

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL GANANCINI ZIMMERMANN

DESENVOLVIMENTO DE PERFILÔMETRO ELETRÔNICO PARA MENSURAÇÃO  
DE VARIÁVEIS DE MOBILIZAÇÃO EM PREPARO DO SOLO

CURITIBA

2022

GABRIEL GANANCINI ZIMMERMANN

DESENVOLVIMENTO DE PERFILÔMETRO ELETRÔNICO PARA MENSURAÇÃO  
DE VARIÁVEIS DE MOBILIZAÇÃO EM 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

Coorientador: Prof. Dr. André Carlos Auler

CURITIBA

2022

Zimmermann, Gabriel Ganancini

Desenvolvimento de perfilômetro eletrônico para mensuração de variáveis de mobilização em preparo do solo. - Curitiba, 2022.  
76f.: il.

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

Orientador: Prof. Dr. Samir Paulo Jasper

Coorientador: Prof. Dr. André Carlos Auler

1. Solos - Preparo. 2. Mecanização agrícola. 3. Solos - Manejo. I. Jasper, Samir Paulo. II. Auler, André Carlos. III. Título IV. Universidade Federal do Paraná.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E 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 **GABRIEL GANANCINI ZIMMERMANN** intitulada: **DESENVOLVIMENTO DE PERFILÔMETRO ELETRÔNICO PARA MENSURAÇÃO DE VARIÁVEIS DE MOBILIZAÇÃO EM 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, 06 de Janeiro de 2022.

Assinatura Eletrônica

06/01/2022 10:39:32.0

SAMIR PAULO JASPER

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

06/01/2022 10:43:57.0

TIAGO RODRIGO FRANCIETTO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA)

Assinatura Eletrônica

06/01/2022 10:46:16.0

JORGE WILSON CORTEZ

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS)

---

Rua dos Funcionários, 1540 - CURITIBA - Paraná - Brasil  
CEP 80035-050 - Tel: (41) 3350-5648 - E-mail: [pgcisolo@ufpr.br](mailto:pgcisolo@ufpr.br)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 141456

**Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 141456**

Dedico a Deus, meus pais, meu orientador e meus amigos do Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela graça da vida e por permitir que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos.

A minha família pelo incentivo e apoio, em especial meus pais Adolfo e Jane que sempre fizeram o possível por mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Samir Paulo Jasper, pela confiança no meu trabalho, por me ensinar, pela compreensão e pelos sábios conselhos de vida.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. André Carlos Auler, também pela confiança e por prontamente me ajudar sempre que o procurei.

A banca avaliadora, Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez e Prof. Dr. Tiago Rodrigo Francetto, por imediatamente aceitarem participar e contribuir.

A todos os amigos do Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas (LATA), em especial ao Daniel Savi, por toda a ajuda, parceria e pronta disposição ao longo deste período. Agradeço também aos amigos Leonardo Leonidas Kmiecik, Lauro Strapasson Neto, Rafael da Silva Ferraz, Gabriel Alexandre de Oliveira, Mariane Condol da Costa, Rogerio Antônio Pinto da Silva Filho, Filipe Afonso Ingles, Gabrielle Cristine Ribeiro de Azevedo, Adailto Garcia, Juliano Muller e tantos outros que possibilitaram a conclusão desta pesquisa.

A Universidade Federal do Paraná, instituição centenária e renomada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pela oportunidade, qualidade e compromisso.

A Fazenda Experimental Canguiri e ao Prof. Dr. Arthur Arrobas Martins Barroso por ceder a área experimental, além da estrutura de recursos físicos.

A CNH Industrial pela disponibilidade do trator agrícola e de todo o suporte para o desenvolvimento do experimento.

A todos aqueles que direta ou indiretamente fizeram parte desta etapa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Muito Obrigado.

Investir em conhecimento rende sempre os melhores juros.

(Benjamin Franklin, 1776)

## RESUMO

A intensificação do preparo profundo do solo na agricultura tem crescido nos últimos anos, pois este sistema visa aumentar a faixa de solo estruturado química e fisicamente para o desenvolvimento e estabelecimento da lavoura. O resultado da operação de preparo do solo é influenciado pela velocidade operacional que reflete diretamente na profundidade desse preparo. A qualidade desta operação agrícola pode ser mensurada por perfilômetros, que relatam o empolamento do solo, a área transversal mobilizada e a rugosidade superficial. Entretanto, a determinação destes parâmetros por meio do método tradicional, é onerosa em mão-de-obra e tempo, além de resultar em um pós-processamento de dados elevado. Assim, surge a necessidade da modernização desse método através da eletrônica e automação. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de aquisição de dados automático para processos de perfilometria e comparar com o método tradicional, além de analisar quatro velocidades alvos da operação de preparo do solo como teste de verificação. O experimento em laboratório foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado, em que foram avaliados dois perfilômetros, tradicional e eletrônico, além de cinco parâmetros de perfilometria (Rugosidade modificada, Área elevada, Área mobilizada, Empolamento e Espessura), com sete repetições. No campo, o experimento foi conduzido em faixas no delineamento de blocos casualizado, com o uso dos perfilômetros tradicional e eletrônico alocados nas parcelas, e as velocidades alvo (5,7, 6,8, 8,2 e 9,8 km h<sup>-1</sup>) da operação de preparo do solo com grade nas subparcelas. Para cada tratamento foram realizadas sete repetições, totalizando 56 unidades experimentais. Os parâmetros avaliados foram Rugosidade modificada, Área elevada, Área mobilizada, Empolamento e Espessura, Resistência específica operacional do solo e Demanda energética para operação de gradagem. Os dados coletados foram analisados quanto a normalidade e homogeneidade da variância, posteriormente submetidos à análise de variância, e se significativo as médias foram comparadas pelo teste de Tukey para fatores qualitativos (perfilômetro), e teste de regressão polinomial aplicado para fatores quantitativos (velocidade operacional). Através dos dados obtidos com ambos os perfilômetros durante os ensaios laboratorial e a campo, constata-se a validação de fase do equipamento desenvolvido e a possibilidade da realização de leituras eletrônicas com menor tempo de aquisição e interferência no ambiente durante as avaliações. O acréscimo da velocidade operacional proporciona incremento nos níveis de rendimento energético da operação de preparo do solo.

Palavras-chave: Mobilização do solo. Ensaio de campo. Preparo primário do solo. Mecanização agrícola.

## ABSTRACT

The intensification of deep soil preparation in agriculture has grown in recent years, as this system aims to increase the range of chemically and physically structured soil for the development and establishment of the crop. The result of the tillage operation is influenced by the operating speed, which directly reflects on the depth of tillage. The quality of this agricultural operation can be measured by profilometers, which report soil blistering, mobilized cross-sectional area and surface roughness. However, the determination of these parameters through the traditional method is costly in labor and time, in addition to resulting in a high data post-processing. Thus, there is a need to modernize this method through electronics and automation. In this way, the present work aims to develop an automatic data acquisition system for profilometry processes and compare with the traditional method, in addition to analyzing four target speeds of the soil preparation operation as a verification test. The laboratory experiment was carried out in a completely randomized design, in which two profilometers, traditional and electronic, were evaluated, in addition to five profilometry parameters (modified roughness, elevated area, mobilized area, blistering and thickness), with seven replications. In the field, the experiment was carried out in strips in a randomized block design, using traditional and electronic profilometers allocated in the plots, and the target speeds (5.7, 6.8, 8.2 and 9.8 km h<sup>-1</sup>) of the soil preparation operation with harrow in the subplots. For each treatment, seven replications were performed, totaling 56 experimental units. The parameters evaluated were Modified roughness, Elevated area, Mobilized area, Blistering and Thickness, Specific soil operational strength and Energy demand for harrowing operation. The collected data were analyzed for normality and homogeneity of variance, subsequently submitted to analysis of variance, and if significant, the means were compared by Tukey's test for qualitative factors (profilometer), and polynomial regression test applied for quantitative factors (operational speed). Through the data obtained with both profilometers during the laboratory and field tests, the phase validation of the developed equipment and the possibility of performing electronic readings with less acquisition time and interference in the environment during the evaluations can be verified. The increase in operational speed provides an increase in the energy efficiency levels of the soil preparation operation.

Keywords: Mobilization of the soil. Field test. Primary soil preparation. Agricultural mechanization.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PERFILÔMETRO ELETRÔNICO .....	19
FIGURA 2 - PERFIL BOSCH .....	20
FIGURA 3 - PERFIL V-SLOT .....	20
FIGURA 4 - DRIVER DE ALTA PERFORMANCE .....	21
FIGURA 5 - MOTOR DE PASSO .....	21
FIGURA 6 - CORREIA DENTADA (A) E POLIA (B) .....	22
FIGURA 7 - SENSOR ÓPTICO LASER .....	22
FIGURA 8 - MICROCOMPUTADOR .....	24
FIGURA 9 - PERFILÔMETRO CONVENCIONAL .....	25
FIGURA 10 - PERFIL SQUARE PIPE .....	25
FIGURA 11 - HASTE METÁLICA (A) E BOBINA DE PAPEL (B) .....	26
FIGURA 12 - CALIBRAÇÃO DO PERFILÔMETRO .....	27
FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO DOS PERFIS REFERENCIAIS (PERFILÔMETRO CONVENCIONAL X PERFILÔMETRO ELETRÔNICO) .....	28
FIGURA 14 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL .....	31
FIGURA 15 - ÁREA EXPERIMENTAL VISÃO HORIZONTAL .....	32
FIGURA 16 - COLETA COM PENETRÔMETRO .....	33
FIGURA 17 - COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLO PARA DENSIDADE .....	34
FIGURA 18 - GRADE PESADA .....	36
FIGURA 19 - TRATOR AGRÍCOLA .....	37
FIGURA 20 - MENSURAÇÃO DE MASSA ESTÁTICA DO TRATOR .....	38
FIGURA 21 – ÁREA DE CONTATO DOS PNEUS COM A SUPERFÍCIE .....	39
FIGURA 22 - MENSURAÇÃO DA ALTURA DE GARRA DOS PNEUS .....	40
FIGURA 23 - ANTENA DE VELOCIDADE .....	41
FIGURA 24 – CÉLULA DE CARGA ACOPLADA NA BARRA DE TRAÇÃO .....	42
FIGURA 25 – FLUXÔMETROS CENTRAL EXTERNA (A) E INTERNA (B) .....	43
FIGURA 26 - SENSORES DE PRESSÃO, TEMPERATURA E RUÍDO .....	49
FIGURA 27 - DIMENSIONAMENTO DE FAIXAS - (A) DELIMITAÇÃO DE LEITURA (B) CAL HIDRATADA .....	51
FIGURA 28 - MARCAÇÕES DO PERFIL NATURAL DO SOLO – (A) CONVENCIONAL (B) ELETRÔNICO .....	52

FIGURA 29 - PREPARO DO SOLO .....	53
FIGURA 30 - MARCAÇÕES DO PERFIL MOBILIZADO DO SOLO – (A) CONVENCIONAL (B) ELETRÔNICO .....	54
FIGURA 31 - MARCAÇÕES DO PERFIL DE CORTE DO SOLO – (A) CONVENCIONAL (B) ELETRÔNICO .....	55
FIGURA 32 - REGRESSÃO PARA VELOCIDADE ALVO .....	60
FIGURA 33 - REGRESSÃO PARA O FATOR ISOLADO VELOCIDADE ALVO .....	61
FIGURA 34 - REGRESSÃO PARA O FATOR ISOLADO VELOCIDADE ALVO .....	63

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - CURVA DE CALIBRAÇÃO SENSOR LASER .....	23
GRÁFICO 2 - FUNÇÃO DE AFERIÇÃO PARA ANTENA DE VELOCIDADE .....	41
GRÁFICO 3 - FUNÇÃO DE AFERIÇÃO PARA CÉLULA DE CARGA .....	42
GRÁFICO 4 - FUNÇÃO DE AFERIÇÃO PARA O FLUXÔMETRO DE ENTRADA DE COMBUSTÍVEL AO TANQUE .....	45
GRÁFICO 5 - FUNÇÃO DE AFERIÇÃO PARA O FLUXÔMETRO DE RETORNO DE COMBUSTÍVEL AO TANQUE .....	45

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DO SOLO. TEXTURA, RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RSP), DENSIDADE DO SOLO ( $D_s$ ), UMIDADE VOLUMÉTRICA ( $U_v$ ), LIMITE DE LIQUIDEZ (LL), LIMITE DE PLASTICIDADE (LP) E ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP) .....	35
TABELA 2 - FATORES DE CONVERSÃO ENTRE NORMAS .....	38
TABELA 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ALTURA DE GARRAS DOS PNEUS .....	40
TABELA 4 - CARACTERIZAÇÃO DA PRESSÃO, TEMPERATURA, UMIDADE E RUÍDO DURANTE A OPERAÇÃO DE PREPARO DO SOLO .....	50
TABELA 5 - SÍNTESE ESTATÍSTICA DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E DO TESTE DE MÉDIAS PARA OS PARÂMETROS DE PERFILOMETRIA DO SOLO EM LABORATÓRIO .....	57
TABELA 6 - SÍNTESE ESTATÍSTICA DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E DO TESTE DE MÉDIAS PARA OS PARÂMETROS DE PERFILOMETRIA DO SOLO EM CAMPO .....	58
TABELA 7 - SÍNTESE ESTATÍSTICA DAS ANÁLISES DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS DE DEMANDA ENERGÉTICA AVALIADAS .....	61
TABELA 8 - SÍNTESE ESTATÍSTICA DAS ANÁLISES DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS DE DEMANDA ENERGÉTICA AVALIADAS .....	63
TABELA 9 - RESULTADOS DO MONITORAMENTO DO TEOR DE ÁGUA DO SOLO NA ÁREA EXPERIMENTAL ANTES DO PREPARO DO SOLO .....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
APA	- Área de Preservação Ambiental
ASABE	- American Society of Agricultural and Biological Engineers
CV	- Coeficiente de Variação
DSEA	- Departamento de Solos e Engenharia Agrícola
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FEC	- Fazenda Experimental Canguiri
IAPAR	- Instituto Agrônômico do Paraná
ISO	- International Organization for Standardization
LATA	- Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas
NBR	- Norma Brasileira
NEMA	- National Electrical Manufacturers Association
ODS	- Optical Distance Sensors
PVC	- Policloreto de vinila
SAD	- Sistema de Aquisição de Dados
TDA	- Tração Dianteira Auxiliar
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
USB	- Universal Serial Bus
WGS 84	- World Geodetic System (1984, EPSG: 4326)

