a amostra que apresentou o maior pH foi a que continha apenas nanopartículas de prata (AgNps) e as com resultado reduzido foram as que continham nanopartículas de óxido de zinco (ZnONps). Ainda assim, os valores de pH medidos experimentalmente permanecem dentro do intervalo esperado de emulsões de fluido de corte em geral (Postal, 2016).

Tabela 2: Valores de pH das amostras

Soluções	pH
Fluido + água	9,53
Fluido + AgNps	9,55
Fluido + ZnONps	9,38
Fluido + AgNps + ZnONps	9,34

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

4.4.2 Medição de condutividade elétrica

Experimentalmente, observou-se na Tabela 2 um aumento na condutividade elétrica de fluidos que continham nanomateriais, em especial as nanopartículas de óxido de zinco (ZnONps). Esses dados de condutividade encontrados se relacionam à dureza das amostras, fator de fundamental importância para a estabilidade de emulsões. De

modo geral, os nanomateriais propiciaram um aumento na condutividade elétrica das soluções em comparação com os valores do fluido contendo apenas água, apresentando, assim, um grau ainda mais baixo de dureza. Além disso, uma maior condutividade em fluidos de corte também está associada a uma maior capacidade de dissipar calor gerado no processo de usinagem, pois fluidos condutores são geralmente mais eficazes na transferência de calor, reduzindo o aquecimento excessivo da peça e da ferramenta de corte, assim como evidenciado por Postal (2016).

Tabela 2: Valores de condutividade elétrica das amostras

Soluções	Condutividade [μS/cm]
Fluido + água	3,39
Fluido + AgNps	3,51
Fluido + ZnONps	4,75
Fluido + AgNps + ZnONps	4,80

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

4.4.3 Medição de viscosidade

Para a medição foram realizadas 3 aferições de cada amostra, a fim de aumentar a confiabilidade dos resultados. O resultado final foi obtido pelo cálculo da média aritmética dos valores de cada amostra, que se encontram na Tabela 3. Observou-se que a solução que continha apenas nanopartículas de prata teve a sua viscosidade reduzida em relação ao fluido de corte puro diluído em água. Já a que continha somente nanopartículas de óxido de zinco obteve um aumento significativo em seus resultados. Por fim, a combinação de ambos os nanomateriais obteve a maior viscosidade média dentre as amostras em análise. O aumento da viscosidade favorece a diminuição da temperatura de corte na usinagem e de forças envolvidas no processo de corte (Postal, 2016).

Tabela 3: Valores de Viscosidade das amostras

Soluções	Viscosidade 1 [mPa.s]	Viscosidade 2 [mPa.s]	Viscosidade 3 [mPa.s]	Viscosidade Média [mPa.s]
Fluido + água	1,6	1,8	1,7	1,7
Fluido + AgNps	1,5	1,6	1,5	1,53
Fluido + ZnONps	2,9	2,9	3	2,93
Fluido + AgNps + ZnONps	3	3	3,1	3,03

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

5 CONCLUSÃO

As sínteses de nanopartículas de prata (AgNPs) e de óxido de zinco (ZnO NPs), realizadas pelos métodos *bottom up* e Precursores Poliméricos, respectivamente, demonstraram-se eficientes, tendo a primeira formado uma suspensão coloidal e, a

segunda, nanopartículas na forma sólida, com resultados próximos à bibliografia apresentada. A caracterização das nanopartículas por espectrofotometria de absorção evidenciou picos característicos, confirmando a formação delas. Em ambas, foi observado um pico de absorção próximo a 400 nm.

Com base nos resultados das medições de algumas propriedades dos nanofluidos, conclui-se que a adição de nanopartículas de prata (AgNps) e de óxido de zinco (ZnONps) aos fluidos de corte apresentou efeitos positivos, melhorando parâmetros como condutividade elétrica, viscosidade e estabilidade do pH. Esses resultados indicam que os nanomateriais podem atuar como aditivos promissores, oferecendo maior eficiência térmica e redução das forças envolvidas no processo de usinagem. A combinação de ambos os nanomateriais demonstrou um desempenho interessante, obtendo a maior viscosidade, o que pode contribuir para o controle da temperatura de corte durante a usinagem.

No entanto, observou-se um desafio em relação à estabilidade a longo prazo das amostras contendo nanopartículas de óxido de zinco. Embora as soluções tenham se mostrado homogêneas e estáveis logo após o tratamento ultrassônico, a formação de precipitados sólidos durante o armazenamento evidencia a baixa afinidade dessas nanopartículas para dispersão em água. Esse comportamento sugere a necessidade de aprimoramentos no processo de dispersão ou na formulação dos fluidos de corte contendo ZnONps, visando garantir a estabilidade e a eficiência dos nanomateriais durante o uso prolongado.

Embora os resultados iniciais mostrem que o uso de nanopartículas pode melhorar o desempenho dos fluidos de corte, futuras pesquisas devem focar na melhoria da estabilidade desses materiais, especialmente no que diz respeito às nanopartículas de óxido de zinco, para viabilizar seu uso prático em escala industrial.

REFERÊNCIAS

BALDIN, Vitor *et al*. State of the Art of Biodegradable Nanofluids Application in Machining Processes. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, [*S. l.*], 30 nov. 2022. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-022-00486-0#article-info.

CASTRO, T.J. *et al*. Size controlling and tailoring the properties of Gd Zn1-O nanoparticles. **Ceramics International**, [*S. l.*], v. 48, n. 3, p. 4324-4331, fev. 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884221033794?via%3Dihub#preview-section-cited-by.

CHHABRA, Varun A. *et al*. Synthesis and spectroscopic studies of functionalized graphene quantum dots with diverse fluorescence characteristics. **Rsc Advances**, [*S. l.*], v. 8, n. 21, p. 11446-11454, mar. 2018. Royal Society of Chemistry (RSC). Disponível em: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ra/c8ra01148f.

GRESPAN, Gilberto Henrique. Novas tecnologias na formulação de fluidos de corte solúveis com redução na contaminação microbiana. **Itw Chemical**, 2020. Disponível em: https://itwpf.com.br/wp-content/uploads/2021/06/Fluidos_Artigo-Tecnico-Fluidos-de-Corte-Contaminacao-microbiana-Nov20.pdf.

JU-NAM, Yon; LEAD, Jamie R. Manufactured nanoparticles: an overview of their chemistry, interactions and potential environmental implications. **Science Of The Total Environment**, [*S. l.*], v. 400, n. 1-3, p. 396-414, ago. 2008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969708006943.

KIMINAMI, Claudio S.; CASTRO, Walman Benício de; OLIVEIRA, Marcelo Falcão de. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Editora Blucher, 2013. *E-book*. ISBN 9788521206835.

MACHADO, Álisson R.; COELHO, Reginaldo T.; ABRÃO, Alexandre M. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2015. *E-book*. ISBN 9788521208440.

MAYRINCK, Caroline *et al*. Síntese, Propriedades e Aplicações de Óxido de Zinco Nanoestruturado. **Revista Virtual de Química**, [*S. l.*], v. 6, n. 5, p. 1185-1204, 07 out. 2014. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). Disponível em: https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/629.

MELO, Lorrana Magalhães; NOGUEIRA, Sandra Lúcia. Análise teórica sobre a inserção de nanopartículas em óleo lubrificante para a diminuição do desgaste em superfícies sólidas. **Perquirere: Engenharias, Ciências Exatas e da Terra**, Patos de Minas, v. 2, n. 18, 22 dez. 2021. Disponível em: https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere/article/view/2605.

NAIKOO, Gowhar A. *et al.* Bioinspired and green synthesis of nanoparticles from plant extracts with antiviral and antimicrobial properties: a critical review. **Journal of Saudi Chemical Society**, [*S. l.*], v. 25, n. 9, p. 101304, set. 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319610321001095.

OLIVEIRA, Letícia Raquel de. **Síntese e caracterização de nanofluidos para aplicação em sistemas térmicos**. 2018. 250 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21077.

PECHINI, M. P. **Method of preparing lead an alkaline earth titanates na nionates and coating method using the same from a capacitor**. U. S. n. 3330697. Concessão: 1967.

PESSOA, Isabella Cristine de Deus; NOGUEIRA, Sandra Lúcia. **Síntese de nanopartículas de prata e análise da sua influência na potencialização do desenvolvimento vegetal da soja**. 2022. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Centro Universitário de Patos de Minas - UNIPAM, Patos de Minas, 2022.

PORTO, Renato Cesar Tobias *et al*. Nanopartículas de óxido de zinco sintetizadas pelo método poliol: caracterização e avaliação da atividade antibacteriana. **Matéria** (Rio de Janeiro), [*S. l.*], v. 22, n. 1, 2017. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/NknWMVjTYYKZKWbTJcS3M3q/#.

POSTAL, Victor. **Estudo da manipulação térmica de emulsões via espectroscopia UV-Vis aplicada a fluidos de corte**. 2016. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-23012017-113619/en.php.

SALES, W. F. **Influência das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, 1999.

SAMPIERI, Roberto Hernández; COLLADO, Carlos Fernández; LUCIO, María del Pilar Baptista. **Metodologia de Pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Penso, 2013.

SANTOS, Caio Carvalho dos. **Síntese de nanopartículas de prata e cobre**: preparação e estabilidade coloidal de nanofluidos em meio aquoso. 2019. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Araraquara, 2019. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/183581.

TOMA, Henrique E.; SILVA, Delmárcio Gomes da; CONDOMITTI, Ulisses. **Nanotecnologia experimental**. São Paulo: Editora Blucher, 2016. *E-book*. ISBN 9788521210672.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 211-226, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Modelagem numérica do coeficiente de transferência de calor por convecção em sistemas aletados segundo ondas quadradas aleatórias

Numerical modeling of the convective heat transfer coefficient in fin systems using random square waves

JOÃO VITOR PEREIRA
Discente de Engenharia Mecânica (UNIPAM)
joaovitorpereira@unipam.edu.br

BRUNO BATISTA GONÇALVES
Professor orientador (UNIPAM)
brunobg@unipam.edu.br

Resumo: A análise dos perfis térmicos em sistemas aletados apresenta desafios significativos devido à complexidade e à aleatoriedade das interações entre os fatores envolvidos. Este estudo teve como objetivo desenvolver um modelo numérico para descrever o perfil térmico por convecção em sistemas aletados retangulares sob turbulência, utilizando o método das Ondas Quadradas Aleatórias (OQA). A abordagem incluiu a parametrização pelo método OQA e resolução numérica do sistema para obtenção dos perfis térmicos. Os resultados indicaram concordância com às expectativas físicas, mas ainda existem limitações, especialmente no que diz respeito à observação entre os parâmetros do método OQA e as propriedades mencionadas, que podem ser aperfeiçoadas. Concluiu-se que o método OQA é uma ferramenta eficiente para modelagem térmica, com potencial para aprimoramento em futuras análises.
Palavras-chave: Método OQA; turbulência; sistemas aletados; solução numérica.

Abstract: The analysis of thermal profiles in finned systems presents significant challenges due to the complexity and randomness of the interactions among the factors involved. This study aimed to develop a numerical model to describe the convective thermal profile in rectangular finned systems under turbulence, using the Random Square Wave (RSW) method. The approach included parameterization through the RSW method and numerical resolution of the system to obtain the thermal profiles. The results showed agreement with physical expectations; however, limitations remain, particularly regarding the relationship between the RSW method parameters and the mentioned properties, which could be improved. It was concluded that the RSW method is an efficient tool for thermal modeling, with potential for enhancement in future analyses.
Keywords: RSW method; turbulence; finned systems; numerical solution.

1 INTRODUÇÃO

Nas mais diversas áreas de aplicação da engenharia térmica se faz imprescindível a determinação do fluxo térmico; nas aplicações práticas associados a

trocas térmicas, tais como a geração de vapor d'água em caldeiras e aquecimento ou resfriamento em trocadores de calor, as trocas térmicas entre os fluidos determinam a eficiência desses processos. Há, assim, pesquisas que buscam por novos meios tanto para aumentar as taxas de transferência de calor quanto para isolar as trocas térmicas em variadas aplicações.

Uma forma para aumentar as taxas de transferência de calor são as aletas, as quais favorecem a transferência de calor por convecção ao aumentar a área de superfície sólida exposta ao meio externo, na qual é possível a passagem de fluxo de calor (Çengel; Ghajar, 2012). Porém, as soluções analíticas que modelam a transferência de calor em aletas para diversas geometrias e condições de contorno distintas são baseadas em condições de contorno aproximadas e hipóteses heurísticas, tal como o coeficiente de transferência de calor por convecção "h" presente na lei de resfriamento de Newton (Canedo, 2018).

O coeficiente h é uma variável de difícil determinação, pois depende das diversas variáveis relacionadas às condições de escoamento, notadamente a turbulência, e às propriedades físicas e termodinâmicas do fluido. Essas variáveis possuem uma relação complexa entre si, e normalmente são necessários métodos experimentais e parâmetros adimensionais a fim de se avaliar o seu efeito no valor do coeficiente h (Çengel; Ghajar, 2012). Em geral, o coeficiente h é aplicado baseado em tabelas e relações aproximadas, as quais não se adequam à complexidade real da fenomenologia em tela.

A maioria das aplicações práticas envolvem escoamentos em regime de turbulência. Os escoamentos turbulentos, em função de sua característica caótica e aleatória, conferem à análise uma complexidade ainda maior, de maneira que um dos métodos de tratamento das variáveis, a fim de simplificações também, se dá por correlações estatísticas (Schulz, 2003; Gonçalves, 2014).

Porém, o tratamento estatístico das equações diferenciais governantes gera termos que contêm covariâncias, como o produto de flutuações, por exemplo, e esses termos não possuem definições diretas, prescindindo de novos equacionamentos que trazem novos termos de covariância de ordem maior, tal condição leva ao problema de não fechamento do sistema (havendo sempre mais incógnitas que equações, o que leva às suposições heurísticas).

Nesse contexto, um modelo proposto por Schulz *et al*. (2011a, 2011b), que soluciona o problema do não fechamento, é o método das Ondas Quadradas Aleatórias (OQA). O método permite parametrizar uma propriedade do fenômeno de transporte turbulento representando-a como uma onda quadrada bimodal aleatória, obtendo-se funções a priori que serão utilizadas nos equacionamentos com finalidade de parametrização.

As aplicações do método OQA retornaram resultados satisfatórios nos trabalhos desenvolvidos acerca do assunto, tais como análise da transferência turbulenta de massa em Gonçalves (2014), Schulz *et al*. (2011b) e Schulz e Janzen (2009), e também na análise da transferência turbulenta de calor unidimensional segundo células convectivas de Rayleigh Benard (Gonçalves, 2014).

Diante desse cenário, o objetivo geral desta pesquisa é aplicar o método OQA em um sistema aletado de transferência térmica turbulenta a fim de se desenvolver um equacionamento para o fluxo térmico. Isso será feito através de uma modelação do perfil

térmico e do coeficiente de transferência térmica por convecção, além de comparação entre modelos empíricos já existentes (ver Çengel; Ghajar, 2012).

Os objetivos específicos consistem em: (1) aplicar o método OQA nas equações diferenciais de conservação de energia; (2) obter o perfil térmico na camada limite adjacente à aleta; (3) desenvolver o equacionamento do fluxo térmico; (4) comparar os resultados com os modelos empíricos já existentes.

