

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EDIR GILBERTO NISCZAK

CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE BARRA PORTA-FERRAMENTAS PARA
MENSURAÇÃO DAS FORÇAS NA OPERAÇÃO DE PREPARO DO SOLO

CURITIBA

2025

EDIR GILBERTO NISCZAK

CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE BARRA PORTA-FERRAMENTAS PARA
MENSURAÇÃO DAS FORÇAS NA OPERAÇÃO DE PREPARO DO SOLO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Samir Paulo Jasper

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Nischzak, Edir Gilberto

Construção e validação de barra porta-ferramentas para mensuração das forças na operação de preparo do solo / Edir Gilberto Nischzak. – Curitiba, 2025.

1 recurso online: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Samir Paulo Jasper

1. Mecânica do solo. 2. Solos - Manejo. 3. Implementos agrícolas. 4. Solos - Testes. I. Jasper, Samir Paulo. II. Universidade Federal do Paraná. Programa Pós-Graduação em Ciência do Solo. III. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **EDIR GILBERTO NISCZAK**, intitulada: **CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE BARRA PORTA-FERRAMENTAS PARA MENSURAÇÃO DAS FORÇAS NA OPERAÇÃO DE PREPARO DO SOLO**, sob orientação do Prof. Dr. SAMIR PAULO JASPER, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 09 de Julho de 2025.

Assinatura Eletrônica

09/07/2025 15:48:38.0

SAMIR PAULO JASPER

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

09/07/2025 15:41:41.0

JORGE WILSON CORTEZ

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS)

Assinatura Eletrônica

09/07/2025 15:44:40.0

MURILO BATTISTUZZI MARTINS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL)

•

Dedico este trabalho, com todo amor e gratidão, aos meus pais, ***Generino João Niszczak e Ursula Maria Niszczak***, que me ensinaram, desde cedo, os valores da honestidade, do esforço e da perseverança. Obrigado por serem meu alicerce, meu exemplo e minha inspiração constante.

Às minhas filhas, ***Eloah Martina O. Niszczak, Eloisa Taynara S. Niszczak e Maria Júlia dos S. Niszczak***, que são a razão maior do meu caminhar. Que este passo na minha trajetória sirva de exemplo de que, com fé, dedicação e coragem, somos capazes de superar desafios e conquistar nossos sonhos. Estendo também meu agradecimento à minha companheira ***Luana Tiago de Oliveira***, pelo apoio, compreensão e parceria durante essa caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida, pela saúde, proteção e por me permitir chegar até aqui, vencendo desafios e conquistando meus objetivos ao longo de todos estes anos de estudo.

Ao Prof. Dr. Samir Paulo Jasper, pela orientação precisa, confiança e apoio constante, que foram fundamentais para a realização deste trabalho e para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas (LATA), em especial ao Gabriel Ganancini Zimmermann, pela parceria, apoio e prontidão em ajudar sempre que necessário. Meu agradecimento também aos colegas Eduardo Affonso Jung e Eduardo Alves Gracietti, pela colaboração e companheirismo durante essa jornada.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR), instituição centenária que tanto me orgulha, pela oportunidade de crescimento acadêmico e pessoal. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), pela excelência, acolhimento e compromisso com a formação de profissionais qualificados. Agradeço, de maneira especial, à Denise de Conti, à Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli e a todo o colegiado do programa, que sempre me atenderam com presteza e profissionalismo, contribuindo significativamente para a realização deste trabalho.

À empresa Horsch do Brasil, pela parceria, apoio técnico e institucional, e, de forma muito especial, ao Rodrigo Duck, ao Stefan Vorwerk e ao Hamurabi Volski, pela disponibilidade, incentivo, confiança e contribuição imprescindível para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, a todos que, de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização desta etapa da minha vida acadêmica e profissional, meu sincero e eterno muito obrigado.

RESUMO

A utilização de práticas conservacionistas na agricultura, com destaque para o sistema de plantio direto, tem se intensificado nos últimos anos com o objetivo de alcançar um equilíbrio entre produtividade, qualidade do solo e sustentabilidade. No entanto, essa prática apresenta desafios significativos, como a compactação em camadas superficiais no solo. Diante desse cenário, pesquisas têm sido desenvolvidas se dedicando ao estudo da relação solo-máquina, com o intuito de aumentar a eficiência operacional e minimizar os impactos negativos sobre o solo durante as operações de preparação e semeadura. Nesse contexto, o estudo das forças atuantes na interação solo-ferramenta tem se mostrado de grande relevância para o desenvolvimento de novos implementos agrícolas que otimizam as operações e minimizam as perturbações do solo. O objetivo do presente trabalho foi o desenvolvimento de uma barra porta-ferramenta capaz de mensurar as forças horizontais (F_x), verticais (F_y), e longitudinais (F_z) em diferentes tipos de ponteiros durante o processo de preparo do solo com o propósito de coletar dados sobre a resistência mecânica do solo. O experimento em faixas, conduzido no delineamento de blocos casualizado, resultaram em três tratamentos, sendo a haste com ponteira de 3 cm com asas, ponteira de 3 cm sem asas e ponteira de 4,7 cm sem asas. Para cada tratamento, foram realizadas sete repetições, totalizando 21 unidades experimentais. Os parâmetros analisados foram profundidade, força longitudinal, força transversal, força vertical, velocidade operacional e potência. Os dados foram inicialmente avaliados quanto à normalidade, pelo teste de Shapiro-Wilk, e à homogeneidade de variâncias, pelo teste de Brown-Forsythe. Quando ambas as premissas foram atendidas, aplicou-se a análise de variância (ANOVA) pelo teste F, utilizando o software R (R Core Team®). Em casos de significância ($p \leq 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. A barra porta-ferramentas apresentou desempenho e confiabilidade satisfatórios, validando a fase de testes. A haste de 3 cm com asas proporcionou a maior mobilização do solo, evidenciada pela elevada força longitudinal e demanda de potência. A haste com ponteira de 3 cm sem asas apresentou desempenho intermediário, sendo a única a gerar força transversal positiva. Já a haste com ponteira de 4,7 cm sem asas mostrou comportamento semelhante à de 3 cm sem asas quanto às forças longitudinais e à demanda de potência, porém com maior força vertical, indicando maior resistência à penetração do solo.

Palavras-chave: interação solo-ferramenta; forças atuantes no preparo do solo; haste de preparo de solo.

ABSTRACT

The adoption of conservation practices in agriculture, particularly the no-tillage system, has increased in recent years in pursuit of a balance between productivity, soil quality, and sustainability. However, this system also poses challenges, such as compaction of the surface soil layers. In this context, research on the soil-machine interaction aims to improve operational efficiency while minimizing negative impacts on the soil during tillage and sowing operations. The study of forces involved in soil-tool interaction is essential for the development of new agricultural implements that optimize soil disturbance and energy use. This study aimed to develop a toolbar capable of measuring longitudinal (F_x), transverse (F_y), and vertical (F_z) forces for different tine configurations during soil preparation, in order to assess soil mechanical resistance. The strip trial was conducted in a randomized block design with three treatments: a tine with a 3 cm tip and lateral wings, a tine with a 3 cm tip without wings, and a tine with a 4.7 cm tip without wings. Each treatment included seven replicates, totaling 21 experimental units. The variables evaluated were working depth, longitudinal force, transverse force, vertical force, operational speed, and power demand. Data were subjected to the Shapiro-Wilk test for normality and the Brown-Forsythe test for variance homogeneity. When assumptions were met, analysis of variance (ANOVA) was applied using the F-test, with comparisons of means performed by the Tukey test ($p \leq 0.05$), in R software (R Core Team®). The toolbar showed satisfactory performance and structural reliability, confirming its effectiveness. The 3 cm tip with wings resulted in the highest soil mobilization, associated with greater longitudinal force and power requirement. The 3 cm tip without wings showed intermediate performance and was the only one to produce a positive transverse force. The 4.7 cm tip without wings had similar longitudinal force and power demand to the 3 cm wingless tip but presented greater vertical force, indicating higher resistance to soil penetration.

Keywords: soil-tool interaction; forces acting on soil preparation; tillage tine.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – BARRA PORTA-FERRAMENTA	15
FIGURA 2 - PERFIL ESTRUTURAL	16
FIGURA 3 – EIXO TRASEIRO (A) E EIXO DIANTEIRO (B)	16
FIGURA 4 – SISTEMA HIDRÁULICO (A) HASTE (B).....	17
FIGURA 5 – CÉLULA DE CARGA	17
FIGURA 6 – RODA DE CONTROLE ALTIMÉTRICO.....	18
FIGURA 7 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	19
FIGURA 8 - CALIBRAÇÃO EM LABORATÓRIO	20
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DOS MÓDULOS DE CALIBRAÇÃO.....	21
FIGURA 10 - CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO EIXO X (A), EIXO Y (B) E EIXO Z (C)	22
FIGURA 11 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	24
FIGURA 12 - COLETA PENETRÔMETRO ANTES DO PREPARO (A) E APÓS O PREPARO (B).....	25
FIGURA 13 - COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLO.....	26
FIGURA 14 - CURVAS DE RP APÓS O PREPARO DA HASTE I (A), HASTE II (B) E HASTE III (C).....	28
FIGURA 15 – BARRA PORTA-FERRAMENTA ACOPLADA AO TRATOR.....	29
FIGURA 16 – HASTES I (A) HASTE II (B) HASTE III (C)	30
FIGURA 17 - PROJEÇÃO COM REFERENCIAL MÉTRICO DAS HASTES I E II (A) E HASTE III (B).....	30
FIGURA 18 - TRATOR AGRÍCOLA	31
FIGURA 19 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO	32
FIGURA 20 - CONJUNTO MECANIZADO NA ÁREA EXPERIMENTAL.....	34
FIGURA 21 - USO DA BARRA PORTA-FERRAMENTA NO SOLO	34
FIGURA 22 – PROFUNDIDADE	37
FIGURA 23 – FORÇA LONGITUDINAL.....	38
FIGURA 24 – FORÇA TRANSVERSAL	39
FIGURA 25 – FORÇA VERTICAL.....	40
FIGURA 26 – VELOCIDADE.....	41
FIGURA 27 – POTÊNCIA	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	27
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1 EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO	15
2.1.1 Desenvolvimento e construção da barra porta-ferramentas.....	15
2.1.1.1 Estrutura	15
2.1.1.2 Haste	16
2.1.1.3 Células de carga.....	17
2.1.1.4 Roda de controle altimétrico	18
2.1.1.5 Sistema de aquisição de dados.....	19
2.1.2 Calibração da barra porta-ferramenta	20
2.2 EXPERIMENTO EM CAMPO.....	23
2.2.1 Localização da área experimental.....	23
2.2.2 Caracterização da área experimental.....	24
2.2.2.1 Textura	24
2.2.2.2 Resistência do solo a penetração	25
2.2.2.3 Densidade do solo e umidade volumétrica.....	26
2.2.2.4 Análises físicas do solo	27
2.2.3 Preparo da área experimental	29
2.2.3.1 Descrição dos equipamentos utilizados	29
2.2.3.2 Avaliação da barra porta-ferramenta em campo	33
2.2.4 Delineamento experimental e análises estatísticas	36
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4 CONCLUSÃO	43
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

A busca por um equilíbrio entre produtividade, a qualidade do solo e sustentabilidade tem se tornado um dos principais objetivos da agricultura contemporânea. Nesse cenário, diversos produtores têm adotado práticas conservacionistas na agricultura como uma alternativa viável para alcançar esse nível (AHMED et al., 2024).