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

%	- Porcentagem
®	- Marca registrada
"	- Polegadas
A	- Ampere
cm	- Centímetros
cv	- Cavalo vapor
dB	- Decibel
g	- Gramas
Hz	- Hertz
kg	- Quilograma
kgf cm	- Quilograma-força centímetro
km h <sup>-1</sup>	- Quilômetro por hora
kN	- Quilonewton
kPa	- Quilopascal
kW	- Quilowatts
L	- Litros
m s <sup>-1</sup>	- Metros por segundo
m	- Metros
M6	- Diâmetro da rosca do parafuso equivalente a 6 mm
MHz	- Megahertz
mm	- Milímetros
MPa	- Megapascal
°C	- Grau Celsius
psi	- Libra Força por Polegada Quadrada
R <sup>2</sup>	- Coeficiente de determinação
rpm	- Rotações por minuto
V	- Volts

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
2.1	EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO .....	19
2.1.1	Desenvolvimento e construção do perfilômetro eletrônico .....	19
2.1.1.1	Estrutura .....	19
2.1.1.2	Acionamento elétrico .....	20
2.1.1.3	Sensor de leitura.....	22
2.1.1.4	Sistema de aquisição de dados .....	23
2.1.2	Desenvolvimento e construção do perfilômetro convencional .....	24
2.1.2.1	Estrutura .....	25
2.1.2.2	Sistema de leitura .....	25
2.1.3	Avaliação e calibração do perfilômetro eletrônico .....	26
2.1.4	Parâmetros analisados no estudo da perfilometria .....	28
2.1.5	Delineamento experimental e análises estatísticas .....	30
2.2	EXPERIMENTO EM CAMPO .....	31
2.2.1	Localização da área experimental .....	31
2.2.2	Caracterização da área experimental.....	32
2.2.2.1	Textura .....	32
2.2.2.2	Resistência do solo a penetração .....	32
2.2.2.3	Densidade do solo e umidade volumétrica .....	34
2.2.2.4	Análises físicas do solo .....	35
2.2.3	Preparo da área experimental .....	36
2.2.3.1	Descrição dos equipamentos utilizados .....	36
2.2.3.2	Avaliação da perfilometria e preparo do solo .....	50
2.2.5	Delineamento experimental e análises estatísticas .....	55
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>57</b>
3.1	LABORATÓRIO .....	57
3.2	CAMPO .....	58
3.2.1	Perfilometria do solo.....	58
3.2.2	Demanda energética na operação de preparo do solo .....	60
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>66</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE 1 – MONITORAMENTO DO TEOR DE ÁGUA DO SOLO .....</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em virtude dos impedimentos físicos, químicos e/ou biológicos no solo, na agricultura contemporânea, diversos produtores têm adotado o preparo profundo do solo como alternativa benéfica para corrigir adversidades químicas e físicas, dentre estas a compactação do solo em camadas mais profundas, que não são corrigidas no preparo convencional (FENG et al., 2020).

Para correção de problemas de ordem química, busca-se aumentar a incorporação adequada de corretivos em maiores profundidades no solo, a fim de reduzir o alumínio trocável e elevar a disponibilidade de cálcio, favorecendo, assim, o desenvolvimento das raízes (ISSAKA et al., 2019). Logo, com o sistema radicular mais profundo e a conseqüente melhora da infiltração de água no solo devido ao modo de preparo adotado, é possível obter maiores níveis de produtividade e longevidade das lavouras de cana-de-açúcar, além do aumento no número de cortes no canavial, conforme Scarpate et al. (2019).

O preparo convencional se inicia com as operações de aração e gradagem leve, resultando no revolvimento superficial do solo, e quando este apresenta camada compactada, realiza-se o rompimento por meio de subsolagem (SUN et al., 2018). De acordo com Schneider et al. (2017), a profundidade de trabalho neste tipo de preparo é de aproximadamente 0,20 m.

Visando-se reduzir a compactação do solo em camadas mais profundas e permitir maior desenvolvimento radicular da cultura, emprega-se o preparo profundo do solo, por meio da substituição da subsolagem e aração por gradagem pesada, o que resulta em uma profundidade de revolvimento do solo de até 0,30 m (KOGUT et al., 2016).

A velocidade operacional está diretamente relacionada com a profundidade do solo revolvido e o consumo de combustível da operação (MARTINS et al., 2020; QUEIROZ et al., 2017). No estudo realizado por Pequeno et al. (2012), ao analisarem o desempenho operacional da gradagem leve em diferentes velocidades, foi constatado que o aumento deste parâmetro reduziu a profundidade de trabalho da grade, pelo efeito de flutuação, ou seja, menores velocidades de deslocamento favorecem profundidades superiores no preparo do solo com grades leves.

O comportamento da velocidade operacional para a operação de gradagem pesada é pouco estudada, visto que esta grade se diferencia quanto a leve pelo

número de discos, espaçamento e diâmetro destes. A massa por disco é uma característica diferencial entre as grades, que pode contribuir para que o aumento da velocidade operacional na gradagem pesada, não interfira na profundidade de preparo do solo. Segundo Stolf (1986), a variação de quilogramas por disco para as grades leve e pesada são de 20 a 60 e 150 a 250, respectivamente.

O monitoramento da qualidade do preparo do solo pode ser realizado através do estudo da perfilometria, que mensura a área transversal mobilizada, empolamento, espessura média da camada, rugosidade do solo e índice de modificação da rugosidade (BÖGEL et al., 2016).

O empolamento consiste na expansão volumétrica do solo com a redução da densidade, além de representar a relação entre as áreas elevada e mobilizada. A rugosidade superficial compreende a variação espacial na elevação da superfície, podendo atuar em processos de infiltração e escoamento (HE et al., 2018).

O índice de modificação da rugosidade expressa, em termos percentuais, a mudança entre a rugosidade inicial e a rugosidade final, após o preparo do solo, ou seja, é a rugosidade resultante da ação dos equipamentos em relação ao estado natural em que o solo se encontrava (BAUER et al., 2015). Por conseguinte, solos mais rugosos podem se tornar mais uniformes após a ação de certos equipamentos, bem como solos com superfície mais plana tornarem-se mais rugosos. Os parâmetros operacionais que podem influenciar são o tipo de implemento, velocidade e profundidade, conforme Ahmadi (2018).

Os dispositivos comuns para medição da seção transversal de superfície variam de equipamentos mecânicos de contato como perfilômetro de hastes tradicionais, ou de barra corrediça, e ópticas incluindo *laser* e câmeras digitais (MARTINEZ-AGUIRRE et al., 2016; GILLIOT et al., 2017).

Os perfilômetros de estimativas bidimensionais, são classificados nos métodos tradicional e eletrônico. O primeiro apresenta estrutura rudimentar e sistema de leitura manual, por meio de hastes paralelas em seção a superfície do solo. O segundo possui recursos estruturais de barras corrediças, que permite o movimento linear de um sistema eletrônico para leitura da seção transversal do solo, com aquisição de dados automatizados (THOMSEN et al., 2015).

A automação amostral de processos é cada vez mais empregada na agricultura para auxiliar na tomada de decisão, minimizando a ocorrência de falhas nos processos e promovendo tomadas de decisões assertivas (TIAN et al., 2020).

Esta ferramenta traz consigo inúmeros benefícios que podem ser adotados na perfilometria do solo, com destaque para execução de processos em ciclos contínuos que permitem homogeneidade no desempenho e viabilidade da operação.

Laskoski et al. (2017), com o objetivo de desenvolver, construir e validar um perfilômetro a *laser* a fim de mensurar as áreas mobilizada e elevada do solo, espessura média da camada mobilizada e o empolamento após o preparo do solo, observaram que as variáveis de mensuração não apresentaram significância estatística quando comparados aos parâmetros coletados pelos perfilômetros tradicional e desenvolvido. Entretanto, o perfilômetro desenvolvido apresentou desempenho superior na coleta, aquisição e armazenamento de dados, além de não modificar a estrutura do perfil analisado por se tratar de um método sem contato.

Borges et al. (2019) analisaram métodos de avaliação do perfil mobilizado do solo através de perfilômetro automatizado de barra corrediça, em operação de aração e gradagem, e dois perfilômetros de barra (1000 e 2500 mm de comprimento). Constatou-se a indicação da tomada de 200 pontos por parcela, quando utilizado perfilômetro de 2500 mm de comprimento, para estudo do perfil do solo e determinação de parâmetros relacionados a essa característica.

Polyakov e Nearing (2019) desenvolveram um perfilômetro a *laser* automatizado, como alternativa para sistemas de maior custo e complexidade. Averiguou-se um bom desempenho sob várias condições, quando comparado ao sistema *Lidar* (Light detection and ranging), que apresentou resultados de rugosidade superestimados.

Atualmente, é utilizado o método tradicional na perfilometria, o qual é oneroso em mão-de-obra e tempo, além de resultar num pós-processamento de dados elevado, o que sugere a necessidade da modernização deste método, por meio da eletrônica e automação. À vista disso, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de aquisição de dados automático para processos de perfilometria e comparar com o método tradicional, além de analisar quatro velocidades alvos da operação de preparo do solo como teste de verificação.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

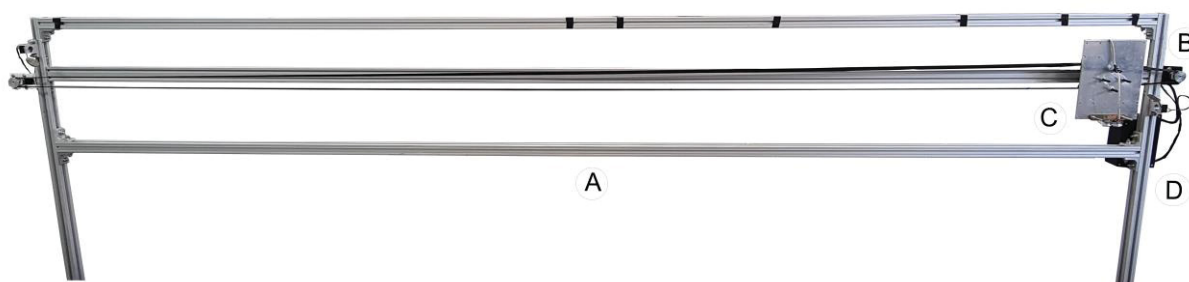
### 2.1 EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO

A execução do experimento ocorreu no Departamento de Solos e Engenharia Agrícola (DSEA), aliada à estrutura física e de recursos humanos do Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas (LATA), pertencente a Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Brasil.

#### 2.1.1 Desenvolvimento e construção do perfilômetro eletrônico

A (FIGURA 1) apresenta o perfilômetro eletrônico desenvolvido no referido laboratório, que possui: estrutura (A), acionamento elétrico (B), sensor de leitura (C) e sistema de aquisição de dados (D).

FIGURA 1 - PERFILÔMETRO ELETRÔNICO

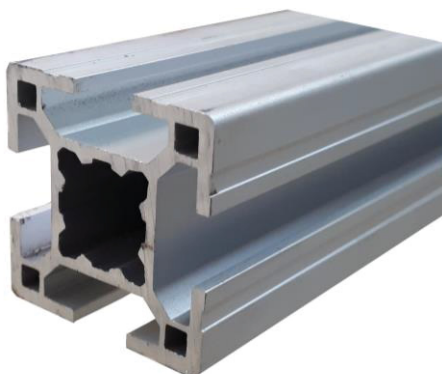


FONTE: O autor (2021).

##### 2.1.1.1 Estrutura

O corpo estrutural retangular possui dimensões de 3000 x 1000 mm e foi projetado utilizando-se perfis de alumínio anodizado modelo *Bosch* (FIGURA 2). Tal modelo possui dimensões de 30 x 30 mm e massa de 0,787 kg m<sup>-1</sup>, tendo sido utilizado também para a função de chassi. Nas extremidades foram posicionados os suportes para um motor de passo e transmissão por polias.

FIGURA 2 - PERFIL BOSCH



FONTE: Forseti (2021).

Para o sistema de deslocamento linear transversal foi utilizado um guia ajustável com roldanas acoplado à um perfil do tipo *V-slot* (FIGURA 3) de dimensões 20 x 40 mm, onde foi fixada uma placa porta ferramenta (150 x 200 mm) responsável pelo suporte do sensor de leitura. Estes perfis foram interligados por conectores tipo *corner* e *makerlink* L 90, com parafusos T (M6) e seus componentes auxiliares.

FIGURA 3 - PERFIL V-SLOT



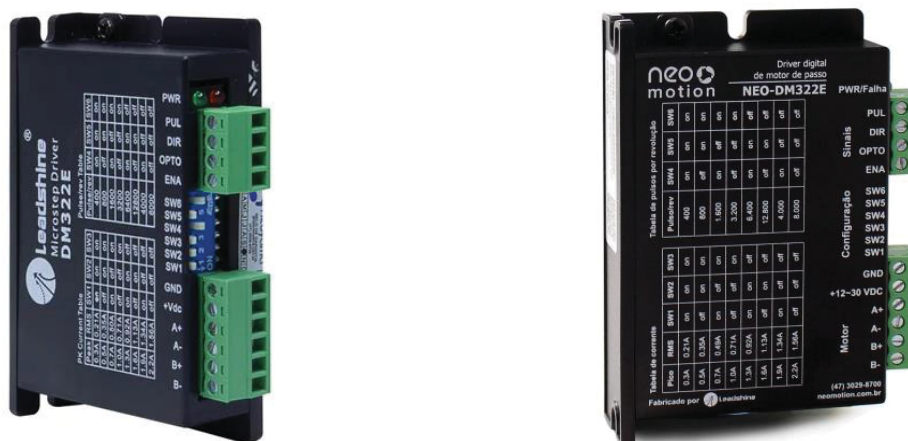
FONTE: Forseti (2021).

#### 2.1.1.2 Acionamento elétrico

O controle eletrônico através de um *driver* permitiu o ajuste preciso de corrente para o motor de passo, que por sua vez acionou o eixo da transmissão simétrica de polia e correia dentada, proporcionando a tração do conjunto guia de roldanas e da placa porta ferramenta.