Resguardada a ilação da importância dos estudos de engenharia que envolvem trocas térmicas turbulentas, a aplicação do método OQA em sistemas aletados é desejável tanto para a busca por um melhor entendimento do coeficiente de transferência de calor por convecção, na dedução do fluxo térmico, quanto para a validação e aplicabilidade do método em si.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 LEIS DE CONSERVAÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Os princípios de conservação estão presentes nos mais diversos fenômenos da natureza. Em um determinado sistema ou volume de controle, algumas grandezas físicas, como a massa, a energia, a quantidade de movimento e o momento angular, conservam-se, isto é, o balanço entre as quantidades que entraram e as que saíram corresponde à variação total da grandeza no volume de controle (Çengel; Cimbala, 2013). Em alguns casos, leva-se em consideração também a diferença entre as quantidades geradas e consumidas.

Neste trabalho, no qual as trocas de energia térmica são dominantes, destaca-se a importância da lei da conservação da energia, cujo equacionamento governante é definido pela equação (1):

$$\frac{dE}{dT} = \sum\left[\dot{m}\left(h + e_c + e_p\right)\right] + \sum\dot{Q} + \sum\dot{w} \qquad (1)$$

Na equação (1), E é a energia total do sistema em [J], $\dot{m}$ é a vazão mássica em [kg/s], h é a entalpia, e é a energia cinética específica, e é a energia potencial específica, as três últimas em [J/kg], $\dot{Q}$ é o fluxo de calor do sistema e $\dot{W}$ é o trabalho sofrido pelo sistema, os dois últimos em [J/s].

A transferência da energia térmica ocorre na presença de um gradiente térmico, sendo a direção da transferência de energia da maior para a menor temperatura. Os tipos de mecanismos de transferência de calor são: condução, convecção e radiação. Transferências por condução ocorrem em fronteiras sólidas com diferença de temperatura entre as faces externas, enquanto a convecção ocorre devido à agitação do fluido próximo à fronteira sólida, e, por fim, a radiação ocorre através da propagação de ondas eletromagnéticas entre corpos, mesmo que no vácuo (Çengel; Cimbala, 2013).

Como a convecção depende do fluxo da matéria, ela é diretamente afetada pelo regime de escoamento do fluido (Castro, 2017). No regime turbulento, as partículas do fluido seguem padrões erráticos ou caóticos. Assim, conforme Canedo (2018), a convecção é um mecanismo de transferência em que as propriedades são transportadas

através do escoamento. É importante observar que o movimento do fluido é provocado por meios externos ao fenômeno de troca de calor (Roma, 2006). Neste trabalho, a modelação está baseada nas condições de convecção na camada limite térmica.

2.2 LEI DE FOURIER

Como referido, um dos mecanismos de transferência de calor é a condução térmica, o qual se dá predominantemente em meios sólidos pela transmissão de energia de partículas. A quantificação desse processo é descrita pela lei de Fourier, que afirma que a taxa de transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente de temperatura local, dado pela equação (2) (Schulz, 2003; Canedo, 2018; Çengel; Ghajar, 2012):

$$\dot{q} = -k\,T \qquad (2)$$

Na equação (2), $\dot{q}$ é o fluxo de calor por unidade de área em [W/m²], k_T é a condutividade térmica do material em [W/m.K] e $\vec{\nabla}T$ é o gradiente de temperatura em [K/m]. A presença do sinal negativo indica que o sentido da transferência de calor é contrário ao gradiente.

2.3 LEI DE RESFRIAMENTO DE NEWTON

O fenômeno das trocas de calor por convecção possui, em geral, uma alta complexidade de análise em razão da combinação entre efeitos condutivos e o escoamento do fluido, o qual em muitas aplicações é turbulento (Çengel; Ghajar, 2012).

A quantificação do fluxo de calor total convectivo é resumida na equação (3), conhecida como lei do resfriamento de Newton, expressa em termos do fluxo de calor total e por unidade de área:

$$\begin{aligned} Q &= h_C A(T_S - T_\infty) \\ \dot{q} &= h_C(T_S - T_\infty) \end{aligned} \qquad (3)$$

Na equação (3), h é o coeficiente de transferência de calor por convecção em [W/m ².K], A é a área da superfície sólida em contato com o meio fluido em [m²], T_s é a temperatura da superfície sólida em [K] e T_∞ é a temperatura do meio fluido em [K].

Apesar da aparente simplicidade das equações (3), a complexidade das trocas de calor convectivas ainda está presente no coeficiente de transferência de calor por convecção. A determinação do valor deste coeficiente é, geralmente, feita de forma empírica, pois depende da complexa interação entre variáveis como velocidade do escoamento, viscosidade, densidade, condutividade térmica e calor específico do fluido, rugosidade da superfície sólida, entre outras.

Alternativamente, a convecção pode ser avaliada pelas trocas de energia mecânica e térmica, e a lei que rege esse fenômeno, proveniente da equação (1), é dada pela equação diferencial (4) (Smith; Van Ness; Abbott, 2013):

$$\partial T \partial t = \partial y \varrho c_P (\nabla^2 T) - V \cdot T \quad (4)$$

Na equação (4), $\vec{V}$ é o vetor velocidade em [m/s], ρ é a densidade do fluido em [kg/m³], c_p é o calor específico a pressão constante em [J/kg.K] e t é o tempo em [s].

2.4 PARÂMETROS ADIMENSIONAIS

Conforme Schulz (2003), para simplificação das análises de processos físicos com

várias propriedades, empregam-se os números adimensionais baseados no método de análise dimensional. Assim, a análise dimensional é comumente utilizada em problemas de convecção, pois reduz o número total de variáveis presentes no equacionamento.

O número de Prandlt (Pr), por exemplo, é um número adimensional que relaciona a difusividade térmica, com relação ao transporte de energia interna e a viscosidade do meio fluido, para com o transporte de momento linear (Canedo, 2018). Em transferência de calor, esse número adimensional auxilia na análise da espessura relativa das camadas limite de momento e térmica.

No contexto das trocas de calor por convecção em regime de turbulência, três desses parâmetros são especialmente importantes, sendo definidos conforme as seguintes equações:

$$\mathrm{Nu} = \frac{hL}{k} \quad (5)$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (6)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (7)$$

A equação (5) representa o número de Nusselt; a equação (6), o número de Prandtl

anteriormente comentado; a equação (7), o número de Reynolds, sendo L um comprimento característico em [m], μ é a viscosidade dinâmica do fluido em [Pa.s], c_p é o calor específico a pressão constante do fluido [J/kg.K] e v é a velocidade do fluido em [m/s].

Canedo (2018) explica que o número de Nusselt assume grandes valores quando predomina a convecção nas trocas de calor, e valores pequenos quando predomina a condução. Segundo Çengel e Ghajar (2012), o número de Prandtl compara a difusividade da quantidade de movimento com a difusividade térmica, assumindo grandes valores quando aquela é mais expressiva que esta e pequenos valores, caso contrário. Ainda de acordo com esses autores, o número de Reynolds está relacionado

ao regime de escoamento do fluido. Os métodos empíricos de determinação do coeficiente de película são diretamente dependentes desses três parâmetros adimensionais.

2.5 SISTEMAS ALETADOS

As aletas ou superfícies estendidas são elementos dispostos sobre uma superfície, constituídos de um material condutor térmico, cuja finalidade é aumentar a área de transferência de calor por convecção entre a superfície sólida e o meio fluido; os elementos podem possuir diversas geometrias distintas e, entre elas, podem-se citar as geometrias retangular, cilíndrica, triangular e parabólica (Canedo, 2018).

A quantificação analítica do fluxo de calor em sistemas aletados é feita construindo-se uma equação de conservação de energia de um elemento da aleta que corresponde à sua seção transversal com uma espessura infinitesimal. São levados em consideração parcelas de condução e convecção, e obtém-se ao final a equação diferencial (8) que governa as trocas de calor em aletas com área de seção transversal e condutividade térmica constantes:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \tag{8}$$

Na equação (8), θ é a temperatura normalizada em um ponto da aleta, $m = \sqrt{hp/kA}$ é o coeficiente da aleta e p é o perímetro da aleta em [m].

A equação diferencial (8) é linear de segunda ordem com coeficientes constantes, e, portanto, pode ser resolvida através de processo analítico (Boyce; Diprima, 2020). Em função dessa facilidade, existem soluções bem definidas para diversas geometrias, mas todas ainda possuem um teor empírico devido à presença do coeficiente de transferência de calor por convecção h.

2.6 CAMADA-LIMITE

Em escoamentos externos afastados de corpos sólidos, a hipótese de que as tensões viscosas são insignificantes em relação às inerciais é válida, e, portanto, os termos viscosos são desprezados. Entretanto, nas regiões do escoamento próximas a uma parede ou obstáculo sólido, a condição de não escorregamento na interface sólido-fluido torna as tensões viscosas significativas na análise global do escoamento, e essa região é conhecida como camada-limite hidrodinâmica (White, 2018).

Analogamente, a continuidade do campo escalar de temperatura exige que haja uma transição suave entre a temperatura do meio sólido e aquela do meio fluido; a região na qual ocorre essa transição é denominada camada-limite térmica. Roma (2006) afirma que a fronteira da camada-limite térmica com o escoamento externo corresponde aos pontos cuja temperatura corresponde a 99% da temperatura do meio externo.

As camadas-limite hidrodinâmica e térmica coexistem na região próxima à interface sólido-fluido, porém, não necessariamente coincidem (Castro, 2017; Schulz, 2003). A dificuldade do estudo analítico da camada-limite, aliada à frequente ocorrência

de turbulência no escoamento, foi o principal fator que levou à definição do coeficiente h.

2.7 ESCOAMENTOS TURBULENTOS

Conforme já descrito, a turbulência se caracteriza pelo movimento errático do meio fluido, sendo um fenômeno matematicamente complexo. Segundo Mathieu e Scott (2000), a turbulência é um fenômeno natural oscilatório e não previsível, o qual apresenta flutuações de velocidades numa vasta gama de diferentes escalas de comprimento e de tempo.

Muitos escoamentos observados na natureza e a maior parte dos escoamentos práticos de engenharia se dão de modo turbulento. A turbulência é um fenômeno complexo de ser modelado analiticamente, e a utilização de métodos semi-empíricos é dominante nas aplicações práticas.

Um dos métodos de análise da turbulência em escoamentos consiste na aplicação de ferramentas estatísticas nas equações, decompondo as propriedades em um valor médio e uma flutuação em torno deste. Assim, no estudo da turbulência considera-se a evolução de determinadas grandezas no espaço e tempo, definindo-as através de funções médias como recurso à minimização da complexidade natural do fenômeno.

Davidson (2004) informa que essa tática de fato atenuou a complexidade do problema, no entanto o surgimento de termos associados à média de um produto de flutuações impossibilitou o fechamento do sistema de equações. Assim, pesquisadores propuseram modelos empíricos para sanar essa dificuldade. No âmbito teórico, um dos métodos propostos para contornar o problema do não fechamento é o método OQA, apresentado na próxima seção.

Schulz *et al*. (2011a) distinguem os modelos propostos entre a priori e a posteriori. Assim, modelos a priori definem em sua conceituação todas as grandezas iniciais para o estudo. Quanto aos modelos a posteriori, as grandezas que caracterizam o não fechamento são estudadas em separado, considerando-se modelos empíricos ou heurísticos. O método OQA é considerado um modelo a priori.

2.8. MÉTODO OQA

Proposto por Schulz (1985 *apud* Gonçalves, 2014, p. 56), o método OQA consiste na representação de uma propriedade em turbulência por meio de uma onda quadrada bimodal aleatória em torno do seu valor médio. Conforme Gonçalves (2014), o perfil normalizado da variável é definido pela equação (9), em termos da concentração em transferência de massa, mas também válido para a temperatura:

$$n = \frac{\underline{c} - c_\infty}{c_s - c_\infty} \tag{9}$$

A variável c é a concentração de massa, o índice "s" corresponde à superfície, o índice "∞", ao meio fluido, e $\underline{c}$ é o valor médio. A função n será considerada como um perfil normalizado de transferência da propriedade em análise.

Posteriormente, Schulz e Janzen (2009) observaram que a amplitude do sinal da onda, dada pela diferença entre $\underline{c}$ e c_s ou entre $\underline{c}$ e c_∞, sofre uma redução em razão dos efeitos de difusividade molecular, e para considerar esse efeito, foi definida uma função de redução α, variando de 0 a 1, que corresponde ao percentual de diminuição da amplitude. Para fins de simplificação da análise, a função α foi considerada constante em grande parte dos trabalhos sobre o método OQA (Castro, 2017; Gonçalves, 2014).

Segundo Gonçalves (2014), a concentração e a velocidade são duas grandezas que devem ser levadas em conta na transferência de calor em turbulência. A dedução da função coeficiente de correlação entre as flutuações dessas grandezas revela uma dependência direta do RMS (média quadrática) da velocidade e da concentração. Gonçalves (2014, p. 66) afirma que as flutuações advêm da mesma causa, portanto se espera que os registros das flutuações de velocidade e de concentração sejam, ao menos, parcialmente sobrepostos. Assim, essa característica deve ser considerada na análise, e isso é feito através de uma função de superposição $0 \leq \beta \leq 1$, de modo que $\beta = 1$ indica uma sobreposição total e $\beta = 0$ uma sobreposição inversa.

As funções n, α, β e RMS da velocidade são definidas a priori, isto é, são definidas antecipadamente e permitem a parametrização dos termos da equação governante sem a necessidade de processos ad hoc. Com isso, os termos estatísticos já são predefinidos e o problema do não fechamento é solucionado (Schulz, 1985; Schulz; Schulz, 1991; Schulz; Janzem, 2009; Schulz, 2011a, 2011b; Gonçalves, 2014, para mais detalhes acerca do método OQA).

2.9. MÉTODO DE EULER

O método de Euler é um método direto empregado para obter solução numérica para equações diferenciais ordinárias de primeira ordem com condições iniciais conhecidas. Assim, é aproximada para problemas de valor inicial da forma $\boldsymbol{y}' = \boldsymbol{f}\ (\boldsymbol{t}, \boldsymbol{y})$, $\mathbf{y}(\mathbf{t}_0) = \mathbf{y}_0$.

O procedimento consiste em definir um passo $\boldsymbol{h}$ que representa a distância entre dois valores de t consecutivos, ou seja, t_n e t_{n+1}. Feito isso, e tomando $y = \phi(t)$ como a solução particular desejada, calcula-se qualquer $y_{n+1} = \phi(t_{n+1})$ através da fórmula de Euler:

$$y_{n+1} = y_n + h.f(t_n, y_n) \tag{10}$$

Uma vez que as equações obtidas através da modelação via OQA resultam em equações diferenciais não lineares, torna-se necessária a aplicação de métodos numéricos para a solução das mesmas; o método de Euler é considerado apropriado aos problemas de valores iniciais e foi empregado pelos autores relacionados a esta área de estudo em seus desenvolvimentos.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho é de natureza teórico-numérica, envolvendo a análise de resultados numéricos obtidos a partir dos desenvolvimentos de equacionamentos propostos. Trata-se de uma pesquisa básica e descritiva.