Com base nessa perspectiva, inúmeras propriedades agrícolas ao redor do mundo, com histórico de uso intenso do sistema convencional, têm optado por implementar o sistema de plantio direto como uma estratégia para aumentar a produtividade e promover a qualidade do solo (DE MOURA et al., 2024). Esse sistema é reconhecido por sua maior sustentabilidade em comparação ao método convencional (VUAILLE et al., 2024).

No Brasil, entre os anos de 2006 e 2017, foi registrado um crescimento de 85% no número de propriedades brasileiras que adotaram o plantio direto. Esse aumento resultou em um total de 33 milhões de propriedades utilizando essa técnica, o que representa cerca de 64% da área total destinada às culturas anuais no país (FUENTES-LLANILLO et al., 2021).

Entretanto, a adoção do plantio direto enfrenta desafios significativos, como a compactação do solo, o manejo de plantas daninhas e a estratificação de carbono orgânico e nutrientes no solo. A compactação do solo é principalmente associada à intensidade de uso do sistema, resultado de um tráfego de máquinas inadequado de acordo com as condições do solo, além disso, a ausência de rotação de culturas e a baixa quantidade de cobertura vegetal também contribuem para esse problema (FRENE et al., 2024; ZHANG et al., 2024).

A compactação do solo em sistema de plantio direto ocorre principalmente em camadas superficiais, porém, pode ocorrer também em camadas profundas ao longo do tempo devido ao uso de maquinário maior e mais pesado. Para solucionar esses problemas, são recomendadas as práticas de subsolagem ou escarificação, a fim de romper camadas compactadas mais profundas (BLANCO-CANQUI & WORTMANN, 2020; LENZ et al., 2022; NASCIMENTO et al., 2022).

Segundo Hoisenian et al. (2022a), um dos principais interesses dos pesquisadores no estudo das relações solo-máquina é a compreensão de complexas interações entre a ferramenta de preparação e o ambiente em questão, com o intuito

de aumentar a eficiência operacional e minimizar a resistência do solo durante as operações de preparação e semeadura.

Diversos são os mecanismos rompedores do solo, principalmente no que tange a semeadoras-adubadoras durante a operação de semeadura em plantio direto, em que devem seccionar a camada vegetal e romper o solo afim de realizar a deposição da semente. Os mecanismos podem ser classificados em discos e hastes sulcadoras (AIKINS et al., 2020).

De acordo com Aikins et al. (2021), as hastes apresentam maior poder de penetração na interação solo-ferramenta em comparação aos discos, possuindo também vantagens em solos compactados, além de serem mais simples e exigirem menor investimento em operação e manutenção.

Ao avaliarem o uso de hastes sulcadoras na cultura do milho em plantio direto, Nunes et al. (2014) constataram uma melhoria na qualidade do solo, além da mitigação de problemas de ordem química e física do solo. Corroborando Becker et al. (2022) ao afirmarem que o uso de hastes sulcadoras pode ser indicado para descompactar camadas superficiais do solo, nas profundidades de 0 a 20 cm, no entanto, para camadas mais profundas que estão compactadas, ainda se recomenda o emprego de práticas como gradagem pesada e subsolagem.

A eficiência operacional requerida para a operação de preparo do solo e semeadura são altamente influenciadas por propriedades mecânicas do solo, principalmente quando se trata da interação entre o solo e a ferramenta. Um dos aspectos mais importantes dessa interação envolvem as forças horizontais, verticais e longitudinais aplicadas à ferramenta no momento da operação (AL-NEAMA et al., 2021).

Ao realizar uma análise da correlação entre as forças atuantes e a profundidade de trabalho da haste sulcadora com as propriedades físicas do solo, Lenz et al. (2022) concluíram que existe uma correlação significativa, podendo ser uma alternativa viável para avaliar a compactação do solo durante a operação de semeadura. Dessa forma, tais resultados destacam a importância da avaliação de forças atuantes nos implementos agrícolas para otimizar a eficiência energética, sendo um tema de grande interesse para pesquisadores (ABBASPOUR-GILANDEH et al., 2020).

Com esse enfoque, o estudo da interação solo-ferramenta tem sido objeto de análise, visando impulsionar o desenvolvimento de novos implementos agrícolas que

otimizam as operações e minimizam as perturbações do solo, em busca de práticas mais sustentáveis (BULGAKOV et al., 2019).

A barra porta-ferramenta é uma estrutura móvel que simula um implemento agrícola, facilitando o acoplamento de ferramentas, como hastes e arados, além de mensurar forças durante a operação de preparação do solo (BELLÉ et al., 2014, CVIKLOVIČ et al., 2022).

Em um estudo conduzido por Silva et al. (2012), uma barra porta-ferramenta foi desenvolvida com o intuito de avaliar o desempenho de três discos de corte (liso, estriado e ondulado) em uma semeadora-adubadora. Foram realizados testes em diferentes coberturas vegetais e quatro níveis de cargas verticais aplicadas (750, 1500, 2250 e 3000 N). Os resultados indicaram que conforme a carga vertical aumentava, maior era a área do solo mobilizado.

Durante a avaliação dos componentes de forças de resistência envolvidos na interação entre implementos agrícolas com arado de aiveca, Bulgakov et al. (2019) desenvolveram uma barra porta-ferramenta com esse propósito. Os resultados obtidos permitiram concluir que foi possível alcançar uma redução significativa da força longitudinal exercida sobre a ferramenta, devido ao aperfeiçoamento estrutural do equipamento.

Ao desenvolverem um novo tipo de haste, Hoiseinian et al. (2022a; 2022b) criaram uma barra porta-ferramenta com o intuito de realizar simulações sobre a interação entre o solo e a ferramenta criada. Os autores concluíram que tanto a força de tração quanto a força vertical cresceram conforme o ângulo aumentava, enquanto ângulos menores resultaram no inverso, facilitando a penetração do solo.

Nesse contexto, os estudos das forças atuantes na interação solo-ferramenta têm se mostrado de grande relevância para o desenvolvimento de novos implementos agrícolas que otimizam as operações e minimizam as perturbações do solo. Assim, o objetivo do presente trabalho foi o desenvolvimento de uma barra porta-ferramenta capaz de mensurar as forças horizontais (F_x), verticais (F_y), e longitudinais (F_z) em diferentes tipos de ponteiros durante o processo de preparação do solo com o propósito de coletar dados sobre a resistência mecânica do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

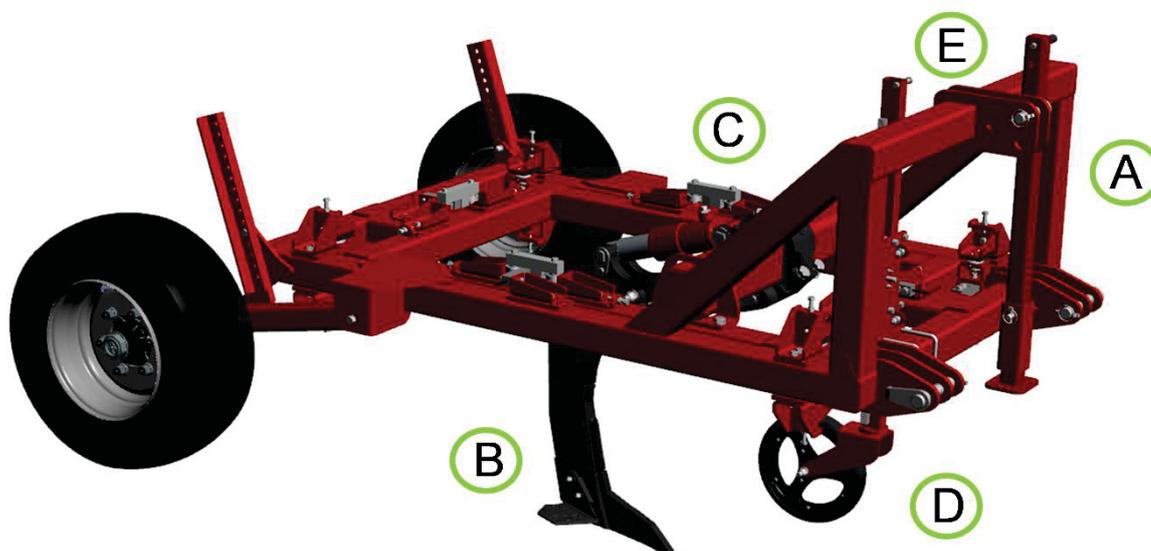
2.1 EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO

O experimento foi realizado nas instalações industriais da Horsch® do Brasil, em conjunto com o Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas (LATA), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no município de Curitiba, Paraná, Brasil.