Utilizou-se o *driver* de alta performance modelo NEO-DM322E fabricado pela Leadshine®. Este modelo é indicado na (FIGURA 4) e apresenta oito resoluções de micro passos que podem alcançar 12800 pulsos por revolução, além de operar em correntes de picos entre 0,3 e 2,2 A na tensão de 12 V.

FIGURA 4 - DRIVER DE ALTA PERFORMANCE



FONTE: Leadshine (2021).

A (FIGURA 5) apresenta o motor de passo empregado na movimentação linear, responsável por transportar o sensor de leitura ao longo da linha de varredura. Trata-se de um modelo NEMA 17 (Leadshine®) do tipo híbrido, que pode ser usado tanto no modo unipolar como bipolar. Possui ângulo de rotação de 1,8° (200 passos/revolução), acurácia de 0,09°, 1,5 A com 4,5 V em cada fase e torque de 8,0 kgf cm.

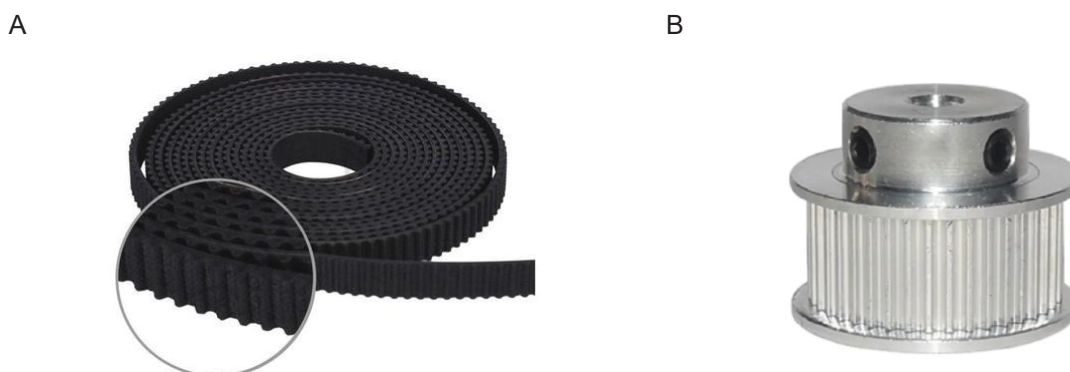
FIGURA 5 - MOTOR DE PASSO



FONTE: Leadshine (2021).

A transferência de força de tração para o deslocamento do conjunto de leitura (FIGURA 6), ocorreu por meio de correia dentada, modelo GT2 (SLA<sup>®</sup>), com largura de 10 mm, passo de 2 mm e comprimento de 6000 mm. Conectado ao eixo do motor utilizou-se a polia GT2 (Inbearing<sup>®</sup>), que possui diâmetro externo de 28 mm, largura do berço de 10 mm e 40 dentes internos, respectivamente.

FIGURA 6 - CORREIA DENTADA (A) E POLIA (B)



FONTE: O autor (2021).

### 2.1.1.3 Sensor de leitura

As leituras foram realizadas utilizando um sensor de varredura tridimensional por triangulação a *laser*, que por meio do método de emissão de luz em uma determinada superfície, permite detectar a localização do feixe emitido com o auxílio de uma câmera interna.

O sensor óptico a *laser* (FIGURA 7) para medir o perfil perpendicularmente a superfície do solo foi o modelo ODS 96M/V – 5010 – 600 - 421 (Leuze Electronic Germany<sup>®</sup>), com faixa de leitura 100 a 600 mm, resolução 0,5 mm, acurácia  $\pm 2\%$ , repetibilidade  $\pm 0,5\%$ , tempo de resposta 50 ms e tensão de alimentação 18 a 30 V.

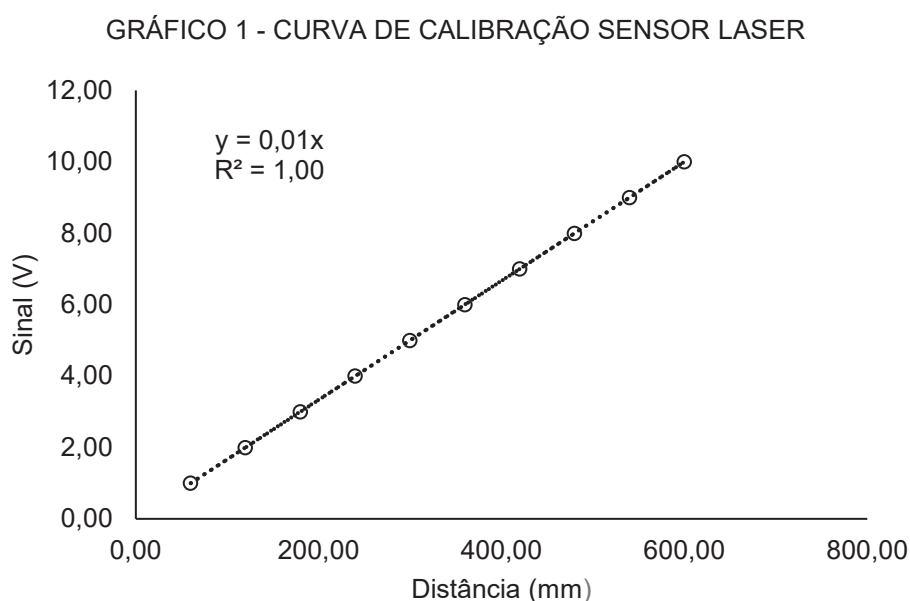
FIGURA 7 - SENSOR ÓPTICO LASER



FONTE: Leuze Electronic (2021).

Com intuito de calibrar o sensor, foi encontrada uma relação entre a distância e tensão de entrada no sistema de aquisição de dados através da equação de calibração obtida.

Foram levantados dez dados de distância pelo sensor e valores de deslocamento medidos em uma trena de precisão. Os pares de dados obtidos (Volts x mm) foram analisados através de regressão linear ( $R^2 = 1$ ) para obtenção da equação que gerou o fator multiplicador na programação. O (GRÁFICO 1) apresenta a variação de distância em função do sinal de saída do sensor.

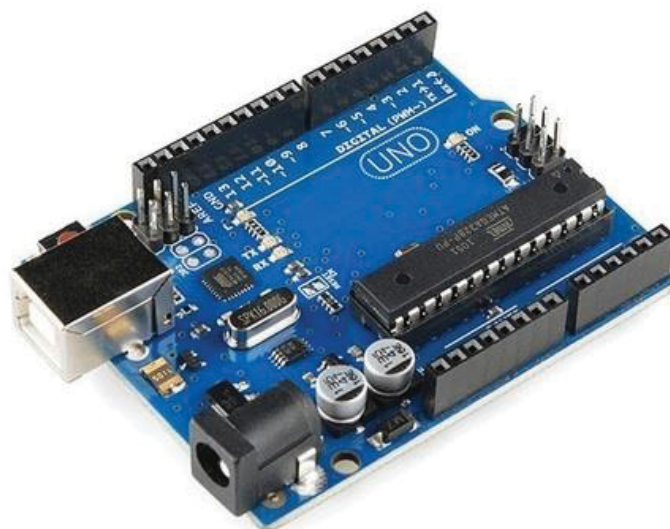


FONTE: O autor (2021).

#### 2.1.1.4 Sistema de aquisição de dados

O perfilômetro dispõe de um sistema de aquisição de dados (SAD), implementado em um microcomputador modelo AT mega 328 (Atmel®), ilustrado na (FIGURA 8). 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 (ARDUINO, 2021). A frequência de aquisição de 1 Hz foi atrelada a leitura do perfil de solo, mensurada por sensor ligado ao SAD. Os dados foram transferidos para planilhas (Microsoft Excel®) e armazenados em disco rígido (JASPER et al., 2016).

FIGURA 8 - MICROCOMPUTADOR



FONTE: Atmel (2021).

Para a coleta e visualização dos dados foi criado uma programação em linguagem Arduino, considerando funções de interação de parâmetros operacionais do *hardware* como pulsos e *delay*, além de controle do sentido e distância de deslocamento do sensor de leitura.

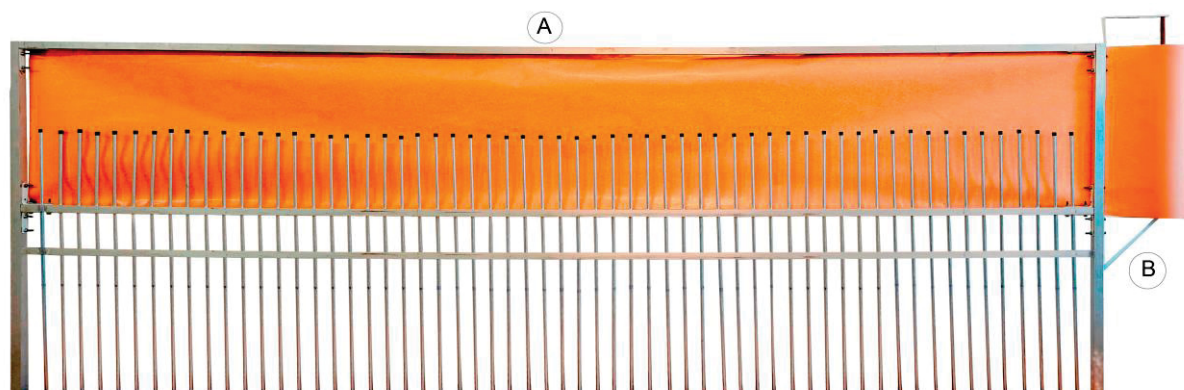
Os pulsos inseridos na programação são reconhecidos pelo *software* do *driver*, o qual transforma e envia os sinais para o chaveamento dos componentes de potência, fornecendo corrente necessária a unidade motora. A relação de pulsos foi obtida por meio de cálculos considerando o sistema motor-transmissão e rendimento da operação, resultando em 51 pulsos por 10 mm deslocado transversalmente, que correspondem a velocidade de  $0,14 \text{ m s}^{-1}$  ( $0,50 \text{ km h}^{-1}$ ).

Durante as leituras foram determinados intervalos de tempo para emissão e recepção de luz pelo sensor a *laser*, denominado *delay*, parâmetro este responsável por controlar os ciclos de pulsos em alta e baixa (*Time-on* e *Time-off*). A partir de informações coletadas foi selecionado o valor de 700 ms.

### 2.1.2 Desenvolvimento e construção do perfilômetro convencional

O perfilômetro convencional, (FIGURA 9), desenvolvido no referido laboratório, apresenta os seguintes componentes: estrutura (A) e sistema de leitura (B).

FIGURA 9 - PERFILÔMETRO CONVENCIONAL



FONTE: O autor (2021).

### 2.1.2.1 Estrutura

A estrutura retangular com dimensões de 3000 x 1500 mm, foi projetada utilizando-se perfis de alumínio, modelo *Square pipe* (FIGURA 10), com dimensões de 25 x 25 mm e massa de  $0,387 \text{ kg m}^{-1}$ . Nas extremidades verticais foram posicionados trilhos condutores para o deslocamento do papel de leitura, este armazenado em bobina no lado direito superior da estrutura.

FIGURA 10 - PERFIL SQUARE PIPE



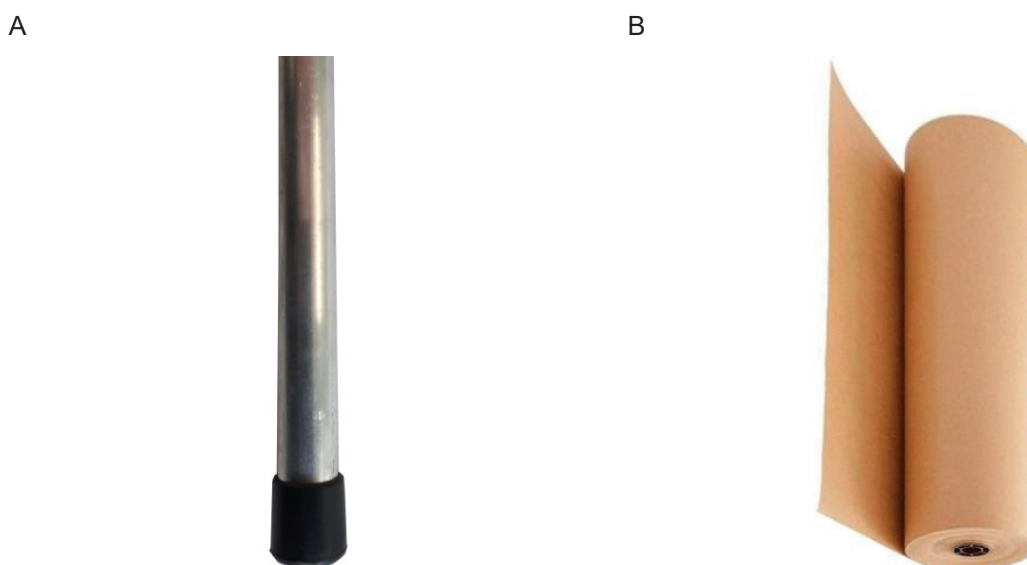
FONTE: O autor (2021).

### 2.1.2.2 Sistema de leitura

O mecanismo de leitura (FIGURA 11) por meio de hastes de alumínio (diâmetro 95,3 mm x espessura 1,0 mm x comprimento 1000 mm) com densidade  $2,7 \text{ g cm}^{-3}$  e tampão plástico nas extremidades (selecionado para minimizar o efeito

negativo do seu aprofundamento no solo), espaçadas 50 mm e distribuídas ao longo de uma linha no suporte do perfilômetro, permitiu o levantamento de cotas do perfil. Uma bobina de papel (0,6 x 140 m) foi fixada no eixo móvel, fornecendo o quadro para marcação dos pontos referentes as cotas para cada repetição. Após o levantamento do perfil, os valores de cotas foram ditados para planilhas de aquisição (Microsoft Excel®).

FIGURA 11 - HASTE METÁLICA (A) E BOBINA DE PAPEL (B)



FONTE: O autor (2021).