A metodologia consistiu no aprofundamento dos assuntos e conceitos relacionados

à transferência de calor e do método OQA, sendo subdividida em cinco etapas principais:

(i) definição da equação do fenômeno: foram analisados os parâmetros da fenomenologia das trocas térmicas em sistemas aletados a fim de se adequar a equação governante coerente ao processo;

(ii) ampliação do referencial teórico: foram realizadas pesquisas com vistas a ampliar o conhecimento sobre as soluções empíricas da literatura clássica em relação ao fenômeno em estudo;

(iii) parametrização da equação obtida em (i) pelo método OQA: os termos da equação foram decompostos em média e flutuação, reorganizados e parametrizados pelas funções n, α, β e RMS da velocidade através das expressões fornecidas pelo método OQA. Nessa etapa, foi observada a necessidade de adequação de uma das equações parametrizadas do método OQA comparada a trabalhos anteriores.

(iv) determinação do perfil térmico: foi definida e desenvolvida uma solução numérica do equacionamento desenvolvido em (iii) a fim de se obter o perfil de troca térmica.

(v) comparação de resultados: foi feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos em (iv) e as soluções empíricas estudadas em (ii) em relação ao perfil térmico por convecção.

4 RESULTADOS PARCIAIS

4.1 ADAPTAÇÃO DE NOVA PARAMETRIZAÇÃO NO MÉTODO OQA

Ao longo das revisões e análises das parametrizações propostas para as variáveis de modo a priori pelo método OQA, observou-se que a definição dada (vide equação (11)) para o termo do produto de flutuação de temperatura pela derivada de segunda ordem da temperatura (derivada de variáveis médias) tem uma proposição de sinal em sua definição que os autores presentes consideram equivocada. Foi realizada uma nova determinação do termo em questão e se propõe uma alteração nesta definição, dada pela equação (12), a qual será considerada nos desenvolvimentos deste trabalho.

Haverá alternância de sinais no último termo entre chaves entre as equações supracitadas, e, portanto, deve-se avaliar o impacto dessa nova definição sobre os estudos já desenvolvidos.

4.2 MODELAGEM E EQUAÇÕES

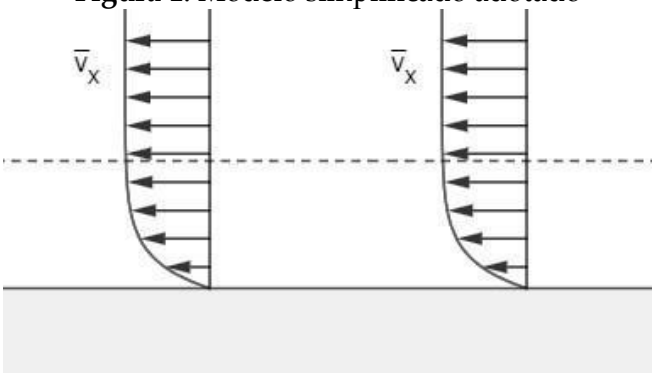
Foi considerado um modelo bidimensional para análise de um sistema aletado, considerando-se aletas de formato retangular, paralelas entre si e igualmente espaçadas. Por tais condições, a evolução da camada limite térmica será considerada semelhante à de uma placa plana, ou seja, com o estudo em relação ao topo das aletas. O escoamento preferencial foi considerado paralelo à placa, direção x, e em regime turbulento. As aletas foram consideradas grandes o suficiente para que se tornem desprezíveis as variações

médias das propriedades do escoamento ao longo de x, permitindo a adoção de perfis estacionários das médias de velocidade e temperatura.

A análise do escoamento se restringiu às coordenadas y e z, considerando-se uma turbulência estacionária em que as oscilações das flutuações de velocidade fossem semelhantes a uma grade oscilante no estudo de trocas mássicas em tanques. Na direção y, ocorre a evolução da camada limite de transferência térmica. O regime de transferência e escoamento foram considerados permanentes.

A figura 1 ilustra as condições adotadas nesse modelo simplificado.

Figura 1: Modelo simplificado adotado



Fonte: autoria própria, 2024.

As condições acima foram aplicadas na equação (4) de conservação da energia tratada estatisticamente, resultando na equação (13), e considerados os balanços de momentos centrais de ordem 0 e 1 (ver Gonçalves, 2014, p. 61-62, para detalhamento), equações (14) e (15), a princípio, e, se necessário, ordens superiores serão consideradas. Em seguida, foram introduzidos os parâmetros do método OQA para parametrização das variáveis, resultando no sistema de equações (16).

$$\frac{1}{\theta+1}\left(\underline{u}\frac{\partial \overline{T'^{\theta+1}}}{\partial x}+\underline{\frac{\partial\left(\overline{u'T'^{\theta+1}}\right)}{\partial x}}\right)=\frac{k_t}{\rho c_e}\left(\underline{\overline{T'^{\theta}}}\frac{\partial^2\overline{T}}{\partial z^2}+\underline{\overline{T'^{\theta}}\frac{\partial^2\overline{T'}}{\partial x^2}}+\underline{\overline{T'^{\theta}}\frac{\partial^2\overline{T'}}{\partial z^2}}\right) \quad (13)$$

Na equação (13), u é a velocidade preferencial na direção x, o apóstrofo

representa os termos com flutuações de temperatura e velocidade e a barra representa o operador média, e θ a ordem do balanço dos momentos centrais.

$$\frac{\partial \overline{u'T'}}{\partial x}=\frac{k_t}{\rho c_e}\left(\frac{\partial^2\overline{T}}{\partial z^2}\right) \quad (14)$$

$$\frac{1}{2}\left(\underline{u}\frac{\partial \overline{T'^2}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{u'T'^2}}{\partial x}\right)=\frac{k_t}{\rho c_e}\left(\underline{\overline{T'\frac{\partial^2 T'}{\partial x^2}}}+\underline{\overline{T'\frac{\partial^2 T'}{\partial z^2}}}\right) \quad (15)$$

$$\left\{\frac{\partial^2\overline{T}}{\partial z^2}=(T_S-T_\infty)\frac{\partial^2 n}{\partial z^2}\ \frac{\partial \overline{u'T'}}{\partial x}=(T_S-T_\infty)\frac{\partial}{\partial x}\left[n(1-n)A(2\beta-1)\sqrt{\overline{u'^2}}\left(\sqrt{\frac{B}{1-B}}+\sqrt{\frac{1-B}{B}}\right)\right]\right. \quad (16)$$

Na equação (16), A representa (1-α), e B representa a relação (β+ n - 2βn). Evidentemente vários passos algébricos foram aqui omitidos, e muitos outros se mostraram necessários a fim de se simplificar o sistema de equações (16), podendo inclusive ser necessária a adição de mais equações de ordem superior. Em geral, foram seguidas as tentativas de simplificação já operadas em trabalhos anteriores, como em Gonçalves (2014), e a seguir investigadas as condições de contorno físicos do problema para decisão da operacionalidade da solução numérica a ser adotada.

O sistema (16) não é linear, mas a forma como as derivadas de segunda ordem aparece nas equações possibilita que estas sejam explicitadas em função das derivadas de primeira ordem. Isso permite a aplicação de um método numérico para equações diferenciais ordinárias. Como se trata de um problema de valores de contorno, um no topo da aleta (**z** = 0) e outro no meio externo distante (**z** → ∞), as derivadas de primeira ordem talvez precisem de serem supostas até que ambas as condições de contorno sejam satisfeitas.

As parametrizações e definições do método OQA aplicadas nas equações (14) e (15) estão descritas nos sistemas (17) e (18) a seguir, respectivamente.

$$\{\frac{\partial^2 \underline{T}}{\partial z^2} = (T_S - T_\infty)\frac{\partial^2 n}{\partial z^2} \quad \frac{\partial \underline{u'T'}}{\partial x} = (T_S - T_\infty)\frac{\partial}{\partial x}\left[n(1-n)A(2\beta-1)\sqrt{\underline{u'^2}}\left(\sqrt{\frac{B}{1-B}} + \sqrt{\frac{1-B}{B}}\right)\right] \quad (17)$$

$$\{\frac{\partial \underline{T'^2}}{\partial x} = (T_S - T_\infty)^2(1-2n)\frac{\partial(n(1-n)A^2)}{\partial x} \quad \frac{\partial \underline{u'T'^2}}{\partial x} = (T_S - T_\infty)^2\frac{\partial}{\partial x}\left\{n(1-n)A^2\sqrt{\underline{u'^2}}\left[B\sqrt{\frac{B}{1-B}} + (B-1)\sqrt{\frac{1-B}{B}}\right]\right\} \quad \underline{T'\frac{\partial^2 T'}{\partial x^2}} = n(1-n)A(T_S - T_\infty)^2\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \quad \underline{T'\frac{\partial^2 T'}{\partial z^2}} = n(1-n)A(T_S - T_\infty)^2\frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \quad (18)$$

Após a aplicação do método OQA sobre os sistemas (17) e (18), resultaram as equações (19) e (20) de grau 0 e 1, respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[n(1-n)A(2\beta-1)\sqrt{\underline{u'^2}}\left(\frac{1}{\sqrt{B(1-B)}}\right)\right] = \frac{k_t}{\rho c_e}\left(\frac{\partial^2 n}{\partial z^2}\right) \quad (19)$$

$$\frac{\overline{u}(1-2n)}{2}\left(n(1-n)\frac{\partial A^2}{\partial x} + (1-2n)A^2\frac{\partial n}{\partial x}\right) + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x}\left\{n(1-n)A^2\sqrt{\overline{u'^2}}\left[\frac{B}{\sqrt{B(1-B)}} - \sqrt{\frac{1-B}{B}}\right]\right\} = \frac{k_t}{\rho c_e}n(1-n)A\left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2}\right) \quad (20)$$

Contudo, o equacionamento resultante ainda se mostrou consideravelmente complexo, ao depender de muitas variáveis extras, principalmente advindas do método OQA aplicado. Em razão disso, foi imprescindível a adoção de novas suposições simplificadoras, substituiu-se $I = n(1-n)(2\beta-1)\sqrt{\underline{u'^2}}\left(\frac{1}{\sqrt{B(1-B)}}\right)$ com o intuito de diminuir as incógnitas e auxiliar no algebrizar matemático. Assim, trabalharam-se equações (19) e (20) com enfoque principal nas derivadas e, devolvendo a definição resultante da primeira na segunda pelo termo I com o A constante, chegou à equação.

Após um amplo processo de análise e discussões, com o objetivo de equilibrar a consistência física das equações e a viabilidade de uma solução, chegou-se à formulação final do modelo simplificado.

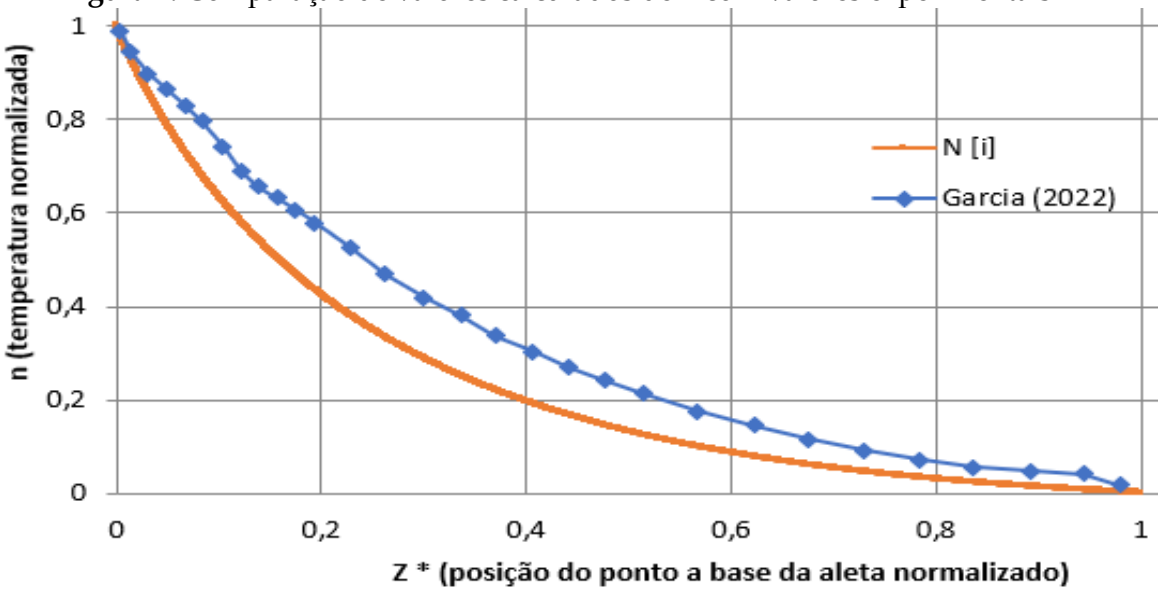
$$\frac{\frac{(\beta+n-2\beta n-1)}{(2\beta-1)}\left[\frac{k_t}{\rho c_e}\left(\frac{\partial^2 n}{\partial z^2}\right)-\frac{\left(2\frac{k_t}{\rho c_e}\frac{\partial n}{\partial z}+C\right)}{(2\beta-1)}\frac{\partial\beta}{\partial x}\right]+\frac{\left(\frac{k_t}{\rho c_e}\frac{\partial n}{\partial z}+C\right)}{(2\beta-1)}\left[\frac{\partial\beta}{\partial x}+\frac{\partial n}{\partial x}-2\beta\frac{\partial n}{\partial x}-2n\frac{\partial\beta}{\partial x}\right]}{=-\underline{u}(1-2n)^2 A\frac{\partial n}{\partial x}} \tag{21}$$

Nesse modelo, não se considerou qualquer tipo de escoamento preferencial, e as flutuações de velocidade e temperatura foram restringidas à direção z, reduzindo o problema a uma configuração unidimensional. O domínio de solução foi limitado à região a partir da superfície superior da aleta (z positivo). Em termos práticos, tal modelo pode ser comparado a uma grade oscilante, cuja função é agitar um fluido ou mistura estacionária em uma câmara, com o propósito de promover sua mistura e homogeneização. Esse tipo de abordagem é frequentemente encontrado em estudos de transferência turbulenta de oxigênio na interface ar-água, conforme descrito em diversas pesquisas como Gonçalves (2014) e Schulz *et al*. (2011a).

O método de Euler foi utilizado para a solução numérica, e seu detalhamento pode ser encontrado em Chapra e Canale (2016). Para sua devida implementação, a equação (21) foi rearranjada algebricamente com intuito de obter a função de explicitar para a derivada de segunda ordem de n em função das demais variáveis. Nesse processo de isolamento, nomeou-se a derivada primeira de n para s. A simulação foi, então, implementada em uma planilha eletrônica do software Microsoft Excel®, a princípio subdividindo a escala de 0 a 1 do eixo z em 10.000 passos iguais.

A simulação numérica foi executada considerando-se as propriedades do ar atmosférico a 25° C, para o qual $\frac{k_t}{\rho c_e} = 2{,}249 \times 10^{-2}\ m^2/s$. Foi considerado o valor da primeira derivada negativa pois o perfil térmico esperado da função é decrescente, além do valor da constante de integração resultado do processo matemático sendo nulo. O valor de $\frac{\partial\beta}{\partial x}$ foi fixo ao longo do eixo z, pois foi realizada uma análise unidimensional do comportamento da função ao decorrer do proposto. Entretanto, a função de β foi mantida e calculada ao longo dos passos do método de Euler. Os resultados obtidos foram representados graficamente, o que gerou o gráfico, em laranja, da Figura 1. Nele também se encontra a comparação do perfil térmico com os dados experimentais de Garcia *et al.* (2022), em azul.