2.1.1 Desenvolvimento e construção da barra porta-ferramentas

A (FIGURA 1) apresenta a barra porta-ferramenta desenvolvida no referido laboratório, que possui: estrutura (A), haste (B), células de carga (C), roda de controle altimétrico (D) e sistema de aquisição de dados (E).

FIGURA 1 – BARRA PORTA-FERRAMENTA

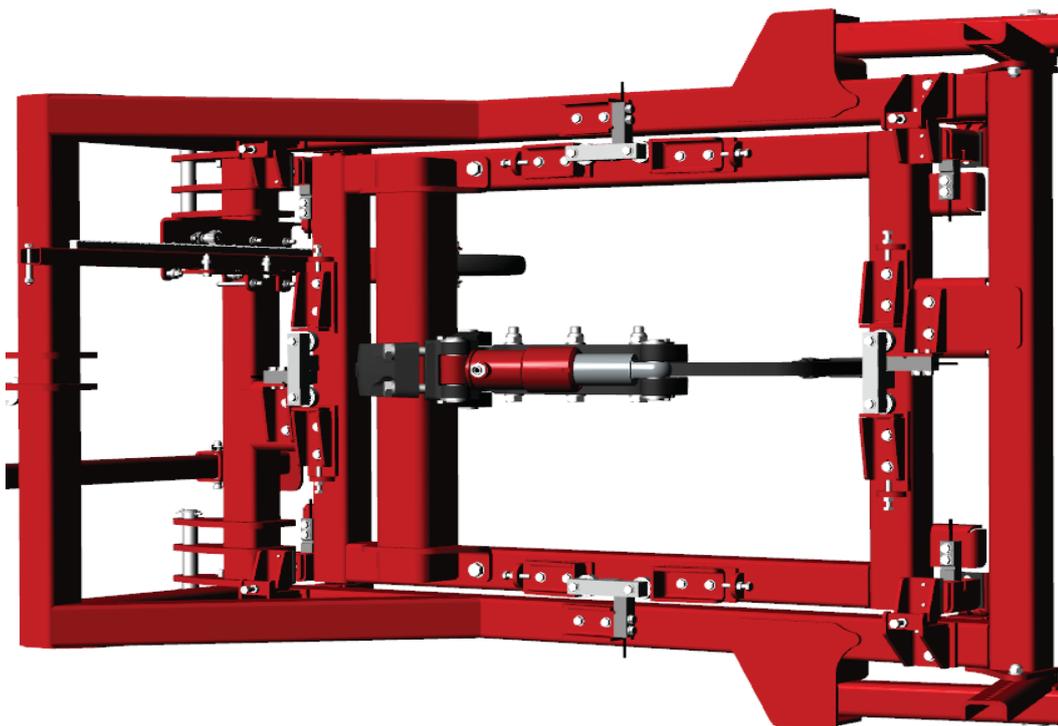


FONTE: O autor (2025).

2.1.1.1 Estrutura

O corpo estrutural retangular possui dimensões externas de 1.780 mm de comprimento por 1.280 mm de largura, enquanto o quadro interno mede 1.270 mm de comprimento e 1.080 mm de largura. O perfil é fabricado em aço industrial, com espessura de 12,7 mm e peso total de 685,91 kg.

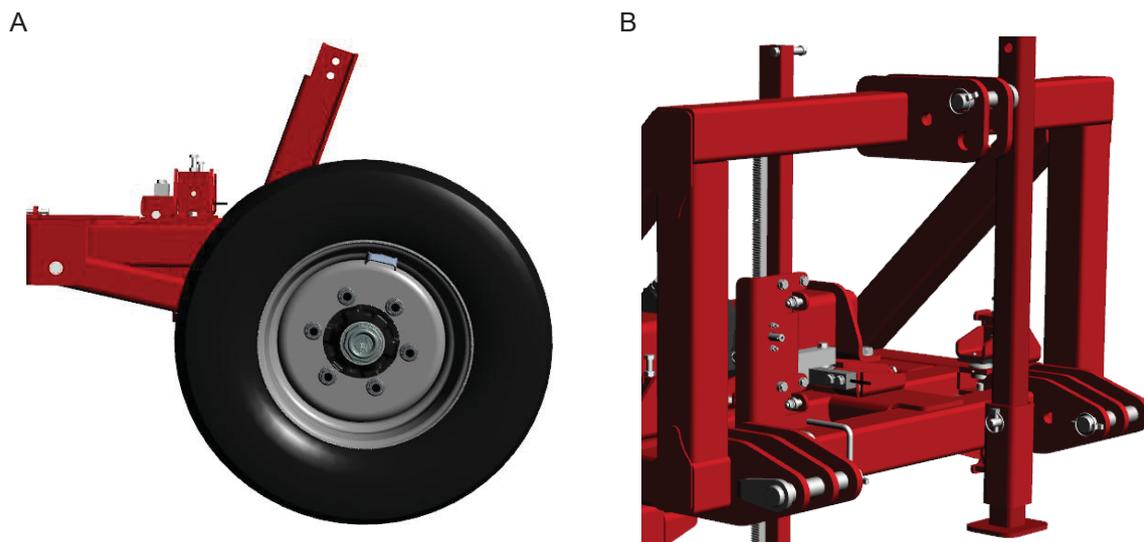
FIGURA 2 - PERFIL ESTRUTURAL



FONTE: O autor (2025).

No eixo traseiro (FIGURA 3A), foram instalados dois rodados com pneus modelo 12-16.5 HD 2000 (Titan®), enquanto no eixo dianteiro (FIGURA 3B) estão os acoplamentos para engate ao sistema hidráulico de três pontos.

FIGURA 3 – EIXO TRASEIRO (A) E EIXO DIANTEIRO (B)

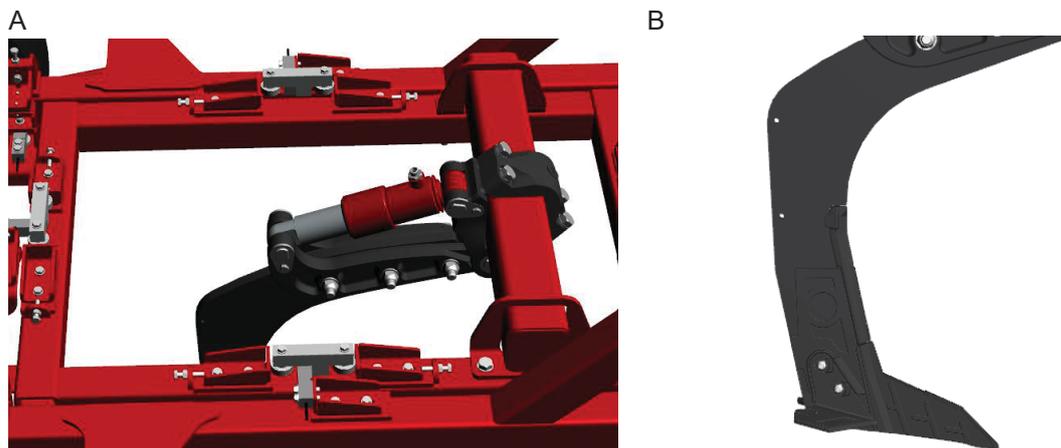


FONTE: O autor (2025).

2.1.1.2 Haste

A haste de ensaio é fixada no berço de ferramenta, que apresenta uma articulação acionada por pistão hidráulico de dupla ação, sendo alimentada por mangueiras conectadas às válvulas de controle remoto (VCR) do trator agrícola, conforme ilustrado na FIGURA 4.

FIGURA 4 – SISTEMA HIDRÁULICO (A) HASTE (B)



FONTE: O autor (2025).

2.1.1.3 Células de carga

Para avaliar as forças aplicadas nas ponteiros das hastes nas direções transversal (F_x), longitudinal (F_y) e vertical (F_z), foram instaladas oito células de carga da marca Berman[®], com capacidade de 100 kN cada. Cada célula de carga foi posicionada sobre um eixo com rolamento e conectada ao sistema eletrônico de aquisição de dados.

FIGURA 5 – CÉLULA DE CARGA

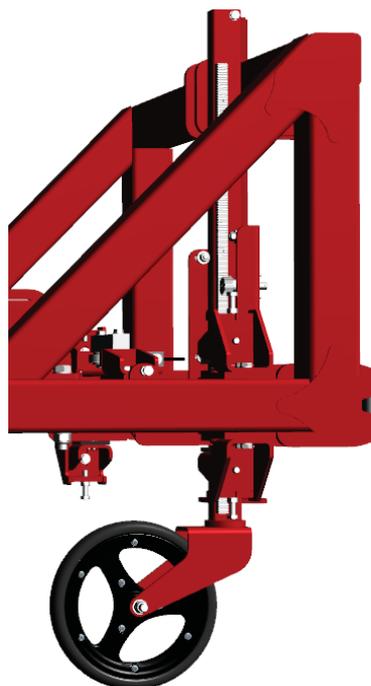


FONTE: O autor (2025).

2.1.1.4 Roda de controle altimétrico

A roda (FIGURA 6) encontra-se localizada na extremidade inferior da régua altimétrica, com a função de copiar a superfície do solo em relação à profundidade da haste. A régua possui um sistema de cremalheira com engrenagem conectada ao eixo de um potenciômetro, para realizar a leitura altimétrica e transmitir as informações ao sistema de aquisição de dados.

FIGURA 7 – RODA DE CONTROLE ALTIMÉTRICO



FONTE: O autor (2025).

2.1.1.5 Sistema de aquisição de dados

A barra porta-ferramenta dispõe de um sistema de aquisição de dados (SAD), implementado em um microcomputador modelo AT mega 328 (Atmel®). Este microcontrolador contém oito entradas analógicas e 14 entradas/saídas digitais programadas por software, bem como uma porta de comunicação/alimentação USB, velocidade do Clock de 16 MHz, tensão de alimentação 5 V e conversor analógico para digital de 10 bits.

FIGURA 8 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS



FONTE: O autor (2025).