### 2.1.3 Avaliação e calibração do perfilômetro eletrônico

As avaliações de perfilometria do solo ocorreram em vaso pré-moldado, com capacidade nominal de 170 L, no qual foram estabelecidos três perfis: mobilizado, não mobilizado e de corte. A umidade gravimétrica do solo no momento do ensaio foi de  $0,22 \text{ kg kg}^{-1}$ , representada por quatro amostras retiradas na profundidade a ser mobilizada.

Na obtenção do índice de rugosidade e do perfil mobilizado do solo, que permite calcular a Área mobilizada, a Área de elevação e o Empolamento do solo, utilizou-se os perfilômetros eletrônico e convencional, com largura útil de 2800 mm, com pontos de leitura a cada 50 mm. Quando utilizado o perfilômetro eletrônico foi necessário cobrir a superfície do solo com papel de baixa densidade e coloração branca, a fim de aumentar a remissão ( $> 90\%$ ) de leitura do sensor. Ambos

perfilômetros foram instalados sobre uma base previamente nivelada, montada na direção transversal a área do perfil, conforme Allmaras et al. (1966).

Assim, foram realizadas as leituras do perfil do solo antes dos preparos simulados, obtendo-se o perfil natural (não mobilizado), e após o preparo do solo, para obtenção do perfil da superfície do solo após mobilizado e o perfil interno do solo mobilizado, denominados, respectivamente, de perfil de elevação e perfil de corte (FIGURA 12) e (FIGURA 13), conforme metodologia proposta por Carvalho Filho et al. (2007).

FIGURA 12 - CALIBRAÇÃO DO PERFILÔMETRO

---

Perfil não mobilizado

---

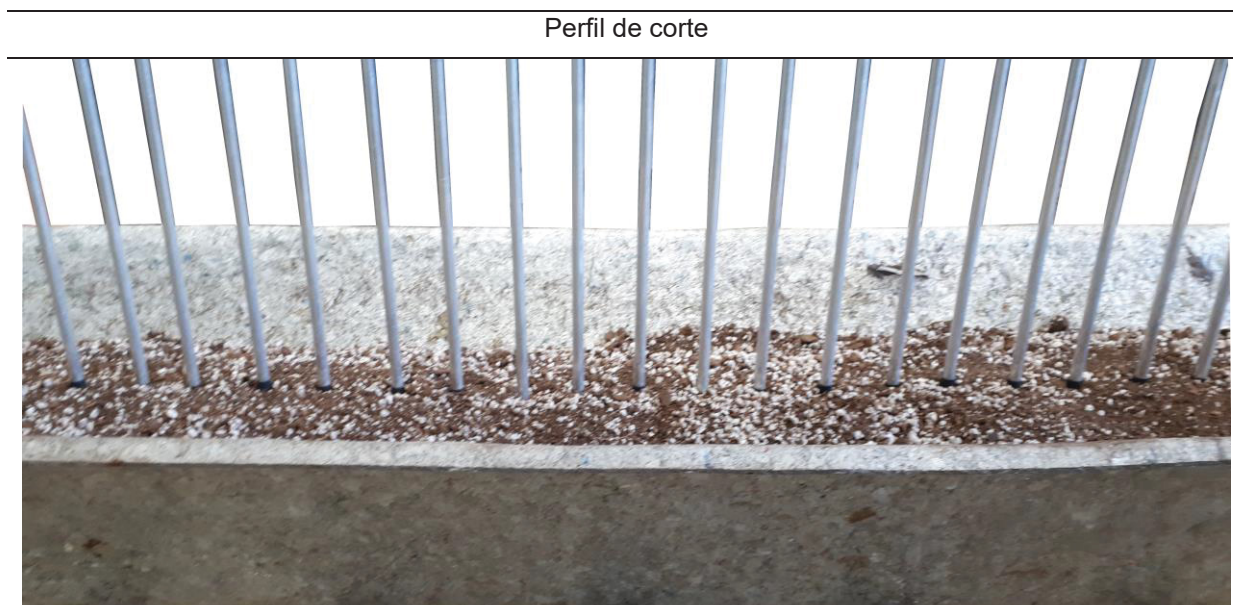


---

Perfil mobilizado

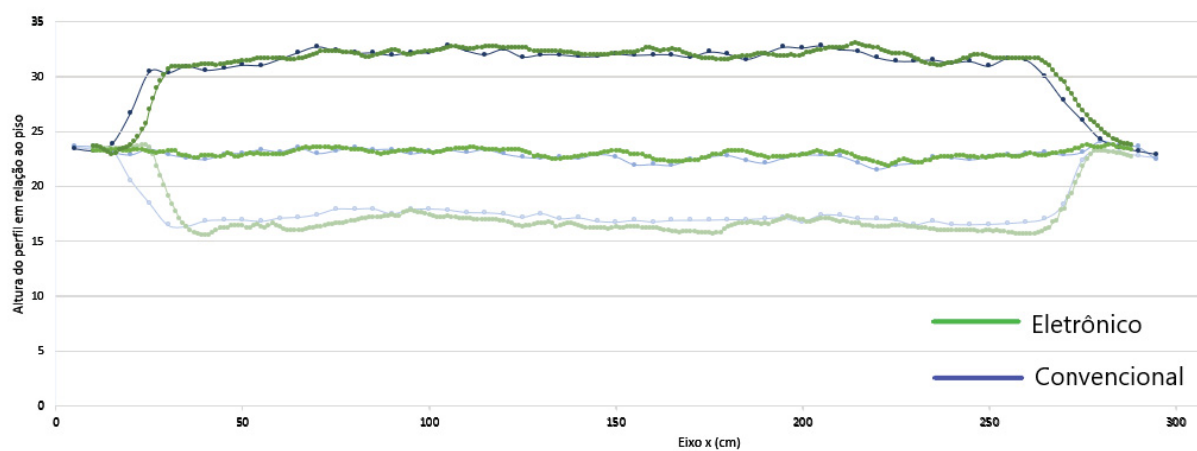
---





FONTE: O autor (2021).

FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO DOS PERFIS REFERENCIAIS (PERFILÔMETRO CONVENCIONAL X PERFILÔMETRO ELETRÔNICO)



FONTE: O autor (2021).

#### 2.1.4 Parâmetros analisados no estudo da perfilometria

Os cálculos da área de elevação e da área mobilizada foram obtidos por meio da Regra de Simpson (EQUAÇÃO 1), conforme Moheuddin et al. (2019).

$$\int_{X_0}^{X_n} dx = \frac{h}{3} (f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + 2f_4 + \dots + 2f_{n-2} + 4f_{n-1} + f_n) \quad (1)$$

em que,

$$h = \frac{X_n - X_o}{n}, X_n > X_o$$

Sendo,

- n – número de intervalos;
- f – altura das cotas, mm;
- h – distância entre cotas, cm, e
- X – número de cotas.

O índice de rugosidade superficial (EQUAÇÃO 2) representada pelo desvio-padrão entre os logaritmos naturais das leituras das elevações, pela altura média das elevações (ALLMARAS et al., 1966).

$$\sigma_y = \sigma_x h_m \quad (2)$$

em que,

- $\sigma_y$  - estimativa do índice de rugosidade representada pelo desvio-padrão entre as alturas, mm;
- $\sigma_x$  - desvio-padrão entre os logaritmos naturais das alturas, e
- $h_m$  - média das alturas, mm.

A área de solo mobilizada consiste na área situada entre o perfil não mobilizado e o perfil de corte, enquanto a área de elevação é aquela situada entre o perfil não mobilizado e o perfil da superfície do solo após a mobilização, conforme descrito por Gamero e Benez (1990).

Obtidos os dados do perfil do solo mobilizado, a espessura média foi calculada por meio da (EQUAÇÃO 3).

$$E_c = \frac{A_m}{C_p} \quad (3)$$

em que,

- $E_c$  – espessura média da camada mobilizada, m;
- $A_m$  – área mobilizada do solo, m<sup>2</sup>, e
- $C_p$  – comprimento do perfilômetro m.

O empolamento do solo (EQUAÇÃO 4) foi determinado pela razão entre a área de elevação e a área mobilizada pelos órgãos ativos do equipamento, segundo Gamero e Benez (1990).

$$Em = \frac{A_e}{A_m} \quad (4)$$

em que,

Em – empolamento, %;

Ae – área de elevação, m<sup>2</sup>, e

Am – área mobilizada, m<sup>2</sup>.

A modificação da rugosidade do solo (EQUAÇÃO 5) foi obtida considerando-se a diferença entre os índices de rugosidade medidos após e antes do preparo, em relação ao índice de rugosidade antes do preparo do solo, expressa em percentagem, conforme Santos (1993).

$$MR = \frac{IR_f - IR_i}{IR_i} 100 \quad (5)$$

em que,

MR – modificação da rugosidade, %;

IRf – índice de rugosidade após o preparo do solo, e

IRi – índice de rugosidade antes do preparo do solo.

#### 2.1.5 Delineamento experimental e análises estatísticas

O experimento foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado, avaliando-se dois perfilômetros (convencional e eletrônico) e cinco parâmetros de perfilometria (Rugosidade modificada, Área elevada, Área mobilizada, Empolamento e Espessura), com sete repetições.

Os dados coletados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade da variância (Levene), atendendo essas premissas foram aplicados à análise de variância para verificar os efeitos de significância, por meio do programa estatístico Sigmaplot 12 (Systat Software®). Quando o teste F apresentou

valor significativo ( $p \leq 0,05$ ) de probabilidade, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

## 2.2 EXPERIMENTO EM CAMPO

### 2.2.1 Localização da área experimental

O experimento de campo foi desenvolvido na Fazenda Canguiri (FEC/UFPR) localizada em Pinhais-PR, em Área de Preservação Ambiental (APA), nas coordenadas centrais 7190620.00 de latitude e 688826.00 de longitude, Fuso 22J, Datum WGS 84.

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 14 e 15), apresenta declividade média no sentido de preparo de 1% e presença de cobertura vegetal (*Azevém - *Lolium multiflorum**). O solo é classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (SUGAMOSTO, 2002).

FIGURA 14 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 15 - ÁREA EXPERIMENTAL VISÃO HORIZONTAL



FONTE: O autor (2021).

## 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 e Bauder (1986).

### 2.2.2.2 Resistência do solo a penetração

A resistência do solo à penetração (RSP) foi avaliada por meio do penetrômetro de acionamento manual com registro eletrônico dos dados (FIGURA 16), modelo PLG 1020 (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°, e a velocidade de inserção da haste de 0,02 m s<sup>-1</sup>, seguindo o estabelecido pela norma S313.3 (ASABE, 2012).

FIGURA 16 - COLETA COM PENETRÔMETRO



FONTE: O autor (2021).

Foram realizadas com este equipamento cinco leituras para cada um dos tratamentos ao longo da parcela experimental, totalizando 20 pontos, resultando na elaboração de curvas de RSP (0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade). As curvas de RSP foram analisadas estabelecendo-se o intervalo de confiança pelo teste t ( $p < 0,10$ ), calculados pela (EQUAÇÃO 6).

$$IC = \left| \frac{t \times dpa}{\sqrt{n}} \right| \quad (6)$$

em que,

IC – intervalo de confiança, MPa;

t – valor tabelado de t,  $p \leq 0,10$ ;

dpa – desvio-padrão, MPa, e

n – número de repetições.

### 2.2.2.3 Densidade do solo e umidade volumétrica

Foram coletadas amostras indeformadas de solo (FIGURA 17) com o uso de anéis volumétricos de volume conhecido (100 cm<sup>3</sup>), nas profundidades 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 PVC, e levados ao laboratório.

FIGURA 17 - COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLO PARA DENSIDADE



FONTE: O autor (2021).

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 7) e (EQUAÇÃO 8) conforme metodologia de Embrapa (2017).

$$D_s = \left( \frac{m_a}{V} \right) \quad (7)$$

em que,

$D_s$  – densidade do solo, g cm<sup>-3</sup>;

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

$V$  – volume do cilindro, cm<sup>3</sup>.

$$U_v = \left( \frac{a - b}{c} \right) \quad (8)$$

em que,

$U_v$  – umidade volumétrica,  $g\ g^{-1}$ ;

$a$  – massa da amostra úmida, g;

$b$  – massa da amostra seca a  $105^\circ C$  até atingir peso constante, g, e

$c$  – volume da amostra,  $cm^3$ .

A determinação da consistência do solo quanto à mudança do estado líquido para o plástico (limite de liquidez) seguiu a metodologia dos 25 golpes. Para o limite de plasticidade que corresponde a consistência do solo referente à transição do estado plástico para o semi-sólido, foi utilizada a metodologia proposta pela Embrapa (1997). A diferença entre os valores indica o índice de plasticidade do solo.

#### 2.2.2.4 Análises físicas do solo

Na (TABELA 1) constam os valores médios das características físicas, RSP e teor de água do solo na área experimental.

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DO SOLO. TEXTURA, RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RSP), DENSIDADE DO SOLO ( $D_s$ ), UMIDADE VOLUMÉTRICA ( $U_v$ ), LIMITE DE LIQUIDEZ (LL), LIMITE DE PLASTICIDADE (LP) E ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)

Análises	Valores
Textura do solo* ( $g\ kg^{-1}$ )	
Areia	234
Silte	98
Argila	668
RSP (MPa)	
0,0 - 0,10 m	0,90
0,10 - 0,20 m	2,87
0,20 – 0,30 m	3,51
$D_s$ ( $g\ cm^{-3}$ )	
0,0 - 0,10 m	1,25
0,10 - 0,20 m	1,34
0,20 – 0,30 m	1,29
$U_v$ ( $g\ g^{-1}$ )	
0,0 - 0,10 m	30,09
0,10 - 0,20 m	30,26
0,20 – 0,30 m	30,48
LL ( $g\ g^{-1}$ )	37,50
LP ( $g\ g^{-1}$ )	29,17
IP ( $g\ g^{-1}$ )	8,40

\*Classe de textura correspondente – Muito Argilosa (BRASIL, 2015). Fonte: O autor (2021).

## 2.2.3 Preparo da área experimental

### 2.2.3.1 Descrição dos equipamentos utilizados

As faixas de solo mobilizado para avaliação da perfilometria foram preparadas com a grade pesada (FIGURA 18), modelo SGAC 14C (Civemasa®), com 14 discos recortados de 30 polegadas de diâmetro, espaçados em 360 mm, largura de trabalho de 2340 mm e massa total de 3.150 kg.