Figura 1: Comparação de valores calculados de n com valores experimentais



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Observa-se na Figura 1 que o perfil térmico aprimorado pelo meio do método OQA apresenta uma boa aproximação em relação ao comportamento esperado fisicamente, especialmente no que diz respeito à forma geral da curva. Apesar dos desafios inerentes à modelagem completa do escoamento térmico, historicamente têm sido adotados modelos aproximados específicos para cada uma das diferentes regiões de escoamento (laminar, transição e turbulento). Esses modelos visam garantir a precisão e a continuidade das variações nas interfaces, o que foi mantido utilizando uma única formulação.

Assim, o perfil teórico proposto pelo método destacou as principais tendências da dissipação térmica, como a diminuição da característica exponencial do gradiente térmico e a convergência para uma assíntota ao final da transferência de calor. Ainda assim, foram observadas pequenas discrepâncias em relação ao perfil experimental, particularmente em posições específicas na base do sistema desenvolvido, especialmente em regiões de transição ou em condições em que o regime térmico não se comporta de forma transparente (zona de transição). Essas diferenças podem estar relacionadas a limitações propostas inicialmente nesse trabalho para resolução do método OQA.

O perfil apresentado na Figura 1 está, de forma geral, em concordância com o comportamento esperado fisicamente. A temperatura diminui de maneira gradual e, à medida que se avança em direção à região turbulenta, ocorre uma transição progressiva no comportamento térmico. Próximo à borda da zona de transferência, a redução da temperatura torna-se menos acentuada, refletindo o aumento da influência dos mecanismos de transporte por convecção e turbulência. Essa mudança é consistente com o aumento do efeito das flutuações térmicas de velocidade, que promovem maior homogeneidade térmica e alteram o gradiente de temperatura. Essas observações corroboram o comportamento teórico esperado para escolhas com transição de regimes térmicos, reforçando a validade do modelo na descrição das principais características do campo térmico.

5 CONCLUSÃO

Os desenvolvimentos efetuados denotam as dificuldades comumente encontradas no estudo analítico da transferência térmica em sistemas aletados, ainda considerando-se aqui simplificações notáveis quanto à geometria e condições do escoamento e transferência térmica.

Esta pesquisa representa um progresso nos estudos da modelagem estatística da transferência de calor turbulenta modelada segundo o método OQA, ao se propor uma correção de sinal em uma das equações fundamentais do método e ao perfil térmico obtido para satisfazer as previsões físicas.

A reavaliação de cada parametrização do método OQA possibilitou averiguar um erro de sinal em uma das derivadas de variáveis médias, sendo assim foi proposta uma nova relação pelos autores desta pesquisa, a qual será observada nos desenvolvimentos seguintes à pesquisa.

O perfil experimental segue um comportamento qualitativamente semelhante ao do teórico Garcia (2022) e apresenta pequena divergência do modelo em algumas regiões intermediárias, porém essas diferenças são comuns em análises de transferência de calor. Isso pode ser resultado de diversos fatores, como imperfeições no material, flutuações de velocidade (efeitos de condução transversal), entre outros.

Recomenda-se que trabalhos subsequentes dediquem esforços à investigação dos seguintes pontos: modelar e solucionar o problema da transferência de calor turbulenta pelo método OQA sem adotar a hipótese de uma função constante. Além disso, sugere-se a realização de que o modelo possa ser aprimorado para incluir os vãos entre as aletas e as trocas térmicas horizontais, avaliando as equações em mais de uma dimensão.

REFERÊNCIAS

BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C. **Equações diferenciais elementares e problemas de valores de contorno**. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CANEDO, E. L. **Fenômenos de transporte**. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CASTRO, G. B. **Transferência convectiva turbulenta unidimensional de calor modelada segundo o método de ondas quadradas aleatórias com função coeficiente de redução constante**. Monografia (Graduação) – Centro Universitário de Patos de Minas, Patos de Minas, 2017.

CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. **Métodos numéricos para engenharia**. 7. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2016.

ÇENGEL, Yunus A; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos**: fundamentos e aplicações. São Paulo: Mc Graw Hill, 2013.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa**. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2012.

DAVIDSON, P. A. **Turbulence**: an introduction for scientists and engineers. Oxford, University Press Inc, New York, 2004.

FRÓES, J. M. A. M.; GONÇALVES, B. B. Solução numérica da transferência térmica em camada-limite turbulenta modelada segundo ondas quadradas aleatórias. *In*: XXIX CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA. **Anais** [...]. Goiânia, 2023.

FROES, J. M. A. M.; GONÇALVES, B. B. **Modelagem numérica do coeficiente de transferência térmica por convecção em sistemas aletados segundo ondas quadradas aleatórias**. 2023. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário de Patos de Minas. Orientador: Bruno Batista Gonçalves.

GARCIA, R. L.; SAUER, M. C.; AMARAL, R. A.; ZABADAL, J. R. S. Experimento didático de baixo custo para determinação do perfil de temperatura de uma aleta exposta ao ar ambiente. **Revista Liberato**, [*S. l.*], v. 22, n. 38, p. 189-200, 2022.

GONÇALVES, B. B. **Detalhando a solução unidimensional do método OQA com função coeficiente de redução constante aplicado ao transporte escalar interfacial turbulento**. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

INCROPERA, F. P. *et al*. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MATHIEU, J.; SCOTT, J. **An Introduction to turbulent flow**. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

ROMA, W. N. L. **Fenômenos de transporte para engenharia**. 2. ed. São Carlos: Roma, 2006.

SCHULZ, H. E. **Investigação do mecanismo de reoxigenação da água em escoamento e sua correlação com o nível de turbulência junto à superfície**. 1985. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

SCHULZ, H. E. **O essencial em fenômenos de transporte**. São Carlos: Editora USP, 2003.

SCHULZ, H. E.; JANZEN, J. G. Concentration fields near air-water interfaces during interfacial mass-transport: oxygen transport and random square wave analysis. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 3, p. 527-537, São Paulo, 2009.

SCHULZ, H. E.; SCHULZ, S. A. G. **Modelling below-surface characteristics in water reaeration**. Water pollution, modeling, measuring, and prediction. Computational Mechanics Publications and Elsevier Applied Science, p. 441-454, Southampton, 1991.

SCHULZ, H. E.; LOPES JUNIOR, G. B.; SIMÕES, A. L. A.; LOBOSCO, R. J. **Onedimensional turbulent transfer using random square waves – scalar/velocity and velocity/velocity interactions**. In: Hydrodynamics: Advanced Topics, In Tech, Rijeka, p. 334, 2011(a)

SCHULZ, H. E.; SIMÕES, A. L. A.; JANZEN, J. G. Statistical approximations in gas-liquid mass transfer. *In*: KOMORI, S; MCGILLIS, W.; KUROSE, R. (eds.). **Gas Transfer at Water Surfaces 2010**, Kyoto University Press, Kyoto, p. 208-221, 2011(b)

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos**: fundamentos e aplicações. Porto Alegre: AMGH, 2018.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 227-247, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Torra de café: proposta de automação do sistema de aquecimento a gás

Coffee roasting: proposal for automation of the gas heating system

NATHAN BRENNIER DE LIMA CAETANO
Discente de Engenharia Mecânica (UNIPAM)
nathanblc@unipam.edu.br

GUILHERME ANTONIO MOREIRA DE FARIA
Discente de Engenharia Mecânica (UNIPAM)
guilhermeamf@unipam.edu.br

SANDRA LÚCIA NOGUEIRA
Professora orientadora (UNIPAM)
sandraln@unipam.edu.br

Resumo: Este estudo propõe a automação do sistema de torra de café, com o objetivo de aprimorar a eficiência, a qualidade e a segurança do processo. O método manual de torra está sujeito a variações que comprometem a uniformidade e o padrão final do produto. Para superar essas limitações, foi desenvolvido um protótipo com controle baseado em Arduino, que possibilita o monitoramento da temperatura e a padronização do processo. A metodologia incluiu revisão teórica sobre o processo de torra, visitas técnicas a empresas para coleta de dados, modelagem no software SolidWorks 2020 e programação do sistema de controle em Arduino. Dados de temperatura e tempo foram coletados apenas para validar o funcionamento do sistema de automação, sem a realização de testes específicos em condições reais de operação. Os resultados indicam que o protótipo apresenta potencial para melhorar a eficiência e a consistência do café torrado, configurando-se como uma solução promissora para a indústria cafeeira. Conclui-se que a automação do sistema pode gerar benefícios significativos em termos de eficiência energética, qualidade do produto e segurança operacional, recomendando-se que pesquisas futuras aprofundem os testes em contextos reais de produção.
Palavras-chave: torrefação; automação; eficiência; Arduino.

Abstract: This study proposes the automation of the coffee roasting system with the objective of improving the efficiency, quality, and safety of the process. The manual roasting method is subject to variations that compromise product uniformity and final quality standards. To overcome these limitations, a prototype with Arduino-based control was developed, enabling temperature monitoring and process standardization. The methodology included a theoretical review of the roasting process, technical visits to companies for data collection, modeling in SolidWorks 2020 software, and programming of the control system in Arduino. Temperature and time data were collected solely to validate the operation of the automation system, without performing specific tests under real operating conditions. The results indicate that the prototype has potential to improve the efficiency and consistency of roasted coffee, positioning itself as a promising solution for the coffee industry. It is concluded that system automation can generate

significant benefits in terms of energy efficiency, product quality, and operational safety, and it is recommended that future research deepen testing in real production contexts.
Keywords: roasting; automation; efficiency; Arduino.

1 INTRODUÇÃO

O setor de produção de café é uma das principais fontes de renda em muitas regiões do Brasil. A qualidade e o sabor do café são diretamente influenciados pela torra, um processo que pode ser cansativo e sujeito a erros quando realizado manualmente, comprometendo a qualidade final do produto (Santo, 2015). Neste contexto, a automatização do sistema de torra de café surge como uma solução promissora.

Diferentemente dos modelos de máquinas automáticas disponíveis no mercado, que utilizam aquecimento elétrico, este projeto visa desenvolver um protótipo a gás. O diferencial é a automação do processo realizado pelo operador, evitando erros e falhas humanas e permitindo que ele se dedique a tarefas mais importantes (Santo, 2015).

A utilização de um sistema de aquecimento a gás torna o processo mais eficiente e seguro, pois o gás pode ser controlado com precisão e apresenta menor risco de acidentes. Além disso, a máquina de torra de café automatizada contribui para a otimização dos processos na indústria de café, permitindo a produção em larga escala com alta qualidade e padronização (Freitas, 2023).

Portanto, o objetivo geral deste estudo é desenvolver um modelo 3D, em dimensões reduzidas, de um torrador de café para testar a programação em Arduino, com o propósito de apresentar uma automação que potencialize a eficiência e o controle de temperatura no processo de torra. Entre os objetivos específicos, destacam-se a avaliação inicial da influência da automação por meio da programação e o desenvolvimento de um sistema de controle baseado em Arduino, visando maior precisão e consistência.

Dessa forma, este trabalho busca contribuir para o setor de produção de café ao propor a automação do processo de torra, com potencial para ampliar a eficiência e a qualidade do produto final (Lopes *et al*., 2021). A automatização da máquina de torra de café com um sistema de aquecimento a gás é uma iniciativa relevante para aperfeiçoar o controle operacional, tornando o processo mais seguro e eficiente. Apesar dos resultados preliminares indicarem avanços promissores, futuros estudos são necessários para avaliar o impacto da automação em condições reais de produção, de modo a validar as melhorias esperadas.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 TORRA DE CAFÉ

A torra de café é uma etapa crítica no processo de produção, pois influencia diretamente o sabor, o aroma e a qualidade geral da bebida final (Monteiro *et al.*, 2006). Neste contexto, a automatização do sistema de aquecimento a gás representa uma

abordagem inovadora e eficiente para aprimorar a torra de café. Para compreender a importância dessa automação, é crucial considerar diversos aspectos teóricos e práticos.

Os aspectos teóricos e práticos da torra de café resultam da combinação de compostos químicos gerados pelas reações que ocorrem durante a torrefação. O grau de torra influencia diretamente o sabor, para alcançar o perfil desejado, é necessário compreender como o grão foi torrado e quais compostos serão extraídos para compor a bebida. O profissional, com base em conhecimento teórico e experiência prática, ajusta o processo de torra para influenciar a nota final, avaliando o ponto ideal por meio da degustação, determinando assim o sabor e o aroma (Melo, 2004).

Para selecionar as notas sensoriais de sabores do café, é fundamental compreender que elas resultam de uma interação complexa entre a origem do grão, o processo de cultivo, a colheita, e especialmente o ponto de torra. A torra é um fator determinante porque é durante esse processo que os compostos químicos responsáveis pelo aroma e sabor são transformados e realçados. Um café de torra clara, por exemplo, tende a preservar características frutadas e florais, enquanto uma torra mais escura enfatiza sabores caramelizados, achocolatados ou tostados. Para alcançar uma nota específica da roda de sabores, é necessário ajustar a torra de forma precisa e atenta, observando o tempo e a temperatura para desenvolver os compostos desejados sem mascarar outros. Além disso, a degustação contínua e o uso de cupping (degustação auxiliam na identificação e no refinamento das notas sensoriais, permitindo que cada etapa do processo contribua para um perfil de sabor harmonioso e único (ICAFE, 2020).

2.2 CONTROLE DE TEMPERATURA

A temperatura desempenha um papel fundamental na torra do café. Durante o processo, os grãos de café passam por várias etapas, incluindo secagem, caramelização e desenvolvimento de sabor.

Os graus de torra são determinados pela região onde o café é comercializado, pois cada lugar tem um padrão de torra específico. Sendo assim, conforme Melo (2004) enfatiza, esses padrões estão relacionados aos estágios de torra, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Estágios de torra do café

Estágio	Temperatura (°C)	Característica
Amarelo	90 - 120	O grão começa a liberar umidade.
Marrom Claro	120 - 150	O grão começa a sofrer uma temperatura interna fazendo o mesmo ficar tostado, dando início a sua caramelização.
City	205 - 213	Nesta temperatura o café começa a "pipocar" ou como é chamado de "Crack". Neste ponto, o grão ainda está na sua caramelização, porém mais tostado.
Full City	213 - 220	Representa a torra *lighter Full City*, onde ocorre o segundo sinal "Crack" sendo assim chega ao ponto ideal de torra do grão.

Full City +	221 - 230	O grão já começa a perder óleo, e seu açúcar.
Viena	231 - 240	O grão já passa a ficar mais preto com um aspecto queimado, assim prejudica no aroma e no sabor do café.
French - Italian	243 - 265	O grão começa a se degradar, tornando-se carbonizado. Nesse processo, ele perde massa e componentes essenciais como açúcar, aroma e até mesmo a cafeína, pois o grão está totalmente queimado. Apesar disso, existem regiões que comercializam esse tipo de café, sendo comum encontrá-lo em supermercados e comércios menores.

Fonte: adaptado de Melo, 2004.

Dessa forma, a automação do sistema de aquecimento a gás permite um controle preciso da temperatura, garantindo que cada etapa ocorra no momento certo. Isso resulta em uma torra uniforme, o que evita o superaquecimento e melhora a consistência do sabor.