O SAD apresenta oito entradas para células de carga, uma entrada para antena de velocidade, uma entrada para potenciômetro linear da roda altimétrica, uma entrada de alimentação 12 v e uma saída tipo USB para conexão ao computador de aquisição. A frequência de aquisição foi de 1 Hz. Os dados foram transferidos para planilhas eletrônicas e armazenados em disco rígido.

2.1.2 Calibração da barra porta-ferramenta

Para garantir a precisão na medição da força, foi realizada a calibração da célula de carga por meio da aplicação de massas conhecidas. Foram utilizados oito lastros sólidos (FIGURA 8) do tipo maleta, empregados em tratores agrícolas. A massa de cada maleta foi medida em uma balança, com uma média de 34,87 kg. O método de massas referenciais foi adotado, consistindo em 5 conjuntos de lastros, os quais foram acoplados à base da haste. Os conjuntos (C) foram: C1 (0 kg), C2 (40,86 kg), C3 (75,6 kg), C4 (145,59 kg) e C5 (284,82 kg). Para o acoplamento na haste, utilizou-se uma barra de aço (4,7 kg) e uma cinta de carga (1,12 kg), ambos considerados no cálculo de massa total.

FIGURA 9 - CALIBRAÇÃO EM LABORATÓRIO

A

B



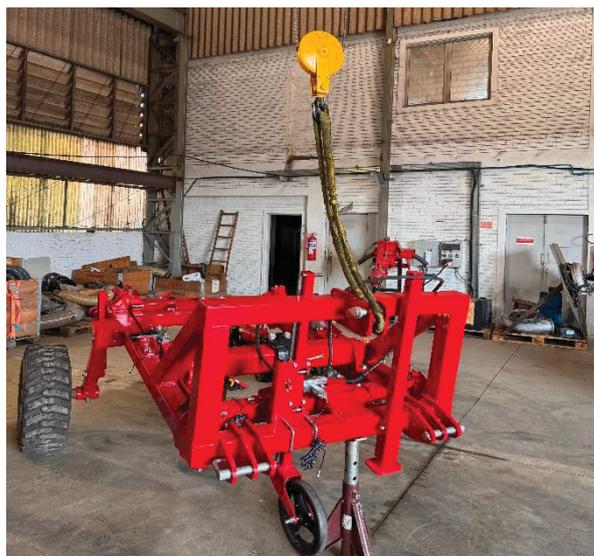
FONTE: O autor (2025).

As leituras das células de carga foram realizadas para os cinco conjuntos de massas, e o mesmo procedimento foi repetido para os módulos de sentidos dos eixos X (deslocamento transversal), Y (deslocamento longitudinal) e Z (deslocamento vertical). Para isso, com o auxílio de uma ponte rolante industrial, a estrutura da barra porta-ferramenta foi movimentada sobre a superfície de apoio, garantindo que permanecesse nas posições desejadas, conforme ilustrado na (FIGURA 9).

FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DOS MÓDULOS DE CALIBRAÇÃO

A

B



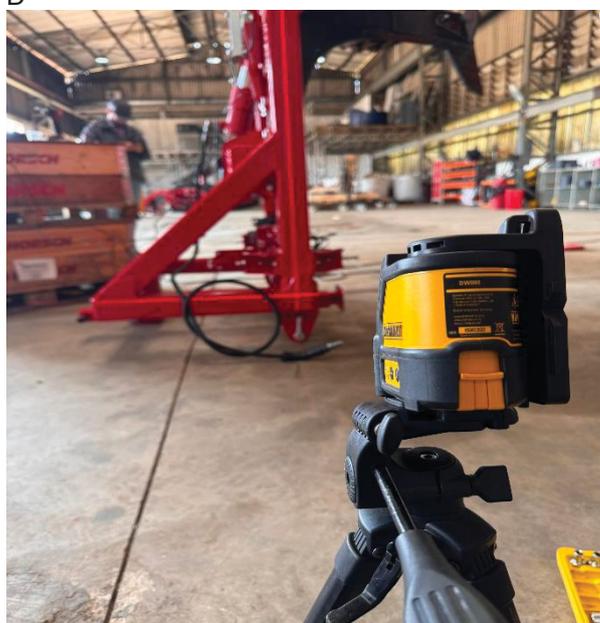
C



D



C



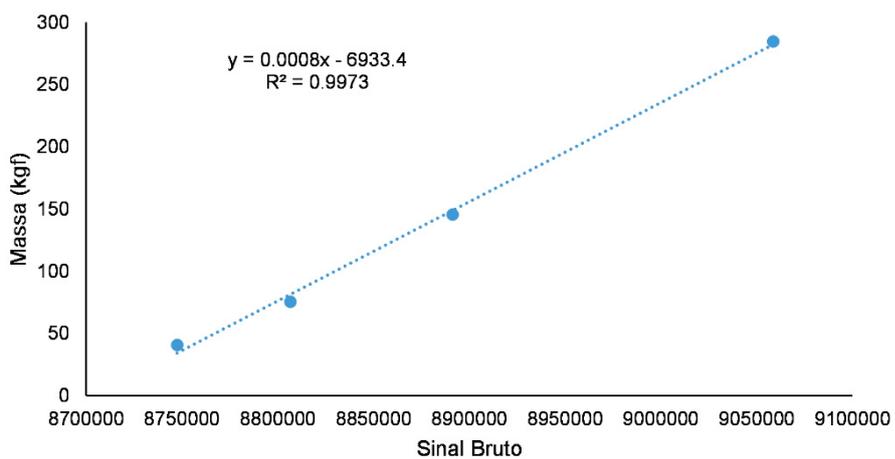
D

FONTE: O autor (2025).

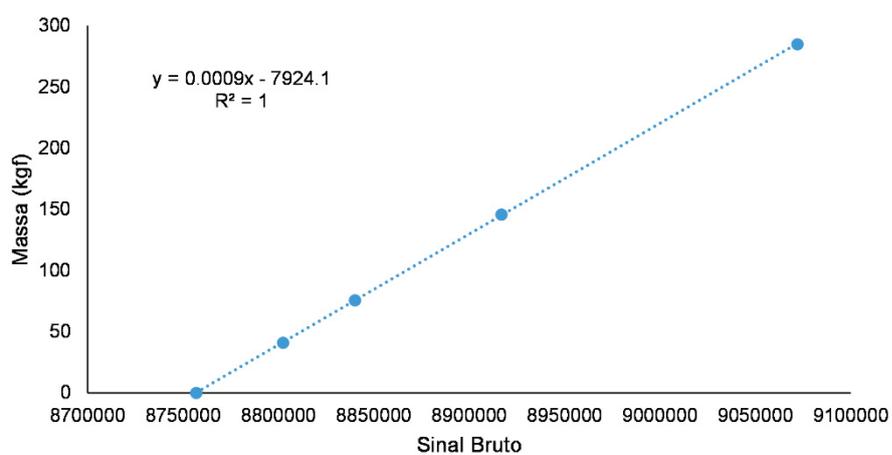
Em seguida, as leituras das células de carga foram processadas, gerando curvas de calibração para cada módulo de direção da haste, conforme mostrado na (FIGURA 10). Todos os coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 0,99.

FIGURA 11 - CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO EIXO X (A), EIXO Y (B) E EIXO Z (C)

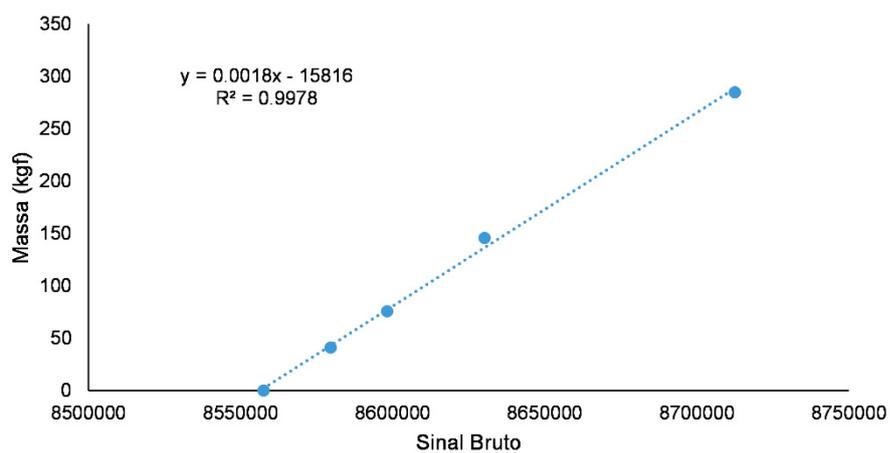
A



B



C



FONTE: O autor (2025).

2.2 EXPERIMENTO EM CAMPO

2.2.1 Localização da área experimental

O experimento foi desenvolvido na Área Experimental da Horsch® do Brasil, em Curitiba-PR, nas coordenadas latitude 25° 32' S; longitude 49° 20' O.

A região é caracterizada por relevo suave ondulado, com clima do tipo Cfb (oceânico temperado), de acordo com a classificação de Köppen. Apresenta estações bem definidas, com temperatura média máxima de 22°C no verão e 8°C no inverno, precipitação média anual de 1.480 mm e altitude de 920 m (IAPAR, 2017).

A área experimental de 0,45 ha, (FIGURA 11), apresenta declividade média no sentido de preparo de 1% e presença de cobertura vegetal (*Aveia - Avena sativa*). O solo é classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico (SANTOS et al., 2018).

FIGURA 12 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2025).

2.2.2 Caracterização da área experimental

2.2.2.1 Textura

Para determinação da textura do solo, foram coletadas amostras na área experimental, em três trincheiras nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. As amostras foram acondicionadas em recipiente apropriado e levadas ao

laboratório, então submetidas a análise pelo método do Densímetro de Bouyoucos, proposto por Gee & Bauder (1986).

2.2.2.2 Resistência do solo a penetração

A resistência do solo à penetração (RP) foi avaliada por meio do penetrômetro de acionamento manual com registro eletrônico dos dados (FIGURA 12), modelo PLG 2040 (Falker®), configurado para realizar leituras a cada 0,01 m até a profundidade de 0,3 m. O cone utilizado foi do tipo 2, com diâmetro de 12,83 mm e ângulo de 30°, seguindo o estabelecido pela norma S313.3 (ASABE, 2012).