FIGURA 18 - GRADE PESADA



FONTE: O autor (2021).

O implemento foi acoplado a barra de tração do trator New Holland®, modelo T7 260, com potência nominal (ISO TR 14396, 2011) de 172 kW (234 cv), transmissão Full Powershift® 18 x 6, 495 horas de uso, e dimensionado de acordo com a norma ASABE D496.3 (2011), conforme a (FIGURA 19).

FIGURA 19 - TRATOR AGRÍCOLA



FONTE: O autor (2021).

O trator foi montado com pneus simples na dianteira, modelo 600/65R28 Pirelli® *Ecoimpact* com pressão de 68,95 kPa (10 psi); e na traseira duplos 520/85R42 Firestone® *Deeptread* com as pressões de 62,05 kPa (9 psi), internos e externos, proporcionando índice de avanço de 1,60%. As velocidades alvo foram próximas as recomendadas para operação de gradagem (MARTINS et al., 2018), com regime de rotação do motor correspondente a 2200 rpm e marchas F7, F8, F9 e F10 resultando nas velocidades alvo de 5,7, 6,8, 8,2 e 9,8 km h<sup>-1</sup>, respectivamente.

As massas estáticas sobre os eixos do trator foram determinadas com balança (Celmig®) CM-1002, composta por quatro sapatas. Foram adicionados 40% de lastro hidráulico nos rodados do eixo dianteiro e 25% de lastro hidráulico nos rodados do eixo traseiro, e com o lastro metálico, utilizando-se de pesos frontais inferiores (pescoço de 450 kg) e verticais (10 placas de 45 kg) na dianteira e, na traseira, oito anéis de 227 kg, resultando 12.300 kg de massa total, distribuída em torno de 35% no eixo dianteiro e 65% no eixo traseiro (SCHLOSSER et al., 2005; SCHLOSSER et al., 2020a), conforme a (FIGURA 20).

FIGURA 20 - MENSURAÇÃO DE MASSA ESTÁTICA DO TRATOR



FONTE: O autor (2021).

A relação entre massa e potência foi determinada considerando a potência útil do motor de acordo com a norma DIN 70020 (1986), que contabiliza os componentes (bomba injetora, *intercooler*, turbocompressor, filtro de ar, escapamento, bomba de água, radiador e ventilador), fazendo-se necessário a conversão da potência nominal (ISO TR 14396) para (DIN 70020), conforme a (TABELA 2).

TABELA 2 - FATORES DE CONVERSÃO ENTRE NORMAS

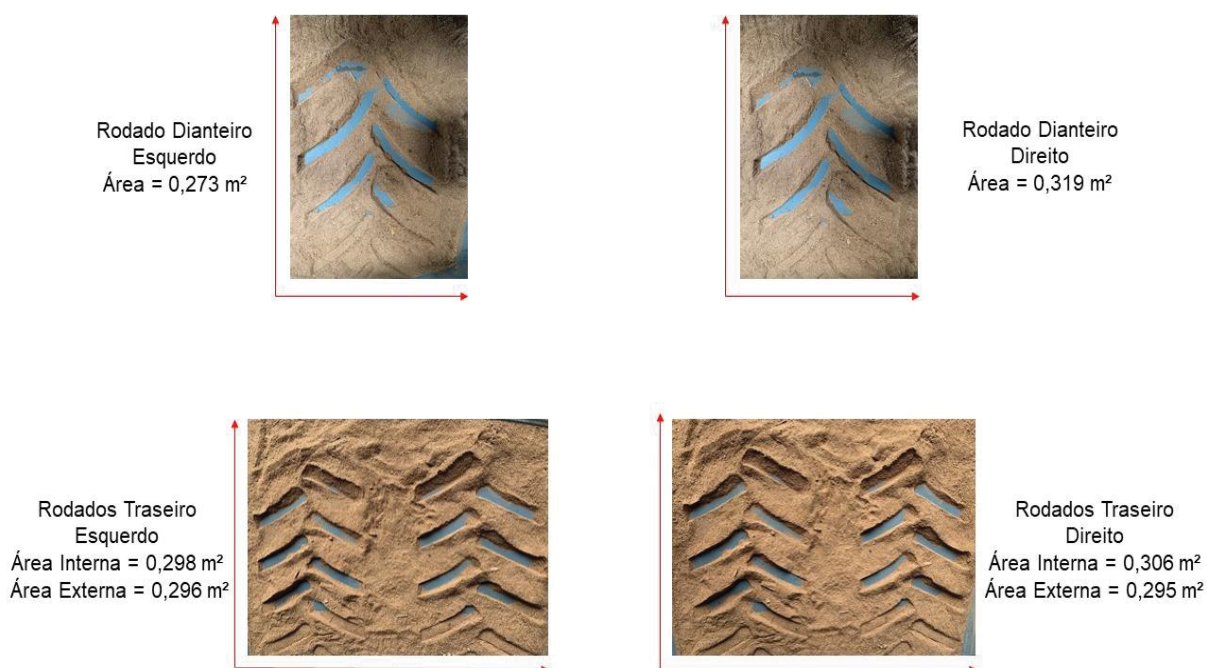
Normas	SAE J1995	ISO TR 14396	SAE J1349	ECE/R24	DIN 70020	ECE/80/1269	ECE/97/68
SAE J1995	1	0,964	0,937	0,937	0,901	0,892	0,964
ISO TR 14396	1,037	1	0,972	0,972	0,935	0,925	1
SAE J1349	1,067	1,029	1	1	0,962	0,952	1,029
ECE/R24	1,067	1,029	1	1	0,962	0,952	1,029
DIN 70020	1,110	1,070	1,040	1,040	1	0,990	1,070
ECE/80/1269	1,121	1,081	1,051	1,051	1,010	1	1,081
ECE/97/68	1,037	1	0,972	0,972	0,935	0,925	1

FONTE: Schlosser (2020b).

Desta forma, considerando a potência útil (DIN 70020) de 160,92 kW (218,79 cv) a relação entre massa e potência será de 76,43 kg kW<sup>-1</sup> (56 kg cv<sup>-1</sup>).

A área de contato (FIGURA 21) dos pneus com a superfície de apoio foram mensuradas, sendo um importante indicador da capacidade de distribuição de carga do pneu para com a superfície do solo. Cada rodado foi posicionado sobre a superfície de concreto plano e, a camada entre pneu/superfície foi preenchida com material granular volumoso (serragem) formando um molde. Deslocando-se o trator a frente, com auxílio de uma treina foi determinado o comprimento e largura da área do pneu radial com a superfície (L x L), totalizando seis rodados em três repetições.

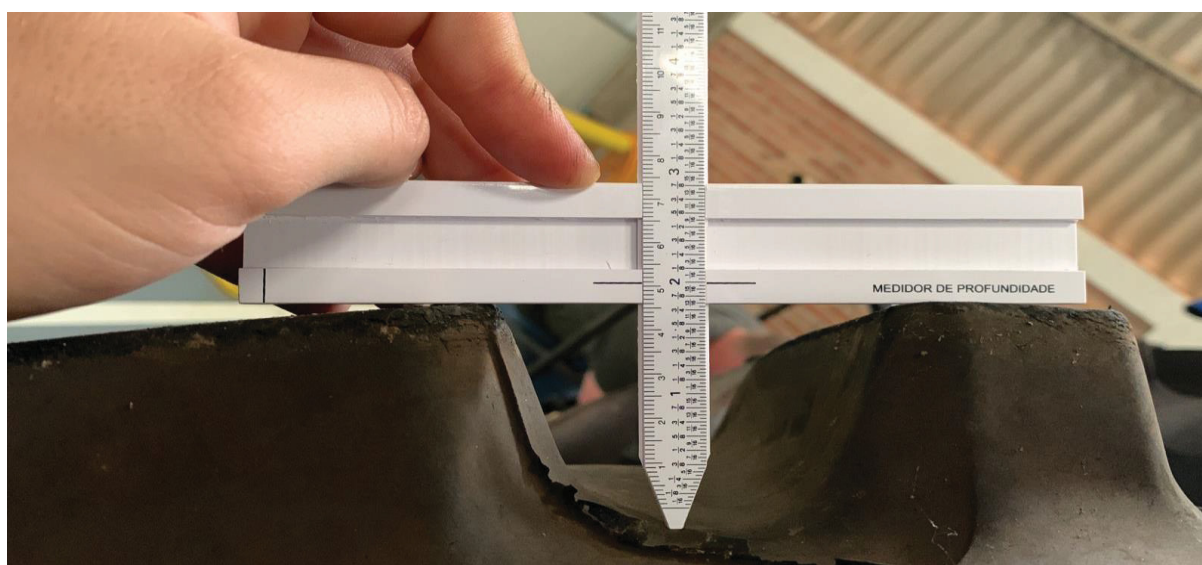
FIGURA 21 – ÁREA DE CONTATO DOS PNEUS COM A SUPERFÍCIE



FONTE: O autor (2021).

Ao se tratar de pneus usados, houve a necessidade de avaliar as alturas de garra (profundidade de escultura) conforme a norma ASAE S296.4 (1999), constatando que estes ainda apresentam valores que garantem um bom índice de tração. Utilizou-se um medidor manual (FIGURA 22) posicionado no lado interno do pneu, com referência a linha de centro.

FIGURA 22 - MENSURAÇÃO DA ALTURA DE GARRA DOS PNEUS



FONTE: O autor (2021).

Foram coletados 10 pontos de leitura em cada pneu, totalizando 60 dados altimétricos. A seguir, na (TABELA 3) estão caracterizadas as médias e desvio padrão da altura de garras para cada pneu.

TABELA 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ALTURA DE GARRAS DOS PNEUS

Rodados	Média de altura (cm)	Desvio-padrão
Dianteiro Esquerdo	4,772	0,052
Dianteiro Direito	4,782	0,021
Traseiro Esquerdo Externo	5,038	0,034
Traseiro Esquerdo Interno	5,013	0,036
Traseiro Direito Externo	5,055	0,059
Traseiro Direito Interno	5,016	0,052

FONTE: O autor (2021).

Visando avaliar os parâmetros de resistência específica operacional e demanda energética para o preparo do solo (FERNANDES et al., 2007), o trator foi instrumentado com um sistema de aquisição de dados (SAD), formado por placa de circuito impresso confeccionado em fresadora LPKF a um microcomputador Atmel® modelo aTmega 2560 (JASPER et al., 2016). O SAD versão 4.0 com comunicação sem fio composto pelos sensores descritos abaixo, possui frequência de aquisição dos dados de 1 Hz, transferidos a unidade de estado sólido (SSD) para posterior análise.

Para obtenção da velocidade operacional (VO) utilizou-se a antena de velocidade SVA 60 (Agrosystem®), no qual foi possível quantificar o deslocamento em função do número de pulsos emitidos, conforme a (FIGURA 23).

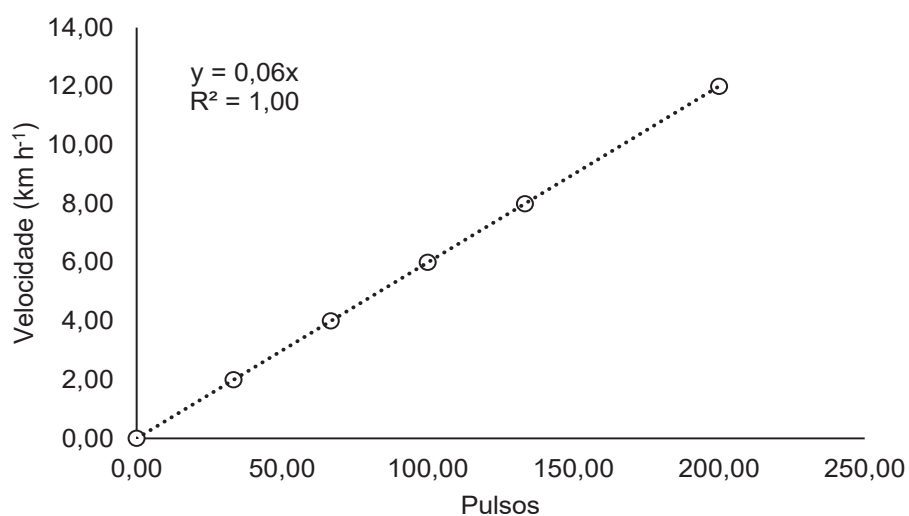
FIGURA 23 - ANTENA DE VELOCIDADE



FONTE: O autor (2021).

A antena de velocidade foi aferida com o trator deslocando-se em uma distância conhecida de 100 m, com tempo cronometrado em diferentes velocidades de deslocamento e registrando-se os pulsos emitidos, conforme o (GRÁFICO 2).

GRÁFICO 2 - FUNÇÃO DE AFERIÇÃO PARA ANTENA DE VELOCIDADE



FONTE: O autor (2021).

A força na barra de tração (FBT) foi mensurada a partir de célula de carga Bermann®, com capacidade de 196 kN (20 t), sensibilidade de  $2,0 + 0,002 \text{ Mv V}^{-1}$  e precisão 0,01 kN, instalada na barra de tração acoplada ao trator (FIGURA 24).

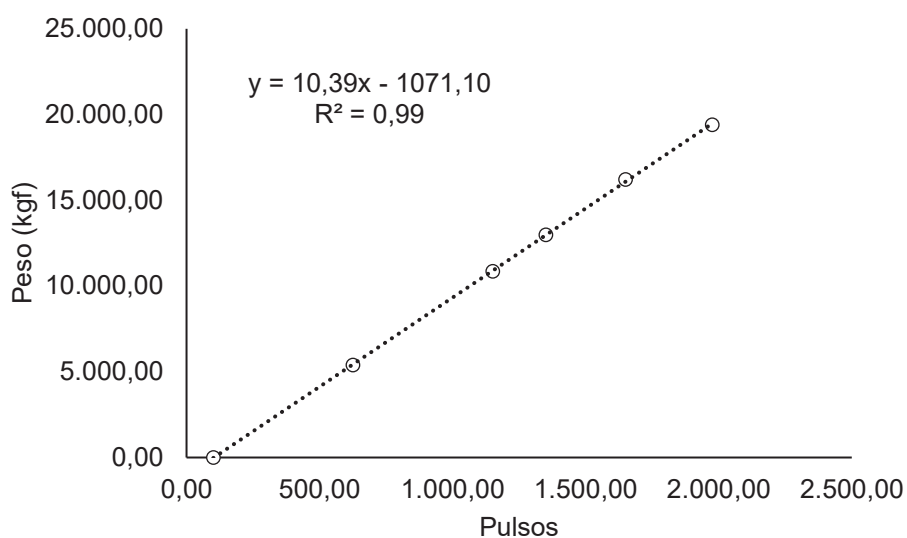
FIGURA 24 – CÉLULA DE CARGA ACOPLADA NA BARRA DE TRAÇÃO



FONTE: O autor (2021).