2.3 UNIFORMIDADE DA TORRA

A uniformidade da torra é um dos principais objetivos na produção de café de alta qualidade. A automação do sistema de aquecimento a gás proporciona uma distribuição homogênea de calor, eliminando variações que podem ocorrer durante a torra manual. Isso significa que todos os grãos são submetidos às mesmas condições, resultando em uma torra mais homogênea e saborosa (Melo, 2004).

Essa uniformidade é almejada por todos os produtores, que buscam oferecer cafés de alta qualidade para atender a uma demanda exigente. Nesse sentido, a automação do sistema de aquecimento a gás é uma solução confiável que pode garantir excelência. Na torra manual, ocorrem muitas variações, pois é difícil controlar todos os parâmetros, como temperatura e tempo de exposição. Com a automação, cada grão, dos mais externos aos mais internos, passa pelo mesmo processo, resultando em uma distribuição consistente de sabores e aromas em todo o lote. Investindo em tecnologia, os produtores que promovem a uniformidade da torra não apenas elevam seu padrão de produção, mas também agregam valor ao café, contribuindo para que a indústria e os consumidores valorizem esses padrões de qualidade (Fukami, 2024).

2.4 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL E ARDUINO

O Controlador Lógico Programável (CLP) é um dispositivo fundamental em automação industrial, desenvolvido para monitorar e controlar máquinas e processos em tempo real. Ele substitui sistemas de controle baseados em relés, oferecendo maior flexibilidade, robustez e eficiência. Projetado para suportar condições adversas encontradas no ambiente industrial, o CLP recebe informações de dispositivos de

entrada, como sensores, e executa uma lógica de controle programada para ativar saídas, como motores e válvulas, conforme necessário (Silva; Pereira, 2019).

O Arduino, por sua vez, é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto amplamente utilizada em projetos de automação, robótica e experimentação. Composto por placas equipadas com microcontroladores, o Arduino permite o desenvolvimento rápido de projetos interativos, possibilitando o controle de dispositivos como LEDs, sensores e motores de forma acessível e versátil (Banzi; Shiloh, 2018).

A principal diferença entre o Arduino e o CLP está nas aplicações e na robustez. O Arduino é ideal para projetos educacionais e experimentais, sendo uma plataforma aberta, acessível e adequada para controles básicos. Entretanto, ele não é projetado para operar em ambientes industriais adversos. Já o CLP é especialmente desenvolvido para automação industrial, oferecendo maior robustez e confiabilidade, com capacidade de funcionar em condições extremas, como altas temperaturas, presença de umidade e interferências eletromagnéticas.

2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O uso de sistemas de aquecimento a gás é conhecido por sua eficiência energética. Comparado a outras fontes de calor, o gás oferece uma resposta rápida às mudanças de temperatura, crucial para o controle preciso durante a torra. A automação permite otimizar o consumo de energia, tornando o processo mais econômico e ambientalmente sustentável. Os sistemas de aquecimento a gás, além da uniformidade na eficiência energética e no controle exato da temperatura, proporcionam uma distribuição homogênea do calor, garantindo que todos os grãos sejam aquecidos uniformemente no tambor de torrefação.

Para cafés de alta qualidade, o aquecimento uniforme é importante, pois pequenas variações de temperatura podem afetar o sabor e o aroma da bebida final. A capacidade de ajustar rapidamente a intensidade do calor durante a torra também contribui para essa precisão (Freitas, 2023).

A conveniência e a flexibilidade operacional também se destacam entre os benefícios; com a resposta rápida a mudanças de temperatura, o processo de torra pode ser ajustado para otimizar o uso dos grãos e adaptar-se a diferentes perfis ou condições climáticas, permitindo aos produtores uma grande variedade de métodos de torra e eliminando eventuais restrições ao processo (Freitas, 2023).

2.6 PADRONIZAÇÃO E PRODUTIVIDADE

A automação do processo de torra aprimora a padronização do produto final, essencial para produtores que desejam manter uma qualidade consistente e atender às expectativas dos consumidores. Sistemas automatizados operam continuamente com mínima intervenção humana, uma vantagem para grandes torrefadoras que processam grandes volumes de café.

A eficiência energética também é maximizada, pois os sistemas automatizados otimizam o uso de energia, reduzindo desperdícios e custos, o que contribui para a sustentabilidade ambiental e melhora a rentabilidade, tornando a indústria cafeeira mais competitiva e sustentável a longo prazo (Santo, 2015). Esses sistemas podem operar de forma contínua com supervisão mínima, processando volumes maiores de café em menos tempo e com menos erros. A eficiência aprimorada reduz o tempo de espera e contribui para uma maior eficiência energética, pois os sistemas automatizados são projetados para otimizar o consumo de energia durante a torra (Loring, 2018).

Esse *software* lê os parâmetros do processo de torra, como a temperatura inicial e o tempo inicial, e esses dados são armazenados em um banco de dados que envia sinais para o Arduino controlar a abertura e o fechamento das válvulas. O Arduino, devidamente programado, permite uma visualização abrangente do projeto, destacando-se como uma proposta inicial de automação. A integração de sensores de temperatura e temporizadores ao sistema Arduino contribui para o processo de leitura durante a torra, monitorando automaticamente os graus Celsius ao longo do tempo. Isso proporciona maior precisão, garantindo que cada etapa da torra seja controlada com exatidão, resultando em um café de alta qualidade. Dessa forma, a automação reduz a margem de erro humano e possibilita ajustes em tempo real, otimizando a eficiência e a consistência do produto final (Delfim *et al*., 2021).

3 METODOLOGIA

Neste estudo, foram realizadas visitas a duas empresas de café especializadas na comercialização de grãos e na degustação. O objetivo das visitas foi coletar dados para o processo de modelagem e desenvolvimento de peças no software SolidWorks 2020. Para isso, foram utilizados instrumentos de medição, como paquímetro e trena, que permitiram obter medidas precisas para o desenvolvimento das peças em escala reduzida de ½ (metade do tamanho real).

Os instrumentos de medição garantiram clareza e precisão na coleta de dados, conforme apresentado no Quadro 1. A trena foi utilizada para medir as bases da máquina em milímetros, enquanto o paquímetro foi empregado para determinar o diâmetro de circunferências, assegurando a exatidão necessária para o dimensionamento das peças.

Após a etapa de coleta de dados, os laboratórios de eletrônica e informática foram utilizados para a programação e prototipação do sistema. Além disso, o FabLab do Unipam foi empregado na fabricação das peças necessárias para a montagem do protótipo.

Quadro 1: Dimensões reais do torrador

	Torrador [mm]	**Bocal [mm]**	**Bancada [mm]**
Base	190 x 135	-	330 x 370
Altura	220	-	200
Diâmetro Interno	70	37,04	-
Diâmetro Externo	87,5	54,81	-
Ressalto do Bocal	-	35	-

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

O protótipo foi inspirado no torrador Probat Leogap, sendo um torrador de prova, conforme mostrado na Figura 1. Este equipamento é utilizado para a torra de café e possui capacidade para torrefação de 100 gramas de grãos em seu tambor. O tambor gira continuamente, movido por um motor elétrico acoplado a um eixo sem-fim, garantindo que os grãos permaneçam em constante movimento durante o processo de torra, proporcionando uma torra uniforme. A fonte de calor é gerada por chamas localizadas na parte inferior do equipamento, que aquecem o tambor.

A principal inovação em relação ao torrador original está na automação do processo de torra, eliminando a necessidade de intervenção humana. No protótipo desenvolvido, o mecanismo de basculamento da carcaça superior, ilustrado no Apêndice (Figura 3), foi projetado para operar de forma independente, dispensando qualquer ação manual. O sistema foi integrado a controles automatizados para garantir que o movimento de basculamento ocorra com precisão e eficiência, alinhando-se ao conceito de automação.

Esse desenvolvimento teve como objetivo tornar o processo de torra mais autônomo, reduzindo a dependência de ajustes manuais e facilitando a operação do equipamento. A automação busca não apenas aumentar a eficiência do processo, mas também melhorar a consistência e a segurança durante a torra.

Figura 1: Torrador de Café

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Foi realizada uma pesquisa sobre programação em Arduino como etapa inicial para o desenvolvimento do artigo, com a elaboração do código necessário, considerando as especificações técnicas do sistema. Após a criação do código, ele foi aplicado em um ambiente prático para verificar sua execução e funcionamento em condições reais. A aplicação seguiu um protocolo definido, detalhado no Anexo 1, permitindo avaliar a interação entre o *hardware* e o *software*.

Foram desenvolvidos desenhos técnicos da máquina em escala 1/2, uma representação esquemática utilizada como parte do planejamento do projeto. Essa escala foi escolhida para detalhar as proporções e os componentes com clareza, facilitando a compreensão do equipamento, conforme ilustrado no Apêndice (Figuras 2 e 3). Essa etapa foi fundamental para apresentar o projeto de forma visual, oferecendo uma base

técnica para orientar a montagem e minimizar dificuldades operacionais no processo. O desenho técnico foi elaborado com foco na funcionalidade e praticidade, sendo um suporte essencial para as etapas subsequentes.

A programação foi desenvolvida no laboratório de eletrônica do UNIPAM, utilizando os recursos disponíveis no local. O processo seguiu um passo a passo estruturado, com a utilização de *softwares* de suporte à linguagem Arduino, que possibilitaram a escrita e os ajustes do código de forma prática e eficiente.

O protótipo foi detalhado virtualmente no *software* SolidWorks, permitindo a criação de um modelo digital completo do equipamento. Essa etapa possibilitou a visualização precisa de todas as peças e suas dimensões. Após o desenvolvimento no *software*, cada componente foi preparado para ser cortado em MDF, um material viável e prático fornecido pelo UNIPAM, conforme ilustrado no Apêndice (Figura 5). O corte foi realizado de acordo com as especificações definidas no modelo digital, garantindo a conversão precisa do desenho técnico em peças físicas.

Com as peças em MDF cortadas, deu-se início à montagem do protótipo, utilizando cola de madeira para unir os componentes. Simultaneamente, os componentes eletrônicos do Arduino foram organizados e montados conforme descrito na Tabela 2, assegurando a integração correta entre o sistema eletrônico e o protótipo físico.

Tabela 2: Lista de materiais para montagem da programação.

Materiais	Quantidade
Tower Pro Micro 9g SG90	2
Protoboard	1
Sensor DS18B20	1
Arduino UNO	1
Fonte USB	1
Resistores 220 ohms	3
Resistores 1000 ohms	1
Jumpers	13
Leds	3

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

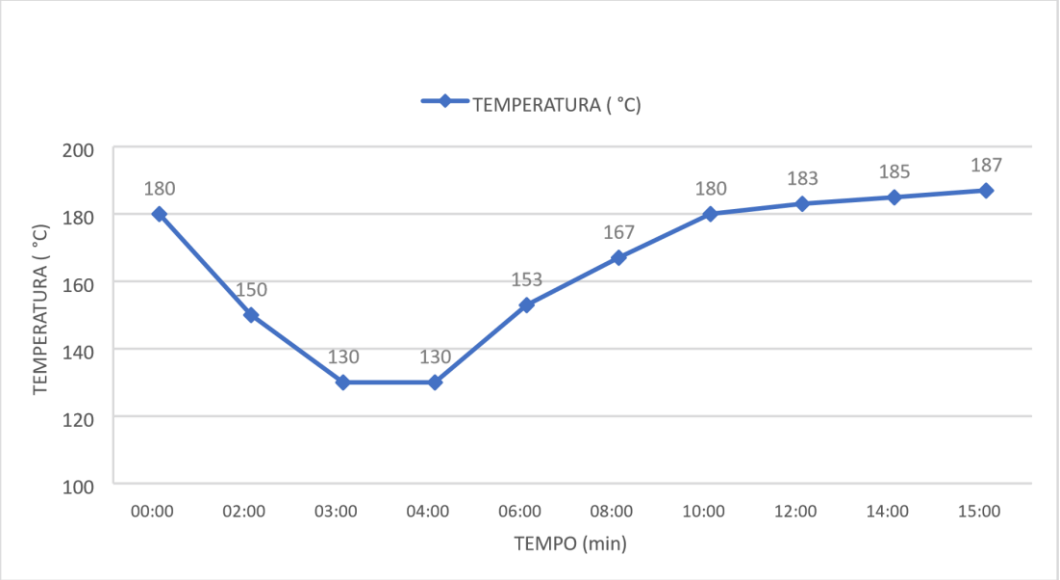
A programação desenvolvida e o modelo físico foram elaborados como parte dessa fase, permitindo que ambos os elementos fossem sincronizados de acordo com o projeto inicial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O gráfico de Temperatura x Tempo, apresentado na Figura 2, demonstra a relação entre esses dois parâmetros durante o processo de torra, permitindo que o operador da máquina defina um ponto de torra que pode ser inserido no Arduino para execução automática. A automação desse processo contribui para a precisão e eficiência da torra do café, garantindo maior controle sobre o resultado final.

Na coleta dos dados de temperatura e tempo, o operador define a temperatura inicial, que neste caso foi estabelecida em 180°C, e o tempo, sempre iniciado em zero (0) minutos. Os dados de temperatura e tempo definidos pelo operador foram registrados e inseridos conforme ilustrado na Figura 2, permitindo a análise do desempenho do sistema automatizado.

Figura 2: Temperatura da Torra, seguida de base para operação da máquina.



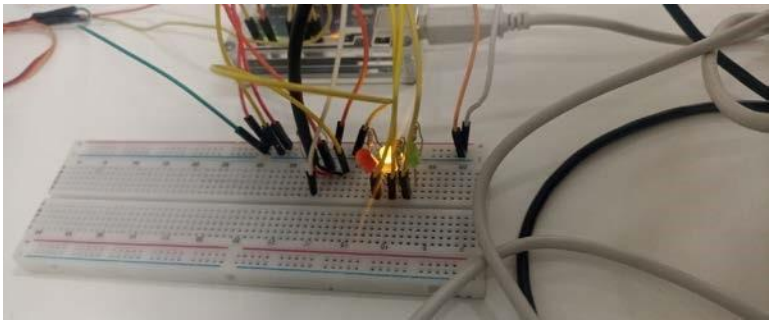
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

O operador da máquina estabelece uma temperatura inicial ao inserir os grãos no torrador. Quando os grãos são colocados, a temperatura diminui devido à umidade presente neles. Após a inserção, os grãos permanecem em uma temperatura estável por cerca de um minuto, entre os tempos de 3 a 4 minutos, conforme ilustrado na Figura 2. Durante esse período, a umidade dos grãos é eliminada pela alta temperatura. Em seguida, com o aumento da temperatura, inicia-se o processo de caramelização, que começa a partir do minuto 6. A partir do minuto 8, o grão entra no estado de tostado e começa a estourar (*crack*), e no minuto 10, o grão é retirado. Após esse tempo, o grão já não seria adequado para consumo, pois é carbonizado.