FIGURA 13 - COLETA PENETRÔMETRO ANTES DO PREPARO (A) E APÓS O PREPARO (B)



FONTE: O autor (2025).

Foram realizadas com este equipamento 42 leituras para cada um dos tratamentos ao longo da parcela experimental, totalizando 126 pontos, resultando na elaboração de curvas de RP (0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m de profundidade), sendo as coletas realizadas transversalmente à linha de preparo, com espaçamento de 5 cm entre os pontos, abrangendo 50 cm para cada lado a partir do centro da linha de preparo, além de um ponto central exatamente sobre ela.

2.2.2.3 Densidade do solo e umidade volumétrica

Foram coletadas amostras indeformadas de solo (FIGURA 13) com o uso de anéis volumétricos de volume conhecido (100 cm^3), nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m em três pontos aleatórios ao longo da área experimental, totalizando nove amostras. Após as coletas, os anéis foram identificados, acondicionados em plástico filme, e levados ao laboratório.

FIGURA 14 - COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLO



FONTE: O autor (2025).

No laboratório, foram retirados os filmes plásticos e determinadas às respectivas massas de solo úmido, com o auxílio de balança digital semi-analítica modelo BK 5002 (Gehaka®). Em seguida as amostras foram levadas à estufa (105°C) até obtenção da massa constante, para posterior determinação da massa de solo seco, aplicando-se a (EQUAÇÃO 1) e (EQUAÇÃO 2) conforme metodologia de Embrapa (2017).

$$D_s = \left(\frac{m_a}{V} \right) \quad (1)$$

em que,

D_s – densidade do solo, g cm^{-3} ;

m_a – massa da amostra seca a 105°C até atingir peso constante, g, e

V – volume do cilindro, cm^3 .

$$U_v = \left(\frac{a - b}{c} \right) \quad (2)$$

em que,

U_v – umidade volumétrica, g g⁻¹;

a – massa da amostra úmida, g;

b – massa da amostra seca a 105°C até atingir peso constante, g, e

c – volume da amostra, cm³.

2.2.2.4 Análises físicas do solo

Na (TABELA 1) constam os valores das características físicas, RP, densidade do solo e teor de água do solo na área experimental, antes do ensaio.

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

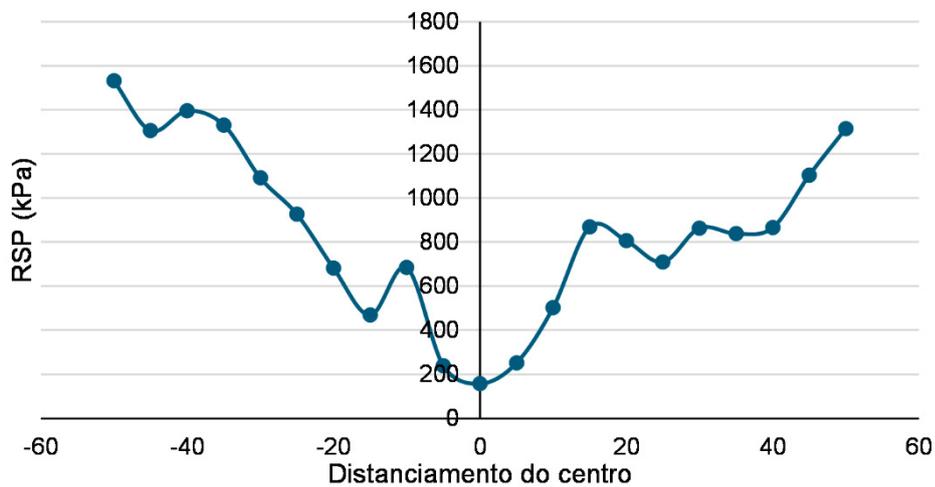
Análises	Valores
Textura do solo* (g kg ⁻¹)	
Areia	262
Silte	100
Argila	638
RP (kPa)	
0,00 - 0,10 m	1.460
0,10 - 0,20 m	2.840
0,20 - 0,30 m	2.640
0,30 - 0,40 m	2.210
0,40 - 0,50 m	2.070
0,50 - 0,60 m	2.060
Ds (g cm ⁻³)	
0,00 - 0,10 m	1,34
0,10 - 0,20 m	1,32
0,20 - 0,30 m	1,32
U _v (g g ⁻¹)	
0,00 - 0,10 m	27,65
0,10 - 0,20 m	41,52
0,20 - 0,30 m	48,25

Resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (Ds) e umidade volumétrica (U_v). *Classe de textura correspondente – Muito Argilosa (BRASIL, 2015). Fonte: O autor (2025).

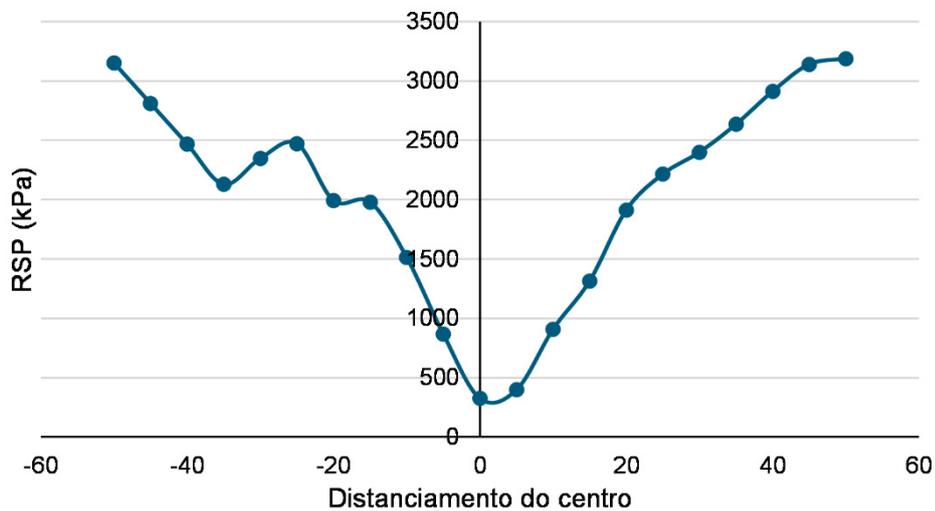
Os valores de RP correspondentes ao sulco de solo mobilizado pelos três tipos de hastes estão representados a seguir (FIGURA 14). Haste I (com asas), haste II (sem asas) e haste III (sem asas).

FIGURA 15 - CURVAS DE RP APÓS O PREPARO DA HASTE I (A), HASTE II (B) E HASTE III (C)

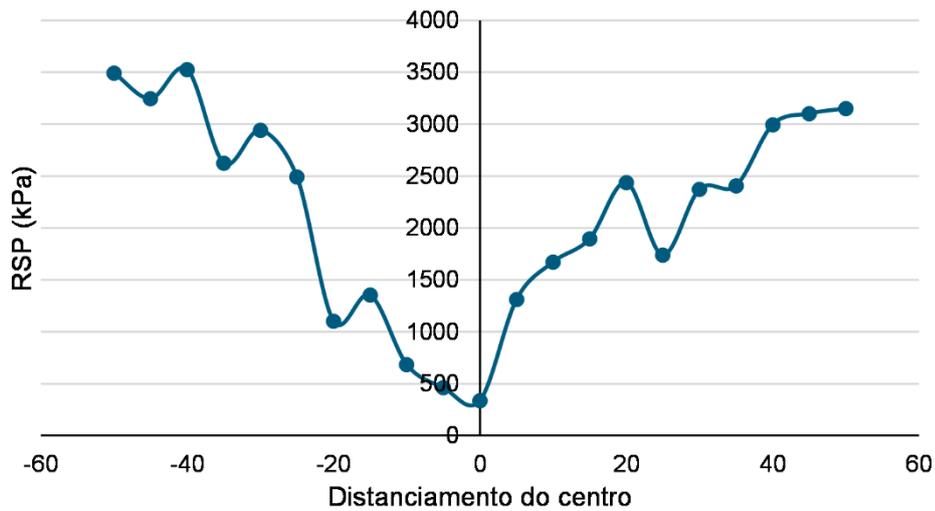
A



B



C



FONTE: O autor (2025).

2.2.3 Preparo da área experimental

2.2.3.1 Descrição dos equipamentos utilizados

As faixas de solo mobilizado para avaliação das forças resultantes foram preparadas com a barra porta-ferramenta (FIGURA 15), descrita anteriormente, com uma haste de espaçamento centralizado ao sentido de preparo, largura de trabalho de 1280 mm e massa total de 686 kg.

FIGURA 16 – BARRA PORTA-FERRAMENTA ACOPLADA AO TRATOR



FONTE: O autor (2025).

Foram utilizadas três hastes, acopladas ao suporte (berço) da barra porta-ferramenta em momentos distintos durante o ensaio em campo (FIGURA 16 e FIGURA 17). A haste I (A) possui uma ponteira de 3 cm com asas, totalizando uma largura de 27 cm; a haste II (B) tem ponteira de 3 cm, mas sem asas; e a haste III (C), um modelo de mercado, apresenta ponteira de 4,7 cm e não possui asas.

A profundidade de trabalho foi ajustada para 35 cm em todos os tratamentos, visando uniformidade operacional e comparabilidade dos dados. Esse valor baseou-se na largura das ponteiras e nas recomendações da literatura, que indicam profundidades ideais de 5 a 12 vezes a largura da ponteira, conforme a resistência do solo, geometria da haste e presença de asas laterais (AL-JANOBI & AL-SUHAIBANI, 1998; GODWIN & SPOOR, 2006; ASKARI et al., 2019).



FONTE: O autor (2025).

FIGURA 18 - PROJEÇÃO COM REFERENCIAL MÉTRICO DAS HASTES I E II (A) E HASTE III (B)

A

B



FONTE: O autor (2025).

A barra porta-ferramenta foi acoplada ao sistema hidráulico de três pontos do trator John Deere®, modelo 7230J, com potência nominal (SAE J1995) de 169 kW (230 cv), transmissão PowrQuad™ Plus 16 x 16, e dimensionado de acordo com a norma ASABE D496.3 (2011), conforme a (FIGURA 18).