A célula de carga foi previamente aferida em laboratório com auxílio de uma prensa hidráulica (EMIC®) modelo PC200CS com capacidade de 2000 kN, obtendo-se assim a função para calibração, conforme o (GRÁFICO 3). Os sinais elétricos gerados pela célula de carga foram convertidos e armazenados no SAD.

GRÁFICO 3 - FUNÇÃO DE AFERIÇÃO PARA CÉLULA DE CARGA



FONTE: O autor (2021).

A potência disponível na barra de tração foi obtida em função da força e da velocidade, de acordo com a (EQUAÇÃO 9).

$$PBT = FBT \times VO \quad (9)$$

em que,

PBT – potência na barra, kW;

FBT – força na barra de tração, kN, e

VO – velocidade de deslocamento, m s<sup>-1</sup>.

A partir da potência disponível na barra de tração e no motor do trator, foi possível determinar o rendimento na barra de tração pela (EQUAÇÃO 10).

$$RBT = \left( \frac{PBT}{PM} \right) \times 100 \quad (10)$$

em que,

RBT – rendimento na barra de tração, %;

PBT – potência na barra de tração, kW, e

PM – potência do motor, kW.

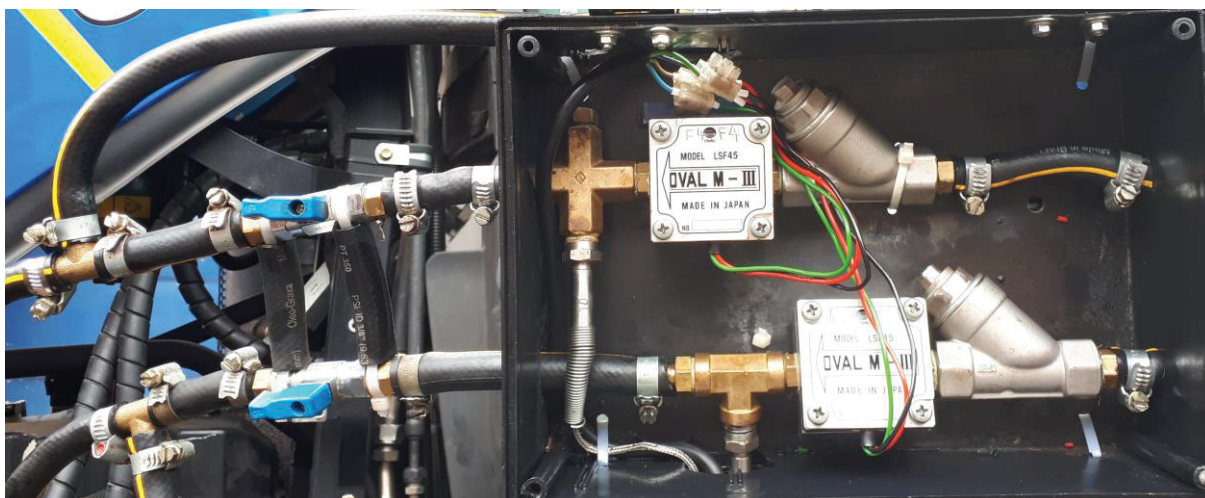
No sistema de alimentação de combustível (entrada e retorno), foram instalados dois fluxômetros modelo LSF 45L0-M2 (Flowmate OVAL MIII®), permitindo mensurar o consumo horário de combustível, conforme a (FIGURA 25).

FIGURA 25 – FLUXÔMETROS CENTRAL EXTERNA (A) E INTERNA (B)

A



B



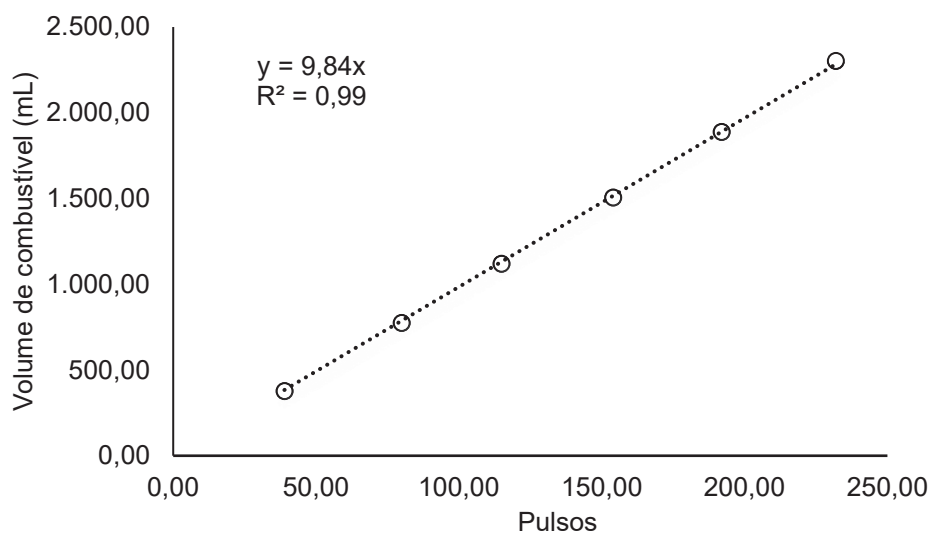
FONTE: O autor (2021).

A calibração dos fluxômetros foi realizada através da metodologia de aferição composta por: reservatório de 20 L, registro hidráulico, mangueiras de 1" e béquer graduado.

O reservatório contendo combustível (diesel S10) foi conectado à um registro de vazão, que através de uma mangueira ligada ao fluxômetro, o volume de diesel era contabilizado no béquer graduado (mL).

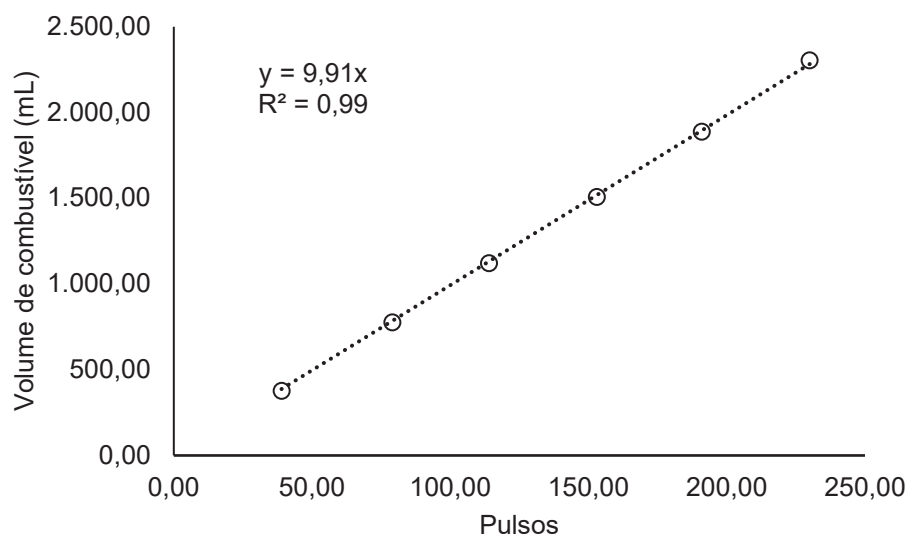
A aferição foi realizada individualmente para cada fluxômetro, com auxílio do SAD que converte os sinais emitidos pelo fluxômetro e, na forma de pulsos, transmitia para o computador. Com o resultado foi gerado funções matemáticas para o fluxômetro de entrada de combustível ao tanque (FEC) e outra para o fluxômetro de retorno do combustível ao tanque (FRC), conforme (GRÁFICO 4 e 5). A diferença do número de pulsos emitido pelos fluxômetros possibilita obter o consumo volumétrico de combustível, com precisão de 0,01 litros por pulso.

GRÁFICO 4 - FUNÇÃO DE AFERIÇÃO PARA O FLUXÔMETRO DE ENTRADA DE COMBUSTÍVEL AO TANQUE



FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 5 - FUNÇÃO DE AFERIÇÃO PARA O FLUXÔMETRO DE RETORNO DE COMBUSTÍVEL AO TANQUE



FONTE: O autor (2021).

A função de densidade do diesel S10 (EQUAÇÃO 11) utilizado no ensaio foi obtida em laboratório, seguindo-se a NBR 7148 de 11/2013, com densímetro para petróleo e seus derivados (Incoterm<sup>®</sup>, número de série 962/15), e termômetro (Incoterm<sup>®</sup> número de série 87863/13) com escala de 1°C código 5003. Com a

função de densidade foi possível calcular a densidade do diesel, de acordo com a temperatura de entrada do combustível em cada ensaio.

$$D = 844,14 - (0,53 \times T) \quad (11)$$

em que,

D – densidade do combustível diesel, g L<sup>-1</sup>;

T – temperatura do combustível diesel, °C, e

844,14 e 0,53 – parâmetros da regressão de densidade.

O consumo horário com base em massa foi determinado através da (EQUAÇÃO 12).

$$CHM = \left( \frac{CHC (844,14 - 0,53 \times T)}{1000} \right) \quad (12)$$

em que,

CHM – consumo horário de combustível com base em massa, g h<sup>-1</sup>;

CHC – consumo horário de combustível com base em volume, L h<sup>-1</sup>, e,

1000 – fator de conversão.

O consumo específico de combustível foi determinado considerando o consumo horário com base em massa, em razão da potência na barra, segundo a (EQUAÇÃO 13).

$$CEC = \left( \frac{CHM}{PBT} \right) \quad (13)$$

em que,

CEC – consumo específico de combustível, g kW h<sup>-1</sup>.

O cálculo do consumo específico de combustível por volume de solo mobilizado, considerando a potência na barra de tração foi determinada utilizando a (EQUAÇÃO 14).

$$CEO = \frac{CEC}{VM} \quad (14)$$

em que,

CEO – consumo específico operacional, g kW h<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>, e,

VM – volume de solo mobilizado (m<sup>3</sup>).

A determinação da área de solo mobilizada pelos perfilômetros permitiu que o volume de solo mobilizado fosse obtido pela multiplicação com o comprimento da unidade experimental.

A capacidade de campo operacional (CCO), foi calculada conforme a (EQUAÇÃO 15). Foram adotados os valores de 2,34 m (LT) e 80% (EF).

$$CCO = \frac{VO \times LT \times EF}{10} \quad (15)$$

em que,

CCO – capacidade de campo operacional, ha h<sup>-1</sup>;

LT – largura de trabalho, m, e,

EF – eficiência de operação, %.

O consumo de combustível por área trabalhada (CCA), pode ser calculado pela razão entre consumo horário e da capacidade de campo operacional, de acordo com a (EQUAÇÃO 16).

$$CCA = \frac{CHC}{CCO} \quad (16)$$

em que,

CCA – consumo de combustível por área trabalhada, L ha<sup>-1</sup>.

A energia requerida por área foi considerada a potência e o tempo gasto por hectare, conforme Michel Júnior et al. (1985). Entretanto, para o cálculo da energia por volume de solo foi considerado a quantidade de solo mobilizado na área trabalhada, de acordo com Salvador et al. (1998). Para o cálculo da demanda de energia por hectare foi utilizado a (EQUAÇÃO 17).

$$EN = PBT \times TGH \quad (17)$$

em que,

EN – energia, kWh ha<sup>-1</sup>;

TGH – tempo gasto para preparar um hectare, h ha<sup>-1</sup>.

A demanda de energia por volume de solo mobilizado foi calculado conforme as (EQUAÇÃO 18) e (EQUAÇÃO 19).

$$K = \frac{10000 \text{ m}^2}{LE} \times AM \quad (18)$$

em que,

K – volume de solo mobilizado, m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>;

LE – largura efetiva do implemento, m, e,

AM – área de solo mobilizado, m<sup>2</sup>.

$$ENV = \frac{EN \times 1000}{K} \quad (19)$$

em que,

ENV – energia por volume de solo mobilizado, Wh m<sup>-3</sup>.

A pressão do turbo foi mensurada utilizando um transdutor piezoresistivo no coletor de admissão do motor do trator (FIGURA 26A). As temperaturas do ar de admissão, fluido de resfriamento, gás de escapamento, entrada/saída de combustível e cabine foram mensurados através de termopares (modelo K) conectados na entrada do filtro de ar (FIGURA 26B), radiador (FIGURA 26C), exaustão (FIGURA 26D), entrada e saída do medidor de vazão (FIGURA 26E), e interior da cabine (FIGURA 26F) respectivamente. Para quantificar o nível de ruído no interior do habitáculo foi instalado um microfone de alta sensibilidade (FIGURA 26G) (modelo LM393). Os resultados das variáveis descritas acima foram coletados no dia do experimento a campo, com cinco repetições, conforme a (TABELA 4).