Ao desenvolver o protótipo do sistema de automação utilizando o *software* SolidWorks e Arduino, os resultados obtidos atenderam às expectativas. A proposta de automação mostrou-se viável, com o sistema operando de maneira eficaz em condições simuladas, comprovando que o Arduino é uma solução acessível e eficaz para ser utilizado como protótipo. Esse resultado confirmou a utilidade do Arduino na programação de controle, oferecendo uma solução que pode ser escalada para operações maiores utilizando o Controlador Lógico Programável (CLP). Ao detalhar o processo de programação, foi estabelecida uma temperatura inicial de 23°C (ambiente), representando uma temperatura baixa, e 31°C, como temperatura alta, garantindo que o sistema funcionasse sem a necessidade de altas temperaturas. A Figura 3 apresenta o protoboard com três LEDs: o LED verde indicava a válvula completamente aberta; o LED

vermelho indicava o fechamento parcial, reduzindo a chama sem interrompê-la totalmente; e o LED amarelo representava o estado neutro.

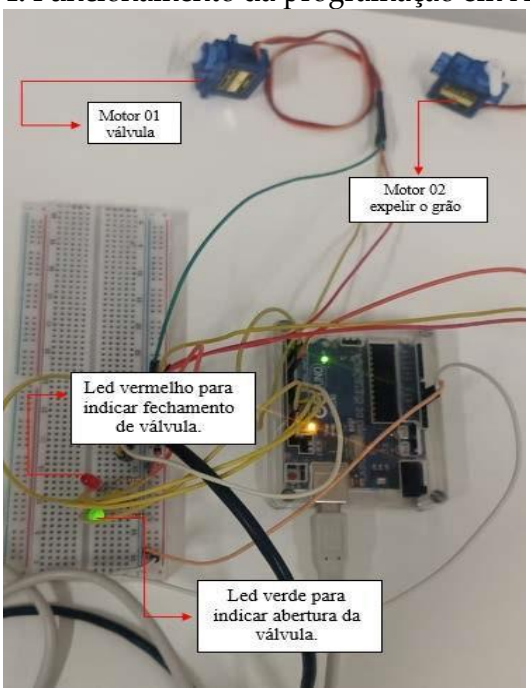
Figura 3: Ponto Neutro (Led Amarelo Ativo)



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Para a execução do restante do processo, dois LEDs adicionais – um verde e um vermelho – foram integrados ao sistema. O LED verde foi programado para acender quando a temperatura estivesse baixa de 23°C já programada, sinalizando a abertura da válvula para aumentar a chama. Já o LED vermelho foi designado para indicar o fechamento da válvula ao atingir temperaturas elevadas no caso de 30°C estabelecida pelo programador. Esse controle contribuiu para uma eficiência superior à intervenção humana, proporcionando maior precisão ao processo.

Figura 4: Funcionamento da programação em Arduino



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Na Figura 4 foram representados dois motores: o Motor 1, que simbolizou a válvula, e o Motor 2, que representou o motor basculante. No Motor 1, uma peça

acoplada ao seu eixo simulou a funcionalidade de abertura, fechamento e ponto neutro da válvula. Quando essa peça se deslocava para a direita, indicava a abertura para a passagem de gás; quando se movia para a esquerda, indicava o fechamento; e, quando permanecia no centro, indicava o ponto neutro. Esse movimento foi repetido pelo tempo determinado pelo operador.

Ao término do processo de torrefação, o Motor 2, que representou o motor basculante conforme mostra a Figura 5, foi acionado para inclinar a carcaça do torrador, permitindo a expulsão dos grãos da máquina. Após o basculamento, a válvula de controle, representada pelo Motor 1, foi ativada para interromper a passagem de gás, permitindo que a máquina resfriasse antes de ser utilizada novamente pelo operador.

Figura 5: Motor (2) em Basculamento

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

A programação desenvolvida para o Arduino também se mostrou flexível o suficiente para servir de base para futuras adaptações em sistemas CLP, pois o Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto, voltada principalmente para projetos, experimentação e ensino, o Arduino utiliza uma linguagem de programação simplificada, mas limitada para ambientes industriais. Já o CLP, é um dispositivo desenvolvido especificamente para automação industrial e opera com alta confiabilidade, como em altas temperaturas, umidade e interferências eletromagnéticas. O CLP possui módulos de entrada e saída robustos e é expansível para atender diferentes demandas é possível adaptar a lógica e os algoritmos desenvolvidos no Arduino para a programação de um CLP.

Desenhos técnicos detalhados foram elaborados, auxiliando na compreensão do modelo da máquina proposta, conforme mostrado na Figura 6. Esses desenhos apresentam as dimensões explicitadas na Tabela 4 e estão em escala reduzida, o que proporciona uma visualização clara do protótipo a ser realizado. Com base nesses desenhos, foi realizada a separação e o corte das peças.

Tabela 4: Medidas do Torrador de Escala Reduzida em ½

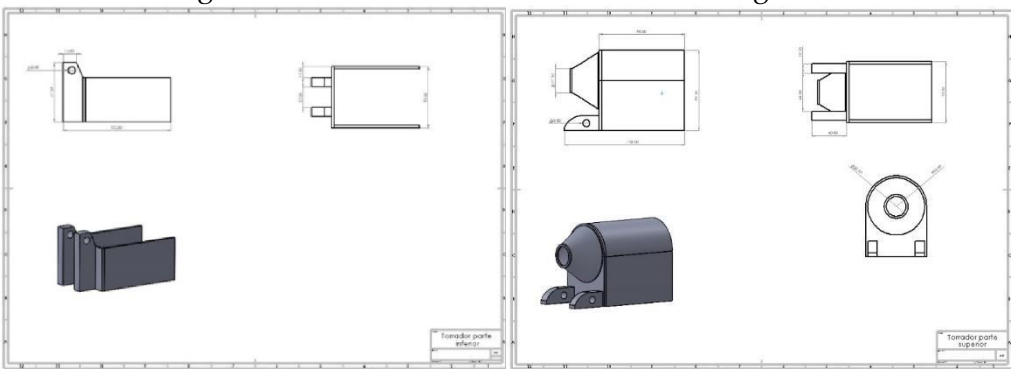
Peças	Quantidades	Dimensões em [mm]	Espessura
Tampa Superior	1	R 35 x 35	3

Frontal	1	92,50 x 70	3
Dentes Frontais e inferiores	2	67,50 x 22,50	6
Dentes Frontais e superiores	2	17, 50 x 40	6
Chapas laterais superiores	2	95 x 57,50	3
Bocal Frontal	1	D 65,25	3
Chapa Frontal inferior	1	70 x 50	3
Chapa Laterais inferior	2	97,50 x 50	3
Boca	1	D 27,5	-
Furos dos dentes	4	8	-

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Figura 6: Base (A) e carcaça (B) do torrador

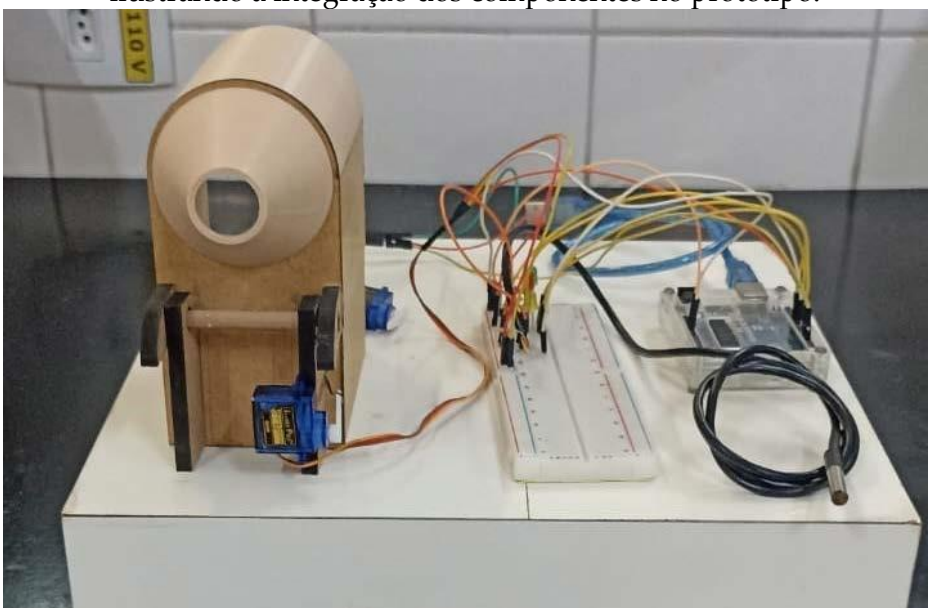
Figura A Figura B



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Os resultados do protótipo, representado na Figura 6, mostraram que o sistema de controle baseado em Arduino manteve a eficiência e a precisão do controle automático. Verificou-se que o uso do Arduino facilita a aceitação da proposta de automação, eliminando a necessidade de intervenção humana no processo. Isso permite um maior controle sobre variáveis críticas, como temperatura e tempo, o que reduz a taxa de erro e eleva a qualidade do produto final.

Figura 7: Torrador montado em MDF com sistema de controle baseado em Arduino, ilustrando a integração dos componentes no protótipo.



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Embora o CLP seja a opção ideal para operações em grande escala, devido à sua robustez e capacidade de integração em sistemas complexos, o uso do Arduino como plataforma inicial de prototipagem demonstrou ser um método eficiente para validar conceitos e explorar a automação em escala reduzida. A metodologia de desenvolvimento do protótipo mostrou-se viável para aplicação em máquinas maiores, mantendo o princípio de controle lógico e programado, o que permite a evolução do sistema em etapas.

5 CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido por meio de protótipo apresentou sugestões de controle com precisão de temperatura e tempo, garantindo uniformidade na torra graças à automação. Essa abordagem tem potencial para ser escalada para processos maiores, aumentando a eficiência e a consistência operacional. A automação também reduz a necessidade de intervenção manual, evitando erros e otimizando o desempenho. O protótipo validou tanto o conceito quanto sua aplicação prática, comprovando a robustez técnica do sistema. Com ajustes específicos, o modelo pode ser adaptado para aplicações industriais, garantindo alta qualidade e confiabilidade.

A integração do sistema de controle baseado em Arduino possibilitou ajustes precisos e, mesmo como uma proposta inicial, atendeu ao objetivo de reduzir a interferência humana, além de configurar parâmetros essenciais como temperatura e tempo. Estruturado para operar de forma autônoma, o sistema mantém as configurações na programação, enquanto o Arduino proporcionou monitoramento contínuo das variáveis do processo, garantindo maior estabilidade e uniformidade.

Em conclusão, o estudo evidencia o potencial do Arduino como solução para automação de processos industriais em pequena e média escala. A implementação do

sistema contribuiu para a redução da necessidade de intervenções manuais, melhoria no controle operacional e nos resultados. Futuras pesquisas podem focar na migração para plataformas mais avançadas, como CLP, e na adaptação do sistema para diferentes escalas de produção, ampliando a inovação e sustentabilidade no setor industrial e cafeeiro.

REFERÊNCIAS

BANZI, M.; SHILOH, M. **Primeiros passos com o Arduino**. 2. ed. [*S. l.*]: Novatec, 2015. 240 p.

DELFIM, A. F. R.; HUEBNER, R.; MAIA, A. A. T.; LIMA II, E. J.; CARVALHO, G. M. de A. Projeto e validação de um sistema de automação para controle de temperatura em máquinas de secagem de café. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 18502–18517, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n2-473. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/25127.

FREITAS, J. de S. **Otimização do controle automático de um torrador de café**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação lato sensu em Eficiência Energética) – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória, 2023.

FUKAMI, Y. Análise dos fatores obstrutivos para a digitalização e automação das técnicas artesanais através da análise narrativa da torrefação e extração do café. 2024. *In:* 83ª Conferência Anual da Sociedade Japonesa de Design. Departamento de Gestão Internacional de Design e Digital. **Anais** [...]. Universidade de Ciência de Tóquio, 2024.

ICAFE. **Guia de análise sensorial do café**: identificação de sabores e aromas. 2. ed. San José: Instituto do Café da Costa Rica, 2020. Disponível em: https://www.icafe.go.cr.

LOPES, A. R.; ROMANO, C. R. T.; ALVES, F. S.; ALVAREZ, V. M. P.; MENDONÇA, A. T. B. B. de; SANTOS, D. A. Inovações Tecnológicas para Torrefação de Café: descobertas realizadas por meio de análise patentária. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 14, n. 2, p. 589-603, jun. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.9771/cp.v14i2.37223

LORING. **Roast Architect Data Sheet**. Loring Smart Roast Inc, Versão 0.2., 2018. Disponível em: https://loring.com/.

MELO, W. A importância da informação sobre o grau de torra do café e sua influência nas características organolépticas da bebida. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, São Carlos/SP, p. 1-4, set. 2004.

MONTEIRO, M. A. M.; MINIM, V. P. R.; SILVA, A. F. da; CHAVES, J. B. P.. Influência da torra sobre a aceitação da bebida café. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 2, p. 145-150, mar./abr. 2010.

SANTO, V. do E. **Controlador de temperatura para máquina de café expresso com arduino**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, 2015. Disponível em: https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/235/7576

SILVA, L.; PEREIRA, J. Aplicações práticas de CLPs em sistemas de controle industrial. **Revista Brasileira de Automação Industrial**, v. 1, pág. 45-56, 2019.