FIGURA 19 - TRATOR AGRÍCOLA



FONTE: O autor (2025).

O trator foi equipado com pneus simples na dianteira, modelo 600/65R28 Firestone®, com pressão de 68,95 kPa (10 psi), e pneus duplos na traseira, modelo 520/85R42 Firestone®, com pressões de 62,05 kPa (9 psi), interno e externo, proporcionando o índice de avanço de 1,60%. A velocidade alvo foi próxima à recomendada para a operação de preparo do solo (MARTINS et al., 2018), com a rotação do motor em 2100 rpm e marcha 7F, resultando na velocidade de 6,0 km/h.

A massa estática sobre os eixos do trator foi mensurada com uma balança Celmig® CM-1002, que possui quatro sapatas. A massa total registrada foi de 10.400 kg, com aproximadamente 39% distribuído no eixo dianteiro e 61% no eixo traseiro. A relação massa-potência obtida foi de 61,54 kg kW⁻¹.

A barra porta-ferramenta foi equipada com o sistema de aquisição de dados (SAD), conforme descrito anteriormente, e teve os seguintes sensores instalados, conforme mostrado na FIGURA 19.

FIGURA 20 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO



FONTE: O autor (2025).

A antena de velocidade modelo GY-GPS6MV2 (DFRobot®) foi conectada, permitindo quantificar o deslocamento do conjunto mecanizado com base no número de pulsos emitidos. As células de carga (força) e o potenciômetro da roda altimétrica (profundidade) também estavam conectados. A alimentação de energia para o SAD foi fornecida pela bateria do trator.

A potência aferida na haste foi obtida em função da força e da velocidade, de acordo com a (EQUAÇÃO 3).

$$PTH = F \times VO \quad (3)$$

em que,

PTH – potência na haste, cv;

F – força de tração, kgf, e

VO – velocidade de deslocamento, m s⁻¹.

2.2.3.2 Avaliação da barra porta-ferramenta em campo

A área experimental foi dimensionada em três faixas (200 x 3 m), correspondendo aos três tipos de hastes, com bordadura de um metro de distância.

O conjunto mecanizado foi posicionado na direção longitudinal da faixa experimental (FIGURA 20), com a barra porta-ferramenta acoplada ao SHTP e as mangueiras hidráulicas conectadas à válvula de controle remoto (VCR). O trator foi operado com a tração dianteira auxiliar (TDA) acionada e o bloqueio do diferencial ativado.

FIGURA 21 - CONJUNTO MECANIZADO NA ÁREA EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2025).

A primeira faixa experimental foi preparada com a haste I, e, no intervalo entre as faixas, a haste I foi substituída pela II e III na barra porta-ferramenta, conforme exibido nos preparos a seguir (FIGURA 21).

FIGURA 22 - USO DA BARRA PORTA-FERRAMENTA NO SOLO

A



B



C



D



FONTE: O autor (2025).

Os dados coletados no SAD foram organizados em planilhas eletrônicas e salvos em disco rígido para análise posterior.

2.2.4 Delineamento experimental e análises estatísticas

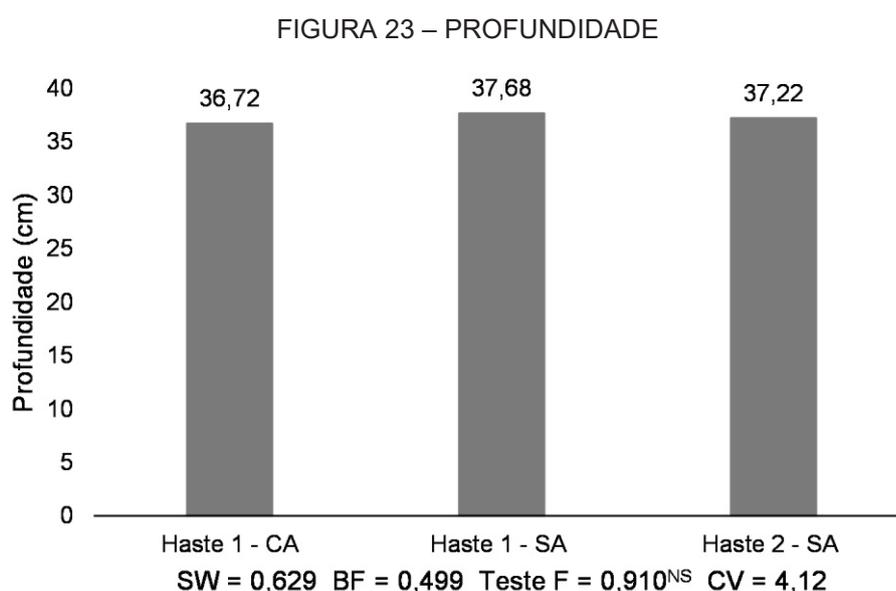
O experimento em faixas, conduzido no delineamento de blocos casualizado, resultou em três tratamentos: (I) haste com ponteira de 3 cm com asas laterais (haste 1 – CA); (II) haste com ponteira de 3 cm sem asas (haste 1 – SA); e (III) haste com ponteira de 4,7 cm sem asas (haste 2 – SA). No caso da haste com asas (haste 1 – CA), cada asa possuía 10,8 cm de comprimento lateral, totalizando uma largura efetiva de mobilização de 24,6 cm (3,0 cm da ponteira + 10,8 cm de cada lado). Para cada tratamento, foram realizadas sete repetições, totalizando 21 unidades experimentais.

Os dados coletados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e ao teste de homogeneidade da variância (Brown e Forsyth). Para os dados que apresentaram normalidade e homogeneidade, foi aplicado o teste F. Após verificar essas condições, foi realizada a análise de variância para identificar os efeitos significativos, utilizando o software estatístico R (R Core Team®). Quando o teste F indicou significância ($p \leq 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados, a seguir, os resultados dos parâmetros: Profundidade, Força Longitudinal, Força Transversal, Força Vertical, Velocidade e Potência. Dentre estes, apenas a Força Longitudinal e a Potência não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. No caso da Potência, esse comportamento pode estar relacionado à sobra de potência do trator durante os ensaios, o que reduziu a sensibilidade da variável para discriminar entre as hastes. Quanto à Velocidade, sua estabilidade pode ser atribuída ao controle padronizado adotado nos testes, conforme discutido anteriormente. Além disso, o Coeficiente de Variação permaneceu estável na maioria das variáveis, exceto na Força Vertical, que excedeu os limites considerados estáveis, de acordo com os critérios estabelecidos por Ferreira (2018).

A Profundidade efetiva de trabalho conforme ilustrado na (FIGURA 22), não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. Este resultado pode estar associado à atuação eficiente do sistema de controle de profundidade do conjunto mecanizado, que manteve a profundidade de trabalho relativamente constante, independentemente da geometria da haste. Além disso, a profundidade de operação é fortemente influenciada por fatores como a regulagem da máquina, características do solo e condições operacionais, os quais podem ter minimizado os efeitos das asas laterais, conforme Kim et al. (2022).

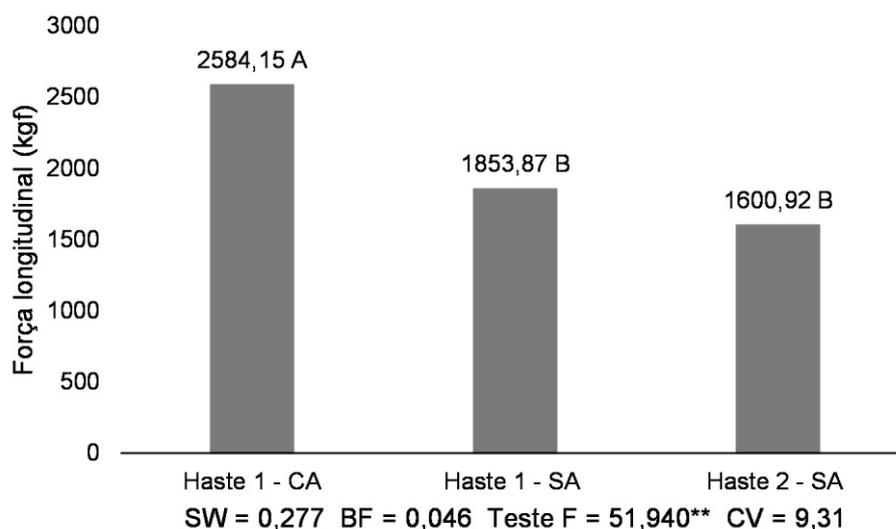


Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk: $SW \leq 0,05$ – Anormalidade dos dados; $SW > 0,05$ – Normalidade nos dados. Teste de Homogeneidade das variâncias de Brown e Forsyth: $BF \leq 0,05$ –

Variâncias Heterogêneas; $BF > 0,05$ – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; * ($p < 0,05$) e ** ($p < 0,01$). Coeficiente de variação (CV). Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo “teste de Tukey” ($p < 0,05$). FONTE: O autor (2025).

Para a Força Longitudinal (FIGURA 23), a haste 1 – CA apresentou a maior força longitudinal, sendo 28,30% superior à haste 1 – SA e 38,08% superior à haste 2 – SA, que, por sua vez, não diferiram entre si. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de asas laterais, que ampliam a área de atuação da ferramenta no solo, aumentando a largura de corte e promovendo maior elevação da massa de solo. Essa configuração resulta em um incremento significativo na resistência mecânica ao deslocamento, exigindo maior força trativa por parte do conjunto mecanizado (CVIKLOVIČ et al., 2022).