FIGURA 26 - SENSORES DE PRESSÃO, TEMPERATURA E RÚIDO

A



B



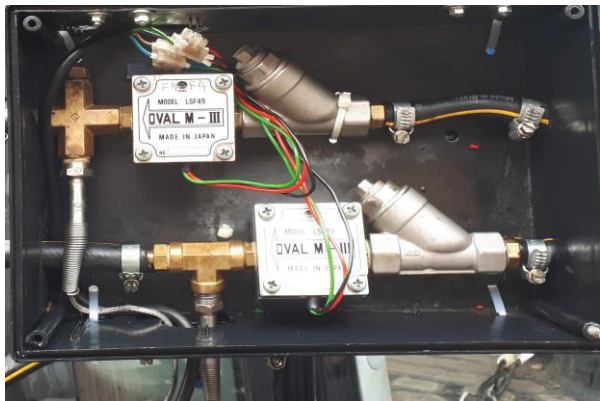
C



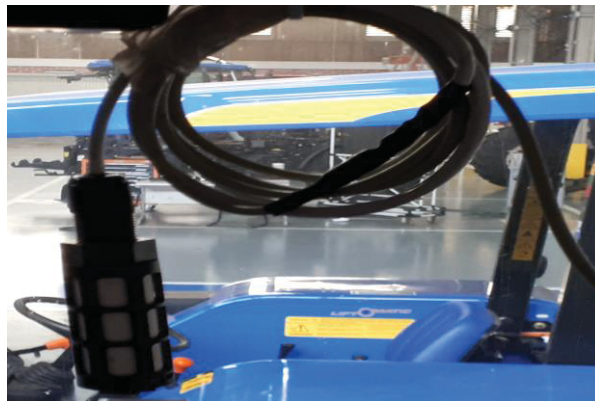
D



E



F



G



FONTE: O autor (2021).

TABELA 4 - CARACTERIZAÇÃO DA PRESSÃO, TEMPERATURA, UMIDADE E RUÍDO DURANTE A OPERAÇÃO DE PREPARO DO SOLO

Análises	Variáveis								
	P turbo (kPa)	T escape (°C)	T admissão (°C)	T flux entrada (°C)	T flux saída (°C)	T radiador (°C)	T ambiente (°C)	UR (%)	Ruído (dB)
DP	13,11	22,56	0,39	2,28	1,63	1,44	0,41	0,25	0,15
VA – km h <sup>-1</sup>									
5,7	1016	265,53	29,73	45,15	52,94	51,01	24,07	30,22	137,57
6,8	1008	269,63	29,32	47,36	55,57	53,37	23,27	30,50	137,48
8,2	1016	274,93	28,93	48,49	55,80	53,57	23,09	30,83	137,52
9,8	1005	286,67	28,75	50,26	55,81	53,96	23,10	30,48	137,40

Variáveis: Pressão do turbo (P turbo), Temperatura de escape (T escape), Temperatura de admissão (T admissão), Temperatura fluxômetro entrada (T flux entrada), Temperatura fluxômetro saída (T flux saída), Temperatura de arrefecimento (T radiador), Temperatura ambiente (T ambiente), Umidade relativa do ar (UR) e Ruído no interior da cabine (Ruído). DP: Desvio-padrão. VA: Velocidade alvo.

FONTE: O autor (2021).

O trator manteve as temperaturas desejadas durante o experimento do preparo do solo, assim como outras variáveis apresentaram comportamento estável, garantindo assim a confiabilidade dos dados gerados.

### 2.2.3.2 Avaliação da perfilometria e preparo do solo

A área experimental foi dimensionada em quatro faixas (21 x 3 m), correspondendo as quatro velocidades alvo, com bordadura de um metro de distância. Para cada faixa foram demarcadas sete repetições, através da operação de corte da cobertura vegetal (roçadora costal de combustão interna, modelo RC33MTD Tramontina®), seguido da fixação de estacas de madeira no solo (em nível ao plano horizontal de referência) e aplicação de cal hidratada Ca(OH)<sub>2</sub> para proporcionar uma condição de superfície com coloração branca, resultando no aumento da remissão do sensor *laser*, conforme a (FIGURA 27). Durante a leitura do perfilômetro eletrônico utilizou-se uma placa de material opaco (1 m<sup>2</sup>) para formação de sombra na área de leitura do sensor *laser* (posicionado perpendicularmente aos raios solares incidentes), conforme Odey e Manuwa, (2018).

FIGURA 27 - DIMENSIONAMENTO DE FAIXAS - (A) DELIMITAÇÃO DE LEITURA (B) CAL HIDRATADA

A



B



FONTE: O autor (2021).

Os perfilômetros (convencional e eletrônico) foram instalados sobre as estacas previamente niveladas, montado na direção transversal ao deslocamento do trator, conforme proposto por Carvalho filho et al. (2007). Após a obtenção das leituras, o perfilômetro foi deslocado na direção longitudinal, fazendo-se coincidir o

ponto da última leitura da posição anterior com a primeira leitura no novo posicionamento. Assim, obteve-se o perfil natural do solo através das leituras antes do preparo da área, conforme a (FIGURA 28).

FIGURA 28 - MARCAÇÕES DO PERFIL NATURAL DO SOLO – (A) CONVENCIONAL (B) ELETRÔNICO

A



B



FONTE: O autor (2021).

Para obtenção das faixas mobilizadas realizou-se a operação de preparo do solo (FIGURA 29), com a grade aradora regulada e acoplada ao conjunto motriz. O trator operou com a tração dianteira auxiliar e bloqueio do diferencial acionados.

FIGURA 29 - PREPARO DO SOLO

A



B



C



FONTE: O autor (2021).

Em seguida ao preparo do solo foi possível realizar as leituras do perfil da superfície mobilizada e do perfil interno do solo mobilizado, denominados, perfil mobilizado (FIGURA 30) e perfil de corte (FIGURA 31). Este último obtido após a retirada do solo mobilizado com auxílio de ferramenta manual (enxada).

FIGURA 30 - MARCAÇÕES DO PERFIL MOBILIZADO DO SOLO – (A) CONVENCIONAL (B) ELETRÔNICO

A



B



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 31 - MARCAÇÕES DO PERFIL DE CORTE DO SOLO – (A) CONVENCIONAL (B) ELETRÔNICO

A



B



FONTE: O autor (2021).

Conforme a metodologia de coleta realizada no laboratório, os valores de cotas obtidos no perfilômetro convencional foram ditados para planilhas (Microsoft Excel®), e as informações do perfilômetro eletrônico armazenadas no próprio computador de aquisição.

#### 2.2.5 Delineamento experimental e análises estatísticas

O experimento em faixas, conduzido no delineamento de blocos casualizado, fatorial duplo, resultaram em dois perfilômetros (P), sendo o eletrônico (PE) e convencional (PC) alocados nas parcelas, e as velocidades alvo (VA) da

operação de preparo do solo nas subparcelas (5,7; 6,8; 8,2 e 9,8 km h<sup>-1</sup>) obtidas nas marchas F7, F8, F9 e F10 com a rotação nominal do trator em 2200 rpm. Para cada tratamento, foram realizadas sete repetições, totalizando 56 unidades experimentais.

Os dados coletados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade da variância (Levene), atendendo essas premissas foram aplicados à análise de variância para verificar os efeitos dos fatores (P e VA) e sua interação, por meio do programa estatístico Sigmaplot 12 (Systat®). Também foram calculados o erro médio entre as leituras dos perfilômetros (Microsoft Excel®).

Quando o teste F apresentou valor significativo ( $p \leq 0,05$ ) de probabilidade, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) para fatores qualitativos (P) nas análises de perfilometria do solo. O teste de regressão polinomial foi aplicado para fatores quantitativos (VA) quando avaliado os parâmetros de resistência específica operacional e demanda energética para o preparo do solo, com modelos selecionados pelo critério de maior  $R^2$  e significância ( $p \leq 0,05$ ) dos parâmetros da equação.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 LABORATÓRIO

Na (TABELA 5) estão apontados os resultados da síntese da análise dos dados de perfilometria do solo, não havendo necessidade de transformação das médias para todas as variáveis estudadas, denotando a normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (Levene), exceto no parâmetro Rugosidade modificada, que apresentou comportamento heterogêneo. Ademais, todos os coeficientes de variação são categorizados homogêneos, conforme Vanni (1998).

TABELA 5 - SÍNTESE ESTATÍSTICA DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E DO TESTE DE MÉDIAS PARA OS PARÂMETROS DE PERFILOMETRIA DO SOLO EM LABORATÓRIO

Análises	Parâmetros avaliados				
	Rugosidade modificada (%)	Área elevada (cm <sup>2</sup> )	Área mobilizada (cm <sup>2</sup> )	Empolamento (%)	Espessura (cm)
Normalidade					
SW	0,868	0,807	0,856	0,835	0,785
Homogeneidade					
LEV	0,001	0,329	0,376	0,172	0,375
Teste F					
	0,269 <sup>NS</sup>	0,965 <sup>NS</sup>	0,515 <sup>NS</sup>	1,447 <sup>NS</sup>	0,123 <sup>NS</sup>
CV (%)					
	32,83	27,90	28,22	27,41	28,94
Teste de médias					
Convencional	488,78	1970,14	3339,01	51,62	11,92
Eletrônico	533,99	2269,40	3707,04	61,19	12,56

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 Levene:  $LEV \leq 0,05$  – Variâncias Heterogêneas;  $LEV > 0,05$  – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; \* ( $p < 0,05$ ) e \*\* ( $p < 0,01$ ). CV (%) – Coeficiente de variação. 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 (2021).

Ao se observar os resultados obtidos com o uso dos perfilômetros convencional e eletrônico, verifica-se que não houve diferença estatística sob os parâmetros Rugosidade modificada, Área elevada e Mobilizada, Empolamento e Espessura. Desta forma, pode-se constatar a validação do equipamento desenvolvido nesta fase, uma vez que a leitura indireta da superfície do solo mensurada a partir do sensor *laser* ODS 96M/V gerou dados eficientemente ao modelo tradicional em ambos os parâmetros desejados.

## 3.2 CAMPO

### 3.2.1 Perfilometria do solo

A (TABELA 6) apresenta a síntese da análise dos dados de perfilometria do solo, não havendo necessidade de transformação das médias para as variáveis estudadas. Os parâmetros Área elevada; Área mobilizada; Empolamento e Espessura apresentaram normalidade das variâncias (Shapiro-Wilk), exceto a Rugosidade modificada. Ademais, a Rugosidade modificada; Área elevada e Empolamento exibiram homogeneidade dos resíduos das variâncias (Levene). O coeficiente de variação apresentou média geral de 28,20% estando associado à variabilidade dos atributos físicos na área experimental, conforme explicado por Francetto et al. (2021).

TABELA 6 - SÍNTESE ESTATÍSTICA DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E DO TESTE DE MÉDIAS PARA OS PARÂMETROS DE PERFILOMETRIA DO SOLO EM CAMPO

Análises	Parâmetros avaliados				
	Rugosidade modificada (%)	Área elevada (cm <sup>2</sup> )	Área mobilizada (cm <sup>2</sup> )	Empolamento (%)	Espessura (cm)
Normalidade					
SW	0,008	0,593	0,594	0,994	0,647
Homogeneidade					
LEV	0,855	0,381	0,044	0,874	0,029
Teste F					
P	3,912 <sup>NS</sup>	10,026 <sup>*</sup>	33,553 <sup>**</sup>	1,093 <sup>NS</sup>	84,019 <sup>**</sup>
VA	0,851 <sup>NS</sup>	7,070 <sup>**</sup>	0,159 <sup>NS</sup>	5,175 <sup>**</sup>	0,197 <sup>NS</sup>
P x VA	0,939 <sup>NS</sup>	0,220 <sup>NS</sup>	0,247 <sup>NS</sup>	0,250 <sup>NS</sup>	0,206 <sup>NS</sup>
CV (%)					
P	23,53	30,37	8,94	33,72	7,35
VA	59,68	37,34	19,31	41,78	20,03
P x VA	66,14	65,28	21,36	61,34	20,89
Erro padrão médio	116,35	938,14	1057,32	21,29	4,08
Teste de médias					
Convencional	207,99	1011,99 B	3677,94 B	28,71	12,46 B
Eletrônico	177,88	1394,91 A	4370,30 A	32,28	15,60 A

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 Levene:  $LEV \leq 0,05$  – Variâncias Heterogêneas;  $LEV > 0,05$  – Variâncias homogêneas. P – Perfilômetro. VA – Velocidade alvo. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; \* ( $p < 0,05$ ) e \*\* ( $p < 0,01$ ). CV (%) – Coeficiente de variação. 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 (2021).

Os resultados obtidos demonstram diferença significativa do fator (P) sobre os parâmetros de Área elevada, Área mobilizada e Espessura. Já para os parâmetros Rugosidade modificada e Empolamento, foram verificadas que as leituras dos dados para ambos os perfilômetros não diferem entre si. Quanto a velocidade alvo (VA) observa-se apenas diferença nos parâmetros de Área elevada e Empolamento.

Em relação aos resultados da Área elevada, notou-se que o perfilômetro convencional apresentou valores inferiores ao eletrônico, o que pode ser explicado pela ocorrência da imersão das hastes na superfície do solo mobilizado. O aprofundamento das hastes no solo pode acarretar a subestimação dos valores altimétricos da superfície do solo, conforme descrito por Laskoski et al. (2017). Tendo em vista que este efeito não acontece ao utilizar o perfilômetro eletrônico, uma vez que sua leitura ocorre através de uma varredura *laser* da superfície do solo, dessa forma, os dados são apresentados de maneira mais precisa em relação ao real perfil analisado (MARTINEZ-AGUIRRE et al., 2016; FERENČÍK et al., 2019).

Esta distinção da Área elevada resulta em uma menor Área mobilizada quando mensurada convencionalmente, devido aos fatores descritos anteriormente. Entretanto, salienta-se que em razão da geração de "sombra" sobre o campo de leitura durante o experimento, não foram observadas interferências devido a remissão ocasionada pela radiação do ambiente, que são observadas e descritas por Odey e Manuwa, (2018). Essa limitação é desencadeada pela luz do sol e altas temperaturas, as quais perturbam a sensibilidade das medições do dispositivo *laser*.