ANEXO 1: Programação em Arduino

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Servo.h>
// Define a porta onde o sensor DS18B20 está conectado
#define ONE_WIRE_BUS 8
// Define as portas dos LEDs
#define LED_SUBINDO 10
#define LED_ESTAVEL 11
#define LED_DESCENDO 12
// Define as portas onde os motores de passo SG90 estão conectados
#define MOTOR_PIN_1 3
#define MOTOR_PIN_2 5
// Configura o barramento OneWire para se comunicar com o DS18B20
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
// Passa a referência do OneWire para a biblioteca DallasTemperature
DallasTemperature sensors(&oneWire);
// Instancia os objetos Servo
Servo motor1;
Servo motor2;
// Variável para armazenar a temperatura anterior float tempAnterior = 0.0; // Variável
para contar o tempo unsigned long tempoInicial = 0; void setup() {
  // Inicia a comunicação serial para monitoramento   Serial.begin(9600);
   // Inicia o sensor DS18B20   sensors.begin();
   // Verifica se algum sensor foi encontrado   if (sensors.getDeviceCount() == 0) {
    Serial.println("Erro: Nenhum sensor DS18B20 encontrado!");     while(true);  // Trava
o código, pois o sensor não foi detectado
  } else {
    Serial.println("Sensor DS18B20 detectado.");
  }
  // Configura as portas dos LEDs como saída   pinMode(LED_SUBINDO, OUTPUT);
pinMode(LED_ESTAVEL, OUTPUT);
  pinMode(LED_DESCENDO, OUTPUT);
  // Inicializa todos os LEDs como desligados   digitalWrite(LED_SUBINDO, LOW);
digitalWrite(LED_ESTAVEL, LOW);
  digitalWrite(LED_DESCENDO, LOW);
   // Anexa os motores às portas definidas   motor1.attach(MOTOR_PIN_1);
motor2.attach(MOTOR_PIN_2);
  // Coloca os motores em posição neutra (parado)   motor1.write(90);
motor2.write(90);
} void loop() {
  // Solicita a temperatura do sensor   sensors.requestTemperatures();    // Lê a
temperatura do sensor
```

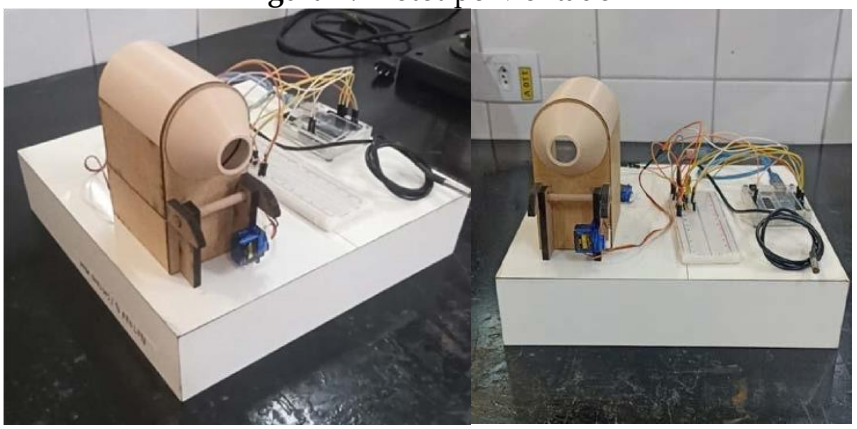
```
  float tempAtual = sensors.getTempCByIndex(0);
  // Verifica se a leitura foi bem-sucedida
  if(tempAtual != DEVICE_DISCONNECTED_C) {
    Serial.print("Temperatura: ");
    Serial.print(tempAtual);
    Serial.println(" °C");
    // Verifica se a temperatura está subindo, descendo ou estável     if (tempAtual >
tempAnterior) {      // Temperatura subindo      digitalWrite(LED_SUBINDO, HIGH);
digitalWrite(LED_ESTAVEL, LOW);      digitalWrite(LED_DESCENDO, LOW);
      giraMotorLentamente(motor1, 90, 180);  // Gira o motor 1 lentamente para a direita
    } else if (tempAtual < tempAnterior) {      // Temperatura descendo
digitalWrite(LED_SUBINDO, LOW);      digitalWrite(LED_ESTAVEL, LOW);
digitalWrite(LED_DESCENDO, HIGH);
      giraMotorLentamente(motor1, 90, 0);  // Gira o motor 1 lentamente para a esquerda
} else {
      // Temperatura estável      digitalWrite(LED_SUBINDO, LOW);
digitalWrite(LED_ESTAVEL, HIGH);      digitalWrite(LED_DESCENDO, LOW);
      motor1.write(90);  // Deixa o motor 1 parado
    }
    // Atualiza a temperatura anterior     tempAnterior = tempAtual;
  } else {
    Serial.println("Erro: Falha na leitura da temperatura!");
  }
  // Verifica se 10 segundos se passaram para acionar o motor 2   if (millis() -
tempoInicial >= 10000) {
    giraMotor360Lento(motor2);  // Gira o motor 2 em um movimento maior e mais lento
tempoInicial = millis();  // Reseta o tempo para a próxima contagem de 10 segundos
  }
  // Aguarda 1 segundo antes de fazer a próxima leitura   delay(1000);
}
// Função para girar o motor lentamente
void giraMotorLentamente(Servo &motor, int posInicial, int posFinal) {   int step =
(posFinal > posInicial) ? 1 : -1;  // Determina a direção do movimento

  for (int pos = posInicial; pos != posFinal; pos += step) {     motor.write(pos);
    delay(15);  // Ajuste este valor para controlar a velocidade do motor (quanto maior,
mais lento)
  }
}
// Função para fazer o motor 2 girar em um movimento maior e mais lento
void giraMotor360Lento(Servo &motor) {
  // Para simular um giro maior, vamos mover o motor de 0 a 180 graus lentamente,
várias vezes;      for (int pos = 180; pos >= 0; pos -= 2) {      motor.write(pos);
      delay(30);  // Ajuste a velocidade do giro
    }
```