FIGURA 24 – FORÇA LONGITUDINAL



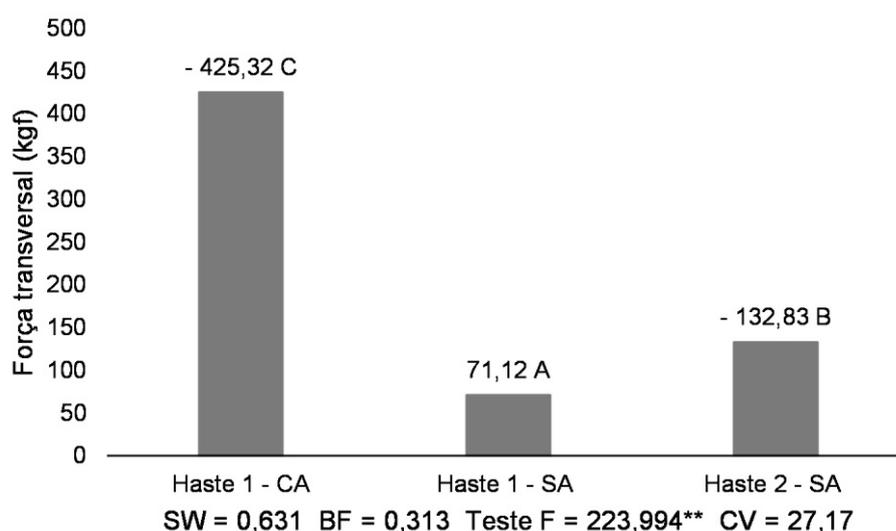
Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk: $SW \leq 0,05$ – Anormalidade dos dados; $SW > 0,05$ – Normalidade nos dados. Teste de Homogeneidade das variâncias de Brown e Forsyth: $BF \leq 0,05$ – Variâncias Heterogêneas; $BF > 0,05$ – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; * ($p < 0,05$) e ** ($p < 0,01$). Coeficiente de variação (CV). Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo “teste de Tukey” ($p < 0,05$). FONTE: O autor (2025).

De acordo com Azimi-Nejadian et al. (2019), o aumento do contato entre a ferramenta e o solo intensifica as forças de atrito e a resistência ao cisalhamento do solo, o que corrobora os valores superiores de força observados na haste com asas.

Para o parâmetro de Força Transversal (FIGURA 24), somente a haste 1 – SA apresentou valor positivo (71,12 kgf), seguida pela haste 2 – SA (-132,83 kgf) e

haste 1 – CA (-425,32 kgf). Conforme Kešner et al. (2021) este resultado está relacionado à geometria das ferramentas e sua interação com o solo. Na haste 1 – SA, sugere a presença de um desvio lateral para a direita, possivelmente causado por assimetrias na distribuição de forças durante o deslocamento. Já a haste 2 - SA indica uma tendência de deslocamento para a esquerda, o que pode estar relacionado a diferenças no ângulo de ataque ou na forma do corpo da haste, que alteram o padrão de ruptura e deslizamento do solo.

FIGURA 25 – FORÇA TRANSVERSAL

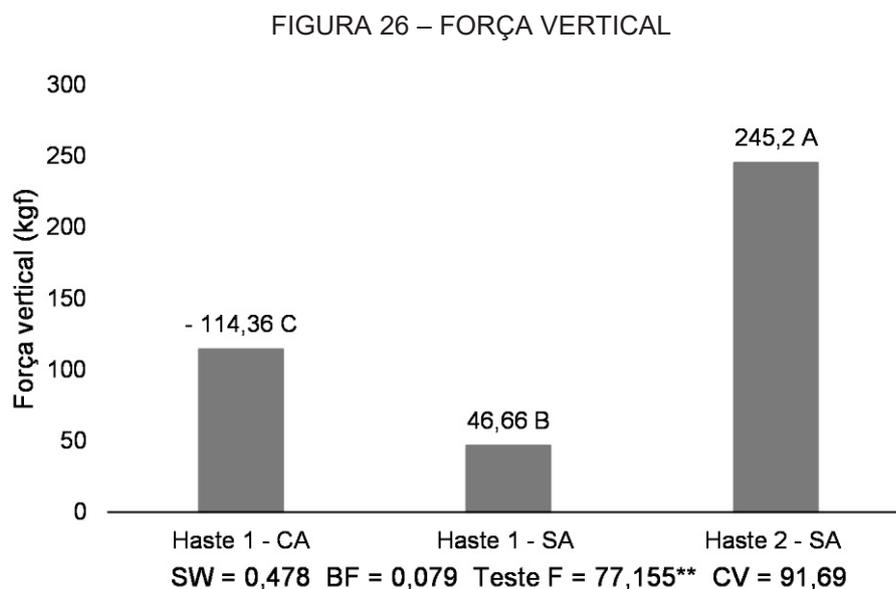


Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk: $SW \leq 0,05$ – Anormalidade dos dados; $SW > 0,05$ – Normalidade nos dados. Teste de Homogeneidade das variâncias de Brown e Forsyth: $BF \leq 0,05$ – Variâncias Heterogêneas; $BF > 0,05$ – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; * ($p < 0,05$) e ** ($p < 0,01$). Coeficiente de variação (CV). Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo “teste de Tukey” ($p < 0,05$). FONTE: O autor (2025).

A resultado da haste 1 – CA pode estar relacionada à ação assimétrica das asas laterais, que ampliam o efeito de deslocamento lateral devido à maior resistência e à distribuição desigual das forças ao longo da largura de trabalho da ferramenta, corroborando com Askari et al. (2019). Neste sentido, as asas promovem uma perturbação lateral mais intensa, concentrando a resistência em um dos lados da haste, o que resulta em uma força de reação lateral acentuada na direção oposta.

A Força Vertical (FIGURA 25), apresentou resultado superior na haste 2 – SA em relação a haste 1 – SA (80,97%) e haste 1 – CA (-146,64%), sendo o tratamento com asas exibindo valor negativo. Esse resultado indica que a haste 2 – SA exige maior força de penetração e/ou induz maior reação vertical do solo, possivelmente

devido ao seu formato e ângulo de ataque, que favorecem um maior deslocamento vertical do solo. Em contrapartida, a haste 1 – CA apresentou valor negativo de força vertical, sugerindo a ocorrência de uma força de levantamento, ou seja, uma tendência de a haste ser empurrada para cima pelo solo.



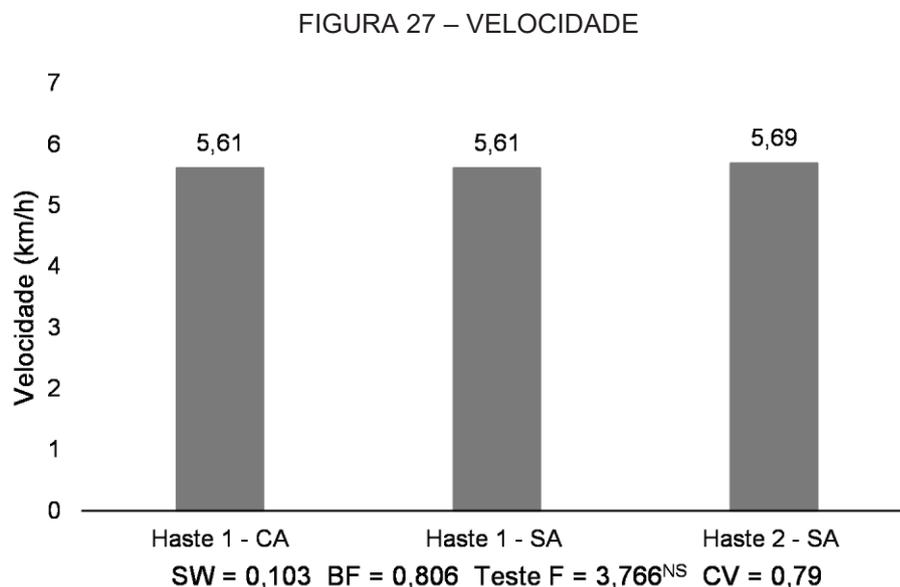
Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk: $SW \leq 0,05$ – Anormalidade dos dados; $SW > 0,05$ – Normalidade nos dados. Teste de Homogeneidade das variâncias de Brown e Forsyth: $BF \leq 0,05$ – Variâncias Heterogêneas; $BF > 0,05$ – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; * ($p < 0,05$) e ** ($p < 0,01$). Coeficiente de variação (CV). Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo “teste de Tukey” ($p < 0,05$). FONTE: O autor (2025).

Segundo Kešner et al. (2021), esse comportamento é comum de ferramentas com asas, pois essas estruturas ampliam a área de corte horizontal, promovendo o levantamento do solo e, como consequência, gerando uma componente vertical negativa da força de reação.

Para a Velocidade (FIGURA 26), não houve diferença significativa entre os tratamentos, o que pode ser atribuído à padronização do controle da velocidade durante os ensaios, realizada com o objetivo de garantir condições homogêneas de operação para todos os tratamentos. Além disso, como a velocidade é frequentemente determinada por ajustes do trator ou por sistemas automatizados embarcados, sua estabilidade ao longo das repetições contribuiu para a ausência de diferenças significativas entre os modelos testados, conforme Kazenwadel et al. (2025).

Ressalta-se ainda que, devido à elevada relação massa-potência observada, o trator operava com sobra de potência para a realização da atividade, o que

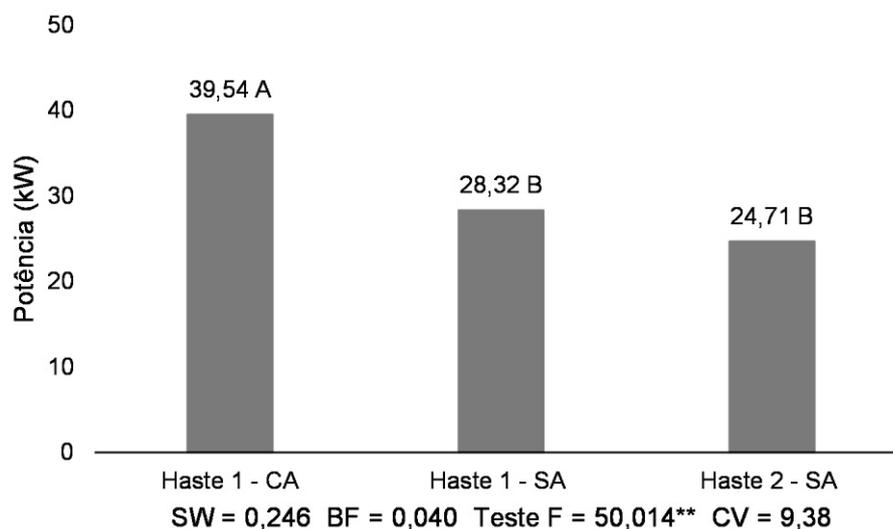
favoreceu a manutenção da velocidade constante, independentemente da configuração das hastes avaliadas.



Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk: $SW \leq 0,05$ – Anormalidade dos dados; $SW > 0,05$ – Normalidade nos dados. Teste de Homogeneidade das variâncias de Brown e Forsyth: $BF \leq 0,05$ – Variâncias Heterogêneas; $BF > 0,05$ – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; * ($p < 0,05$) e ** ($p < 0,01$). Coeficiente de variação (CV). Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo “teste de Tukey” ($p < 0,05$). FONTE: O autor (2025).

Em relação à Potência (FIGURA 27), a haste 1 – CA apresentou demanda significativamente superior, sendo 11,22 kW (15,25 CV) maior que a da haste 1 – SA e 14,83 kW (20,16 CV) maior que a da haste 2 – SA, as quais não diferiram entre si. Esse aumento está diretamente associado à maior área de contato com o solo promovida pelas asas laterais, que ampliam a largura de corte e intensificam o revolvimento do solo, resultando em maior mobilização da massa de solo e, conseqüentemente, maior resistência ao avanço da ferramenta — o que se reflete no acréscimo da força longitudinal (WANG et al., 2023).

FIGURA 28 – POTÊNCIA



Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk: $SW \leq 0,05$ – Anormalidade dos dados; $SW > 0,05$ – Normalidade nos dados. Teste de Homogeneidade das variâncias de Brown e Forsyth: $BF \leq 0,05$ – Variâncias Heterogêneas; $BF > 0,05$ – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; * ($p < 0,05$) e ** ($p < 0,01$). Coeficiente de variação (CV). Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo “teste de Tukey” ($p < 0,05$). FONTE: O autor (2025).

A potência demandada é fortemente influenciada por essa força longitudinal, que representa o esforço trativo necessário para movimentar a haste durante a operação (AL-NEAMA et al., 2021). Além disso, o aumento do atrito e da resistência ao cisalhamento entre ferramenta e solo contribui para os valores mais elevados de potência observados.

Embora a presença de asas possa melhorar a eficiência de descompactação e a incorporação de resíduos, também implica maior exigência energética, fator importante a ser considerado no planejamento e dimensionamento de implementos agrícolas para diferentes condições de solo (LIU et al., 2023).

4 CONCLUSÃO

A barra porta-ferramentas apresentou desempenho e confiabilidade satisfatórios, confirmando a validação da fase de testes do equipamento desenvolvido.

A haste com ponteira de 3 cm com asas laterais obteve o melhor desempenho na mobilização do solo, evidenciado pelas elevadas forças longitudinal e transversal (negativa), além da maior exigência de potência.

A haste com ponteira de 3 cm sem asas apresentou desempenho intermediário, sendo a única a apresentar força transversal positiva. Já a haste com ponteira de 4,7 cm sem asas apresentou forças longitudinais e demanda de potência semelhantes às da haste com ponteira de 3 cm com asas laterais, mas se destacou pela maior força vertical, indicando maior resistência à penetração.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em futuras pesquisas, recomenda-se a avaliação do desempenho da barra porta-ferramentas e das diferentes configurações de hastes em distintos tipos de solo, como solos arenosos, argilosos e siltosos. Essa análise permitirá verificar a adaptabilidade do equipamento a diferentes condições edafoclimáticas, ampliando sua aplicabilidade prática.

Outra possibilidade relevante é o estudo do comportamento das hastes em diferentes profundidades de operação. Variar a profundidade de trabalho pode influenciar significativamente a mobilização do solo, o consumo de potência e o desgaste dos componentes, sendo, portanto, um fator importante a ser considerado em futuros ensaios.

Adicionalmente, a influência da velocidade de deslocamento sobre o desempenho do sistema. Diferentes velocidades podem alterar as forças atuantes, a potência demandada e até a qualidade do preparo do solo, sendo importante entender esses efeitos para uma operação mais eficiente.

Por fim, futuras pesquisas podem abordar os impactos agronômicos da mobilização do solo realizada pelas diferentes hastes, avaliando parâmetros como infiltração de água, compactação residual, desenvolvimento das raízes e produtividade das culturas.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR-GILANDEH, M. et al. Measuring and Comparing Forces Acting on Moldboard Plow and Para-Plow with Wing to Replace Moldboard Plow with Para-Plow for Tillage and Modeling It Using Adaptive Neuro-Fuzzy Interface System (ANFIS). **Agriculture**, v. 10, p. 633, 2020.

AHMED, Z. et al. An examination of thematic research, development, and trends in remote sensing applied to conservation agriculture. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 12, p. 77-95, 2024.

AIKINS, K. A. et al. Evaluation of bentleg and straight narrow point openers in cohesive soil. **Soil and Tillage Research**, v. 211, p. 105004, 2021.

AIKINS, K. A. et al. No-tillage furrow opener performance: A review of tool geometry, settings and interactions with soil and crop residue. **Soil Research**, v. 58, p. 603-621, 2020.

AL-NEAMA, A. K. A. et al. The relationship between draft force and horizontal force acting on passive tillage tool in term of soil-tool interaction. **A review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 735, p. 012071, 2021.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS (ASABE). **ASABE S313.3**: Soil cone penetrometer. St. Joseph, 2012.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL BIOLOGICAL ENGINEERS (ASABE). **ASABE 496.3**: Agricultural machinery management data. St. Joseph, 2011.

ASKARI et al. New wings on the interaction between conventional subsoiler and paraplow tines with the soil: effects on the draft and the properties of soil. **Archives of agronomy and Soil Science**, v. 65, p. 88-100, 2019.

AZIMI-NEJADIAN, H. et al. Combined finite element and statistical models for predicting force components on a cylindrical mouldboard plough. **Biosystems Engineering**, v. 186, p. 168-181, 2019.

BECKER, R. K. et al. Mechanical Intervention in Compacted No-Till Soil in Southern Brazil: Soil Physical Quality and Maize Yield. **Agronomy**, v. 12, p. 2281, 2022.

BELLÉ, M. P. et al. Demanda energética e mobilização do solo com o uso de escarificadores em sistemas de semeadura direta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 551-558, 2014.

BLANCO-CANQUI, H.; WORTMANN, C. S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. **Soil and Tillage Research**, v. 198, p. 104534, 2020.

BRASIL. IBGE. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais (org.). **Manual técnico de Pedologia**: manuais técnicos em geociências. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 430 p.

BULGAKOV, V. et al. A theoretical study of the limit path of the movement of a layer of soil along the plough mouldboard. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104406, 2019.

CVIKLOVIČ, V. et al. Data Acquisition System for On-the-Go Soil Resistance Force Sensor Using Soil Cutting Blades. **Sensors**, v. 22, p. 5301, 2022.

DE MOURA, J. B. et al. Effects of direct and conventional planting systems on mycorrhizal activity in wheat grown in the Cerrado. **Scientific Reports**, v. 14, p. 24793, 2024.

FERREIRA, P. V. **Estatística experimental aplicada as ciências agrárias**. Viçosa, 2018.

FRENE, J. P. et al. Under pressure: elucidating soil compaction and its effect on soil functions. **Plant and Soil**, v. 502, p. 267-278, 2024.

FUENTES-LLANILLO, R. et al. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 208, p. 104877, 2021.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle size analysis, In A. Klute (Ed), Methods of Soil Analysis. **Part I, ASA Monograph**, n. 9, p. 337-382, 1986.

HOSEINIAN, S. H. et al. Development of a dual sideway-share subsurface tillage implement: Part 1. Modeling tool interaction with soil using DEM. **Soil and Tillage Research**, v. 215, p. 105201, 2022a.

HOSEINIAN, S. H. et al. Development of a dual sideway-share subsurface tillage implement: Part 2. Effect of tool geometry on tillage forces and soil disturbance characteristics. **Soil and Tillage Research**, v. 215, p. 105200, 2022b.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina, 2017.

KAZENWADEL, B. et al. Operating Point Optimization of Agricultural Tractor–Implement Combinations as Constraint Optimization Problem. **Eng**, v. 6, p. 27, 2025.

KEŠNER, A. et al. Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element methods and validate by experiment. **Biosystems Engineering**, v. 209, p. 125-138, 2021.

KIM, Y. et al. Analysis of the effect of tillage depth on the working performance of tractor-moldboard plow system under various field environments. **Sensors**, v. 22, p. 2750, 2022.

LENZ, A. M. et al. Correlation of soil physical attributes with furrowing shank strength and depth in a no-till seeder. **Engenharia Agrícola**, v. 42, e20210139, 2022.

LIU, K. et al. Combining simulations and field experiments: Effects of subsoiling angle and tillage depth on soil structure and energy requirements. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 214, p. 108323, 2023.

MARTINS, M. B. et al. Otimização energética de um trator agrícola utilizando normas técnicas em operações de gradagem. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, p. 52-57, 2018.

NASCIMENTO, V. do. Et al. Mechanical Chiseling and the Cover Crop Effect on the Common Bean Yield in the Brazilian Cerrado. **Agriculture**, v. 12, p. 616, 2022.

NUNES, M. R. et al. Efeito de semeadora com haste sulcadora para ação profunda em solo manejado com plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 627-638, 2014.

SANTOS, H. G. dos et al. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SILVA, P. R. A. et al. Semeadora-adubadora: mecanismos de corte de palha e cargas verticais aplicadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 1367-1373, 2012.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **SAE J1995**: Engine power test code-Spark ignition and compression ignition-net power rating. EUA, 1995.

VUAILLE, J. et al. Modelling pesticide degradation and leaching in conservation agriculture: Effect of no-till and mulching. **Science of The Total Environment**, v. 929, e172559, 2024.

WANG, X. et al. Methods for reducing the tillage force of subsoiling tools: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 229, p. 105676, 2023.

ZHANG, B. et al. Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. **Land Degradation & Development**, v. 35, p. 3256-3273, 2024.