```
 delay(1000);
 for (int pos = 0; pos <= 180; pos += 2) {       motor.write(pos);
   delay(30);  // Ajuste a velocidade do giro
 }
// motor.write(90);  // Retorna o motor para a posição neutra }
```

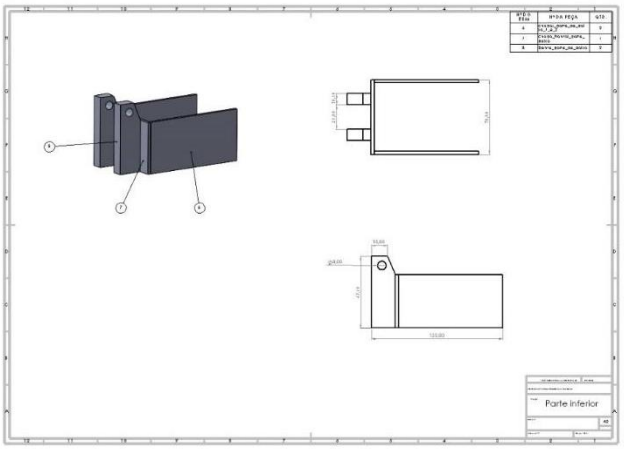
APÊNDICE

Figura 1: Protótipo Montado



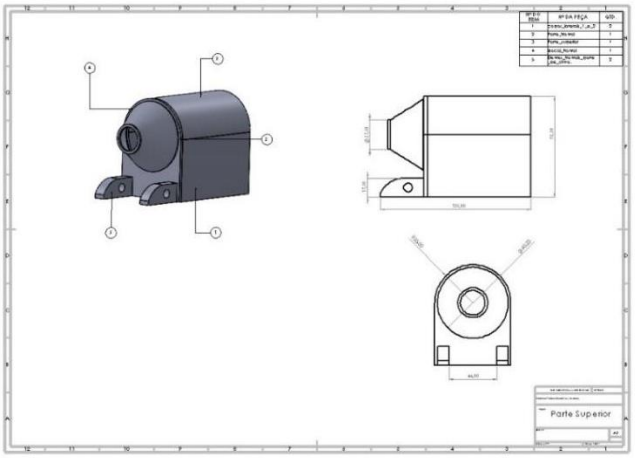
Fonte: arquivo pessoal, 2024.

Figura 2: Desenho Técnico Base do torrador



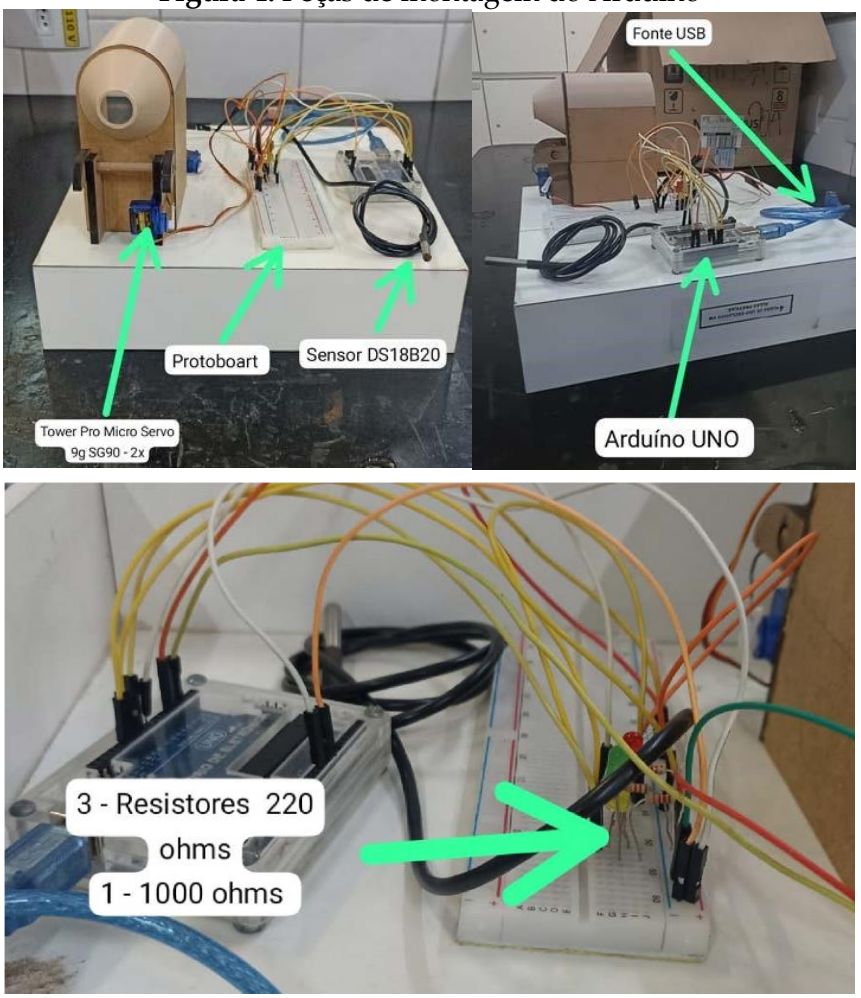
Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

Figura 3: Desenho Técnico da Carcaça do Torrador



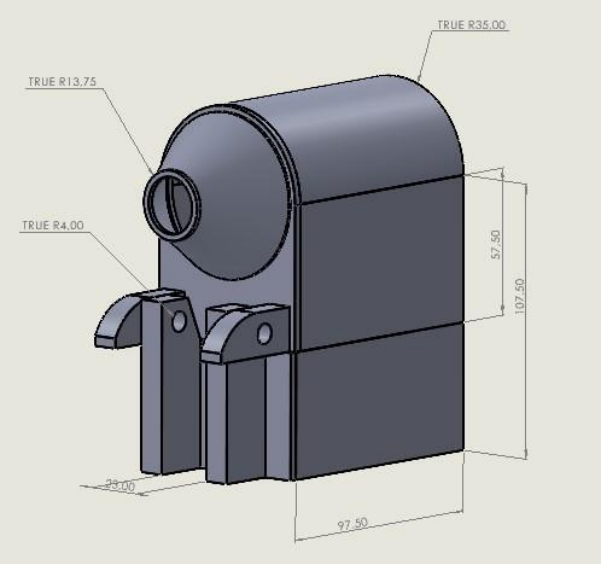
Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

Figura 4: Peças de montagem do Arduino



Fonte: arquivo pessoal, 2024.

Figura 5: Torrador feito no Solid Works



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

Figura 6: Torrador em escala ½ já montado em MDF

Fonte: arquivo pessoal, 2024.

Revista Perquirere, vol. 22, n. 2: 248-255, 2025
© Centro Universitário de Patos de Minas
https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere

Investigação do DNA de *brucella abortus* em sêmen de touros de centrais de inseminação artificial

Detection of Brucella abortus DNA in bull semen from artificial insemination centers

TIAGO HENRIQUE GONÇALVES
Discente de Medicina Veterinária (UNIPAM)
thg030321@unipam.edu.br

MARIANA ASSUNÇÃO DE SOUZA
Professora orientadora (UNIPAM)
marianaa@unipam.edu.br

LUIZ FLAVIO NEPOMUCENO DO NASCIMENTO
Professor coorientador (UNIPAM)
luiznepomuceno@unipam.edu.br

Resumo: A brucelose bovina é uma zoonose de grande impacto na pecuária, podendo comprometer a reprodução e a qualidade do sêmen em centrais de inseminação artificial. Objetivou-se com este estudo investigar a presença do DNA de *Brucella* sp. em sêmen de touros pela técnica de qPCR e identificar anticorpos anti-*Brucella abortus* no plasma seminal por meio da técnica de sêmen plasma aglutinação (SPA) com antígeno acidificado tamponado (AAT). Todas as amostras foram negativas na qPCR, enquanto uma apresentou reatividade no teste de SPA. Esses achados reforçam a importância da associação de diferentes métodos diagnósticos para uma detecção mais precisa da brucelose. Concluiu-se que a adoção de protocolos abrangentes de biossegurança e vigilância sanitária é essencial para a prevenção da brucelose em rebanhos de reprodução assistida.
Palavras-chave: brucelose; bovinos; sêmen; plasma; aglutinação.

Abstract: Bovine brucellosis is a zoonosis with a significant impact on livestock production, potentially compromising reproduction and semen quality in artificial insemination centers. This study aimed to investigate the presence of *Brucella* spp. DNA in bull semen using the qPCR technique and to identify anti-*Brucella abortus* antibodies in seminal plasma by means of the Seminal Plasma Agglutination (SPA) test with Buffered Acidified Antigen (AAT). All samples tested negative by qPCR, while one sample showed reactivity in the SPA test. These findings reinforce the importance of combining different diagnostic methods for more accurate detection of brucellosis. It was concluded that adopting comprehensive biosafety and sanitary surveillance protocols is essential for preventing brucellosis in herds used for assisted reproduction.
Keywords: brucellosis; cattle; semen; plasma; agglutination.

---

1 INTRODUÇÃO

A brucelose bovina é uma zoonose causada pela bactéria *Brucella abortus*, que infecta primariamente bovinos e bubalinos, assim como o humano, sendo que os maiores prejuízos ocorrem na bovinocultura do país, em função da extensão dos rebanhos brasileiros (Brasil, 2006). Por apresentar graves problemas na saúde pública, sobretudo pelo caráter ocupacional, os bovinos infectados são fontes de infecção para pessoas e outros animais (Freitas *et al*., 2001; Megid *et al*., 2016). Por ser uma zoonose de distribuição universal, acarreta problemas sanitários importantes e prejuízos econômicos, com manifestações nos animais, como abortos, nascimentos prematuros, esterilidade e diminuição na produção de leite e carne (Brasil, 2006).

O diagnóstico da brucelose baseia-se em exames laboratoriais, com a utilização de métodos indiretos através da detecção de anticorpos ou por métodos diretos, pela identificação do agente. No Brasil, de acordo com o Plano Nacional de Controle e Erradicação da Brucelose e Tuberculose Animal (PNCEBT), os testes de triagem são o Antígeno Acidificado Tamponado (AAT) e Anel em Leite (TAL) e os testes confirmatórios 2- Mercaptoetanol (2-ME) juntamente com soro aglutinação em tubos (SAT), Fixação de Complemento (FC) e Polarização Fluorescente (PF) (Brasil, 2006). Em busca de exames mais práticos, rápidos e específicos, a Reação em Cadeia pela Polimerase (PCR) vem sendo amplamente empregada em estudos moleculares, em razão da facilidade com que é possível ampliar, *in vitro*, regiões específicas do genoma de qualquer organismo (Herrán-Ramírez *et al*., 2022).

A Instrução Normativa SDA nº 8, de 10 de março de 2006, estabelece que somente poderá ser distribuído no Brasil o sêmen bovino e bubalino coletado em Centros de Coleta e Processamento de Sêmen (CCPS), registrados no Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), que cumpram os requisitos sanitários mínimos para a produção e a comercialização de sêmen bovino e bubalino no país. Essa resolução estabelece exigências para o touro doador quanto à pré-quarentena e à quarentena para ingresso no CCPS, controle do rebanho residente e adição de antibióticos ao processamento de sêmen (MAPA, 2006).

Em busca de maior qualidade, técnicas como inseminação artificial (IA), inseminação artificial em tempo fixo (IATF), transferência de embrião (TE) e fertilização *in vitro* (FIV) são utilizadas com maior frequência para propiciar aumento da produtividade, assim mostrando a importância do controle sanitário no sêmen (Barcelos *et al*., 2009). Segundo o Relatório Estatístico de Produção, Importação e Comercialização de Sêmen da Associação Brasileira de Inseminação Artificial (ASBIA), em 2012 o Brasil comercializou aproximadamente 12,3 milhões de doses de sêmen. Desse total, cerca de 53,29% são de origem nacional (ASBIA, 2012).

A contaminação bacteriana do sêmen congelado pode afetar sobremaneira a fertilidade, pois, quando microrganismos patogênicos são veiculados pela inseminação artificial, não necessitam atravessar a mucosa vaginal ou cervical, que agem como barreiras para bactérias, visto que são introduzidos diretamente no útero. Assim, o diagnóstico desse patógeno no sêmen bovino é uma prática desejável, pois os exames sorológicos de rotina podem apresentar um resultado falso-negativo e os machos podem

ficar assintomáticos e levar à contaminação de todo um rebanho. Diante disso, objetivou-se com este estudo detectar a presença do DNA de *Brucella* spp. no sêmen de touros de centrais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 AMOSTRAS

O estudo foi realizado com amostras de sêmen de touros (*Bos taurus* e *Bos indicus*) provenientes de centrais de coleta de sêmen. Foram selecionadas três centrais de comercialização de sêmen bovino da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba em Minas Gerais. De cada estabelecimento foram adquiridas comercialmente cinco amostras de sêmen, independentemente de raça, aptidão reprodutiva e idade do animal. Cada amostra foi identificada de acordo com o reprodutor e dados como identificação da central produtora e número de registro dos touros foram mantidos em sigilo.

2.2 DELINEAMENTO AMOSTRAL

Para a determinação do tamanho da amostra (n), foi admitida uma prevalência esperada de 1% (Gonçalves *et al.*, 2009), nível de confiança de 95% e variação de 5%. A fórmula utilizada, segundo Thrusfield (2004), foi:

$$n = \frac{1{,}96^2 \, P_{esp} \, (1 - P_{esp})}{d^2}$$

Nessa fórmula,
n = tamanho da amostra baseado em uma população infinita,
P_{esp} = prevalência esperada,
d = precisão absoluta desejada.

Substituindo os valores na fórmula:

$$n = \frac{1{,}96^2 \, 0{,}01 \, (1 - 0{,}01)}{0{,}05^2}$$

n = 15 amostras

2.3 TESTES DE DIAGNÓSTICO

Em cada amostra de sêmen, foi realizado o exame para detecção de anticorpos anti-*Brucella abortus*, por meio do teste do Antígeno Acidificado Tamponado (AAT) e exame para detecção do DNA de *Brucella* spp, o qual foi encaminhado para laboratório particular da área de Medicina Veterinária credenciado pelo MAPA.

2.3.1 Sêmen Plasma Aglutinação (SPA)

Após descongelamento, o sêmen total foi centrifugado e retirado o plasma, em seguida foi submetido à prova de AAT (Paulin, 2003). O exame AAT foi realizado e interpretado de acordo com metodologia descrita no PNCEBT (Brasil, 2006). O exame foi realizado no Laboratório de Doenças Infecciosas do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM)

2.3.2 Diagnóstico Molecular de *Brucella* spp.

As amostras de sêmen foram enviadas para laboratório de referência, onde foi investigada a presença do DNA de *Brucella* spp. por meio de diagnóstico molecular pela técnica de Reação em Cadeia pela Polimerase quantitativa (qPCR). Para a extração do DNA bacteriano, foi utilizado o kit Patógeno IndiMag® 48 (*Indical Bioscience Gmbh*), método automatizado de extração de ácidos nucleicos à base de esferas magnéticas. A amplificação do DNA foi realizada com a utilização dos reagentes Go Taq® Probe qPCR Master Mix (*Promega*) para qPCR. O protocolo de execução das técnicas foi seguido mediante as recomendações do fabricante.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para o cálculo da frequência, foi estabelecida a relação do número de amostras reagentes aos testes de diagnóstico em relação ao número de animais amostrados, utilizando-se de análise estatística descritiva, por meio de frequência absoluta e relativa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise molecular por qPCR, não foi detectada a presença do DNA de *Brucella* sp. no sêmen dos touros das centrais de inseminação artificial. Esse achado é consistente com os resultados de outros estudos que não encontraram *Brucella* no sêmen de touros (Fuverk, 2010), o que sugere que o grupo de touros estudados não tinha infecção ativa ou uma carga bacteriana suficientemente alta para ser detectada por essa técnica e que a transmissão da brucelose por essa via pode não ser tão prevalente ou significativa quanto outras formas de transmissão, como a via oral, conforme discutido por SOUZA *et al*., (2016).

O uso da qPCR para a detecção do DNA de *B. abortus* é altamente sensível, o que confere robustez a esses resultados negativos, reforçando a ideia de que a infecção no sêmen de touros não é comum nas condições estudadas. Rocha, Brugeff e Bier (2019) avaliaram a ocorrência de animais sororreagentes à brucelose bovina em fazendas do Estado de Mato Grosso do Sul, utilizando o AAT. Foram testados 724 bovinos da raça Nelore, sendo 274 machos e 450 fêmeas. Os resultados mostraram baixa soroprevalência da doença nos bovinos testados, com prevalência de 1,10% nos machos e 2,88% nas fêmeas. Embora o estudo tenha focado na soroprevalência e não especificamente na

presença da bactéria no sêmen, os baixos índices de soropositividade nos machos sugerem uma menor probabilidade de detecção da bactéria no sêmen desses animais.

Estudos como os de Xavier *et al*., (2010) e os de Nardi Junior *et al.* (2017) demonstraram a eficácia da qPCR na identificação do DNA de *Brucella* em sêmen de touros, destacando a sensibilidade dessa técnica para a detecção precoce de infecções. Entretanto, o teste SPA oferece outra perspectiva diagnóstica ao detectar anticorpos anti-*Brucella* no plasma seminal, o que pode indicar uma infecção passada ou uma resposta imunológica à exposição ao patógeno, mesmo na ausência de material genético detectável por PCR.

A ausência de detecção do DNA de *Brucella* no sêmen dos touros em nosso estudo, aliada à reatividade de uma amostra no teste SPA com AAT, sugere uma exposição prévia ao patógeno sem a presença atual da bactéria viável no sêmen. Esse achado está de acordo com os estudos de Lourencetti *et al.* (2018), que, ao avaliarem 100 amostras de sêmen bovino, identificaram 68% de positividade no PCR, enquanto 11% das amostras foram reagentes no SPA, mas todas negativas no AAT e com o estudo de Junqueira Júnior *et al.* (2015), que, ao investigarem 177 touros, não detectaram anticorpos anti-*Brucella* no soro sanguíneo, mas identificaram 5,06% de amostras reagentes no SPA, enquanto todos os animais foram negativos nos testes sorológicos tradicionais, sugerindo que touros soronegativos podem eliminar a bactéria no sêmen.

Nossos resultados reforçam a importância de utilizar múltiplas técnicas diagnósticas para uma avaliação mais precisa da infecção em reprodutores bovinos. A utilização de métodos distintos é fundamental para aumentar a sensibilidade na detecção de *Brucella* sp e minimizar o risco de resultados falso-negativos ou falso-positivos (Batista, 2016). A qPCR, por ser uma técnica molecular altamente sensível e específica, permite a detecção do DNA do patógeno em amostras biológicas, mesmo quando o agente está presente em quantidades baixas ou em infecções subclínicas (OIE, 2018).

Além disso, o emprego de diferentes abordagens diagnósticas é essencial para o monitoramento eficaz de doenças como a brucelose, especialmente em centrais de inseminação artificial, onde a segurança e a qualidade do sêmen são determinantes. A detecção do DNA de *Brucella* em sêmen de touros por PCR tem sido indicada como uma estratégia importante para o controle de infecções em programas reprodutivos, como evidenciado no estudo de Xavier *et al*., (2010), que ressaltaram a importância da qPCR na identificação de infecções em estágios iniciais, muitas vezes antes que sinais clínicos evidentes apareçam. Nardi Júnior *et al*. (2017) relatam que, sendo a brucelose uma zoonose de grande importância veterinária e humana, é importante que as técnicas de diagnóstico sejam precisas para evitar sua disseminação, especialmente em ambientes de reprodução assistida. Ao combinar a detecção direta do patógeno, como a qPCR, com a avaliação da resposta imunológica por meio de testes sorológicos, como o SPA, é possível identificar de maneira mais eficaz a presença do patógeno ou da resposta imune, melhorando as estratégias de prevenção e controle da doença nas populações de touros e reduzindo os riscos à saúde pública.

As amostras utilizadas neste estudo foram provenientes de centrais de inseminação artificial que seguem rigorosos padrões sanitários, sendo reconhecidas por sua credibilidade e referência na região. Essas centrais desempenham um papel

fundamental na disseminação de genética de alta qualidade, contribuindo para o melhoramento genético e a produtividade dos rebanhos. A tecnologia minimiza os riscos associados à monta natural, garantindo maior segurança sanitária ao impedir o contato direto entre machos e fêmeas, fator essencial no controle e prevenção de enfermidades (SENAR/MT, 2023). No entanto, a contaminação do sêmen com agentes patogênicos pode resultar na ampla disseminação de diversas doenças, tornando imprescindível a adoção de medidas rigorosas de monitoramento e biosseguridade (EMBRAPA, 2021).

Diante dos desafios diagnósticos da brucelose em touros, especialmente pela predileção de *Brucella abortus* pelas glândulas acessórias e testículos, a ausência ou presença de baixos títulos séricos de imunoglobulinas podem comprometer a eficácia dos métodos sorológicos convencionais. Esse fato reforça a necessidade da utilização de exames complementares no plasma seminal, como a PCR e os testes de aglutinação com AAT e SPA, permitindo uma abordagem mais precisa na detecção da infecção (Oliveira *et al*., 2013; Nardi Junior *et al*., 2011). Dessa forma, a adoção de protocolos laboratoriais que integrem a análise do sêmen pode contribuir significativamente para o controle da brucelose bovina, particularmente em centrais de inseminação artificial, onde a biossegurança é essencial para evitar a disseminação da doença.

4 CONCLUSÃO

Este estudo reforça a necessidade de protocolos diagnósticos abrangentes e contínuos em programas de reprodução assistida, visando à prevenção e ao controle da brucelose bovina. Novas investigações, associando diferentes técnicas e ampliando o escopo das análises, são essenciais para aprimorar as estratégias de vigilância sanitária e reduzir o impacto da doença na pecuária.

REFERÊNCIAS

ASBIA – Associação Brasileira de Inseminação Artificial. **Relatório de comercialização de sêmen bovino**. Brasil, 2012.

BARCELOS, V. B.; MAZUREK, M.; BECKER, R. C.; MADEIRA, E. M.; SCHWEGLER, E.; BIANCHI, I.; CORRÊA, M. N. **Agentes infecciosos no sêmen de touro**. Grupo Cultivar, 2009.

BATISTA, M. B. **Investigação soroepidemiológica de Brucella spp. em suínos abatidos no estado da Bahia**. Dissertação (Mestrado em Defesa Agropecuária) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Brucelose e Tuberculose Bovina**. Programa Nacional de Controle e Erradicação da Brucelose e Tuberculose Animal (PNCEBT). 2006. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sanidade-animal-e-vegetal/saude-animal/programas-de-saude-animal/pncebt/brucelose-e-tuberculose.

EMBRAPA. Medidas de biosseguridade no uso da inseminação artificial em bovinos. **Circular Técnica**, Brasília, v. 12, p. 1-8, 2021.

FREITAS, J. A.; GALINDO, G. A. R.; SANTOS, E. J. C.; SARRAF, K. A.; OLIVEIRA, J. P. Risco de brucelose zoonótica associado a suínos de abate clandestino. **Revista de Saúde Pública**, v. 35, n. 1, 2001.

FUVERKI, R. B. N. **Padronização de um protocolo para detecção molecular de Leptospira spp. e Brucella spp. em sêmen bovino comercial**. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2010.

GONÇALVES, V. S. P. et al. Situação epidemiológica da brucelose bovina no Estado de Minas Gerais. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 61, supl. 1, p. 35-45, nov. 2009.

HERRÁN-RAMÍREZ, O. L.; SANTOS, H. A.; PAULINO, P. G.; VAN DER MEER, C. S.; RODRÍGUEZ-BAUTISTA, J. L.; JARAMILLO-DELGADO, I. L.; GONZÁLEZ-OBANDO, J.; RAMIREZ-GARCIA, R.; ANGELO, I. C. Estudo transversal de Brucella spp. utilizando PCR em tempo real a partir de sangue total bovino na Colômbia. **Veterinary Research Communications**, v. 46, p. 189-201, 2022.

JUNQUEIRA JÚNIOR, D. G.; LIMA, A. M. C.; MORAES, G. P. Diagnosis of bovine brucellosis in bulls by sero agglutination and seminal plasma agglutination tests. **Semina: Ciências Agrárias**. Londrina, v. 36, n. 5, p. 3203-3210, set./out. 2015.

LOURENCETTI, M. P. S.; SOUZA, M. A.; GANDA, M. R.; SANTOS, J. P.; FERREIRA JÚNIOR, A.; LIMA, A. M. C.; MIYASHIRO, S. High level of B19 strain detection in Brazilian cattle semen. **Tropical Animal Health and Production**, v. 50, p. 433–439, 2018.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa SDA n. 8, de 10 de março de 2006**. Dispõe sobre normas sanitárias para comercialização de sêmen bovino. Brasília: MAPA, 2006.

MEGID, J.; RIBEIRO, M. G.; PAES, A. C. **Doenças infecciosas em animais de produção e de companhia**. Rio de Janeiro: Roca, 2016

NARDI JÚNIOR, G.; SILVA, D. A. O.; HADDAD, J. P. A. *et al*. Performance of microbiological, serological, molecular, and modified seminal plasma methods in the diagnosis of Brucella abortus in semen and serum of bovine bulls. **Biologicals**, v. 48, p. 6-9, 2017.

OIE. **Manual de testes diagnósticos e vacinas para animais terrestres**. Paris: World Organisation for Animal Health, 2018.

OLIVEIRA, D. S.; SANTOS, M. R.; SOUZA, M. A.; MOREIRA, R. Q.; LIMA-RIBEIRO, A. M. Avaliação de protocolo de extração de DNA de Brucella spp. em sêmen bovino. **Ars Veterinaria**, v. 29, n. 2, p. 91-97, 2013.

PAULIN, L. M. **Brucelose**. Arquivos do Instituto Biológico, São Paulo, v. 70, n. 2, p. 239-249, abr./jun. 2003.

ROCHA, V. P.; BRUGEFF, E. C. L.; BIER, D. Inquérito sorológico de brucelose em machos e fêmeas bovinas em fazendas do Estado de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência Veterinária**, v. 26, n. 3, p. 143-148, 2019.

SENAR/MT. **Manual de boas práticas na inseminação artificial de bovinos**. Cuiabá: SENAR/MT, 2023.

SOUZA, F. A.; LAGE, A. P.; SANTOS, R. L. *et al*. Soroprevalência e fatores de risco para brucelose bovina no Estado de Minas Gerais, Brasil**. Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 5, supl. 2, p. 3365-3378, 2016.

THRUSFIELD, M. **Epidemiology**. 3. ed. Oxford: Blackwell Science, 2004.

XAVIER, M. N.; PAIXÃO, T. A.; COSTA, É. A. *et al*. Development and evaluation of a real-time PCR assay targeting bcsp31 gene for the detection of Brucella spp. **Veterinary Microbiology**, v. 145, n. 3-4, p. 158-164, 2010.