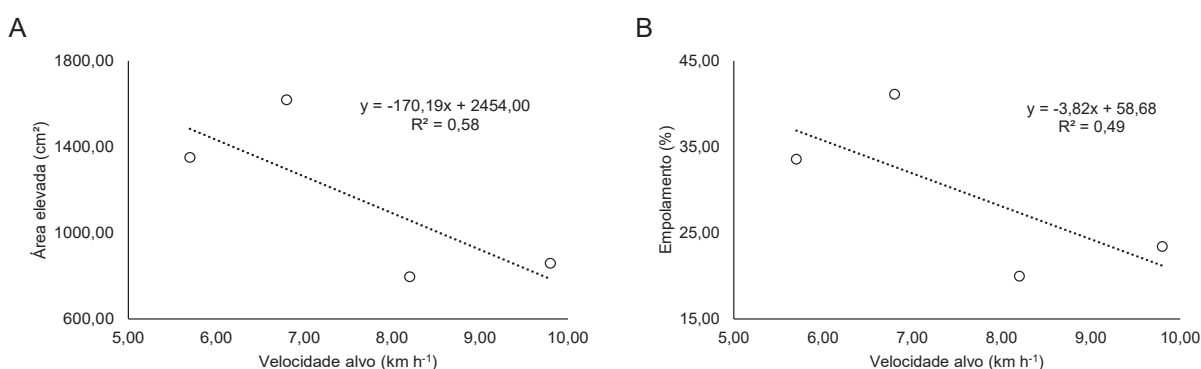
Assim sendo, em corroboração com Moreno et al. (2008) ao realizarem um estudo para desenvolver um novo método de medição de parâmetros da perfilometria do solo usando o princípio subjacente à análise de sombra, concluíram que a sombra artificial proporcionou resultados significativos e correlacionados com os obtidos pelo perfilômetro convencional de hastes.

O efeito da entrada das hastes sobre o solo mobilizado fica mais evidente ao analisar a Espessura da camada mobilizada, na qual a menor densidade do solo após a operação de gradagem promoveu uma maior ocorrência de imersão das hastes no solo, o que, conseqüentemente possibilitou valores subestimados da profundidade de trabalho.

Analisando o efeito das velocidades alvo sobre os parâmetros estudados (FIGURA 32), observa-se que com o acréscimo das velocidades (8,2 e 9,8 km h<sup>-1</sup>)

houve redução linear da Área elevada (FIGURA 32A), devido a seleção da velocidade poder afetar a qualidade final do sulco em função da projeção do solo para longe desta região (FRANCETTO et al., 2021). De acordo com Ahmadi (2018) quando a grade é deslocada sobre o solo, cada uma das lâminas do disco desvia as partículas do solo como um fluido, especialmente em elevadas velocidades operacionais.

FIGURA 32 - REGRESSÃO PARA VELOCIDADE ALVO



FONTE: O autor (2021).

Com o empolamento do solo (FIGURA 32B), o qual representa a relação percentual entre a área de elevação e a área mobilizada resultante da ação dos órgãos ativos do implemento de preparo, é possível observar que na velocidade de 8,2 km h<sup>-1</sup> ocorreu o menor índice de Empolamento. Podendo sendo explicado pela tendência de redução da Área elevada com o acréscimo da velocidade dos discos.

### 3.2.2 Demanda energética na operação de preparo do solo

Nas (TABELA 7 e 8) estão apontados os resultados da síntese das análises dos dados da demanda energética na operação de preparo do solo, respectivamente, não havendo necessidade de transformação das médias, denotando normalidade das variâncias (Shapiro-Wilk) para todos os parâmetros. Ademais, PAT, CHC, CEO, CCO, CCA, EN e ENV exibiram homogeneidade dos resíduos das variâncias (Levene). Os coeficientes de variação foram classificados como dispersão média, de acordo com Ferreira (2018).

TABELA 7 - SÍNTESE ESTATÍSTICA DAS ANÁLISES DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS DE DEMANDA ENERGÉTICA AVALIADAS

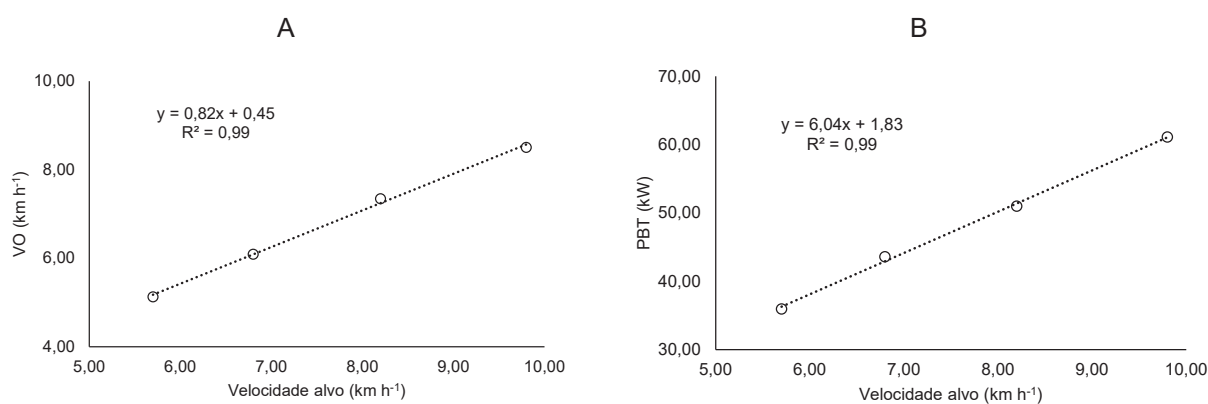
Análises	Variáveis avaliadas				
	VO (km h <sup>-1</sup> )	FBT (kgf)	PBT (kW)	RBT (%)	CHC (L h <sup>-1</sup> )
Normalidade					
SW	0,070	0,191	0,190	0,148	0,062
Homogeneidade					
LEV	0,432	0,027	0,026	0,027	0,125
Teste F					
	2657,601 **	0,473 NS	73,506 **	73,506 **	9,19 **
CV (%)					
	0,94	4,47	5,84	5,85	12,60

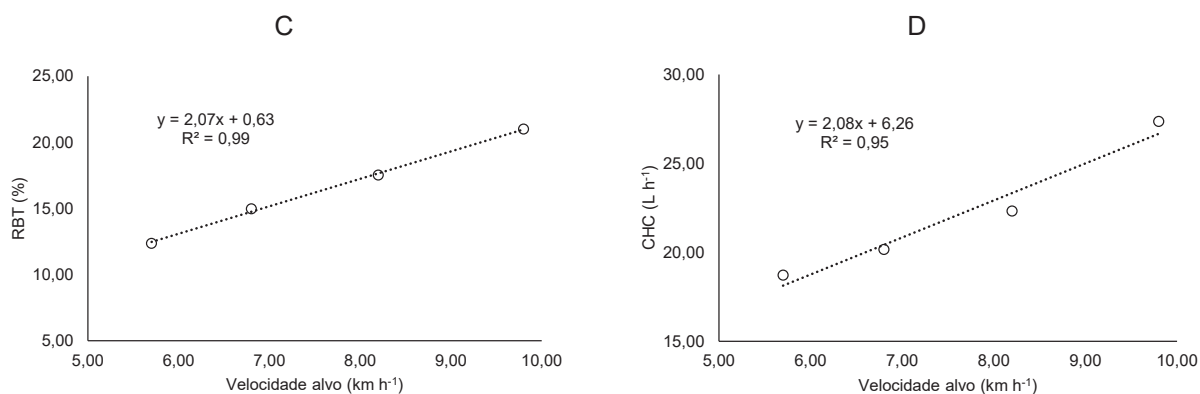
Variáveis: Velocidade operacional (VO), Força na barra de tração (FBT), Potência na barra de tração (PBT), Rendimento na barra de tração (RBT) e Consumo horário de combustível (CHC). Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk:  $SW \leq 0,05$  – Anormalidade dos dados;  $SW > 0,05$  – Normalidade nos dados. Teste de Homogeneidade das variâncias de Levene:  $LEV \leq 0,05$  – Variâncias Heterogêneas;  $LEV > 0,05$  – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; \* ( $p < 0,05$ ) e \*\* ( $p < 0,01$ ). CV (%) – Coeficiente de variação.  
 FONTE: O autor (2021).

Os resultados obtidos ilustram a diferença significativa do fator velocidade alvo sobre as variáveis VO, PBT, RBT e CHC. Já para o fator FBT não houve distinção significativa entre as velocidades alvo analisadas, demonstrando a estabilidade da força de tração demandada durante os tratamentos.

Analisando o efeito das velocidades alvo sobre as variáveis analisadas (FIGURA 33), observa-se o comportamento linear para VO, PBT, RBT e CHC, com coeficiente de determinação superior a 95%.

FIGURA 33 - REGRESSÃO PARA O FATOR ISOLADO VELOCIDADE ALVO





FONTE: O autor (2021).

Ao se verificar a velocidade operacional (FIGURA 33A), nota-se um incremento linear deste parâmetro em relação a velocidade alvo, entretanto apresentando valores inferiores as velocidades alvo. Através da equação gerada observa-se que o conjunto atingiu cerca de 82% da velocidade desejada, devido a patinagem das rodas motrizes e à redução da rotação do motor com a ocorrência de alternâncias nos momentos de cargas, corroborando com Vantsevich et al. (2007).

A potência na barra de tração (FIGURA 33B) apresentou comportamento crescente em detrimento da velocidade alvo, no qual observa-se o aumento de 6,04 kW com o acréscimo da velocidade alvo em 1 km h<sup>-1</sup>, decorrente da tendência crescente da VO com o aumento da velocidade alvo. Resultando maiores níveis de eficiência da transformação da energia mecânica disponibilizada pelo motor em trabalho, proporcionando assim, ampliação do RBT (FIGURA 33C) com o acréscimo da velocidade.

Em decorrência ao gerenciamento eletrônico do motor os valores de CHC (FIGURA 33D) mantiveram-se coerentes com a força de tração requerida. Saliendo o aumento do volume demandado em 2,1 L h<sup>-1</sup> ao incrementar a velocidade em 1 km h<sup>-1</sup>, conforme a equação gerada. Este efeito ocorre devido a maior demanda energética ao realizar trabalho (FBT) em menor intervalo de tempo, corroborando com Martins et al. (2018) ao determinarem maior consumo de combustível em marchas superiores na operação de gradagem.

Na (TABELA 8) estão apontados os resultados da síntese das análises dos dados de Consumo específico de combustível (CEC), Consumo específico de combustível por volume de solo mobilizado (CEO), Capacidade de campo

operacional (CCO), consumo de combustível por área trabalhada (CCA), Energia requerida por área (EN) e Energia requerida por volume de solo mobilizado (ENV).

TABELA 8 - SÍNTESE ESTATÍSTICA DAS ANÁLISES DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS DE DEMANDA ENERGÉTICA AVALIADAS

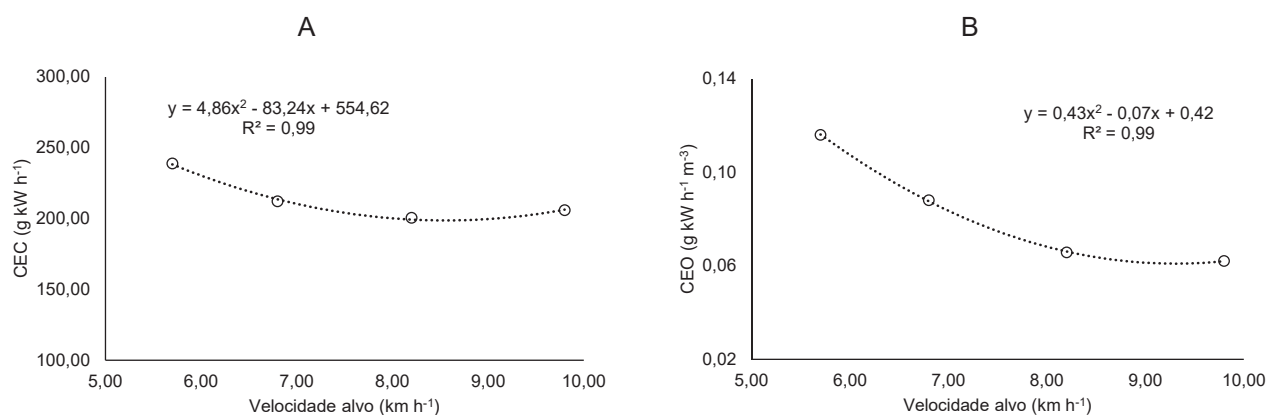
Análises	Variáveis avaliadas					
	CEC (g kW h <sup>-1</sup> )	CEO (g kW h <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> )	CCO (ha h <sup>-1</sup> )	CCA (L ha <sup>-1</sup> )	EN (kWh ha <sup>-1</sup> )	ENV (Wh m <sup>-3</sup> )
Normalidade						
SW	0,789	0,082	0,147	0,095	0,874	0,505
Homogeneidade						
LEV	0,043	0,159	0,432	0,421	0,067	0,091
Teste F						
	3,786 **	72,895 **	2657,601 **	2,067 NS	0,229 NS	1,610 NS
CV (%)						
	9,12	7,84	0,94	12,02	7,50	0,22

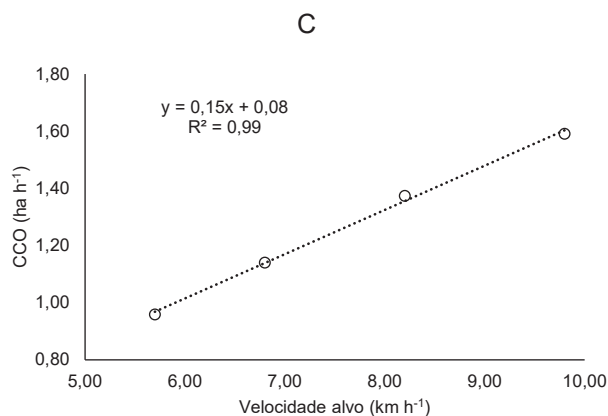
Variáveis: Consumo específico de combustível (CEC), Consumo específico de combustível por volume de solo mobilizado (CEO), Capacidade de campo operacional (CCO), consumo de combustível por área trabalhada (CCA), Energia requerida por área (EN) e Energia requerida por volume de solo mobilizado (ENV). Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk: SW ≤ 0,05 – Anormalidade dos dados; SW > 0,05 – Normalidade nos dados. Teste de Homogeneidade das variâncias de Levene: LEV ≤ 0,05 – Variâncias Heterogêneas; LEV > 0,05 – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; \* (p < 0,05) e \*\* (p < 0,01). CV (%) – Coeficiente de variação.

FONTE: O autor (2021).

Ao avaliar o efeito das velocidades alvo sobre as variáveis CEC, CEO e CCO (FIGURA 34) observa-se distinção estatística, além de um comportamento linear da CCO, e polinomial de segunda ordem para CEC e CEO, ambos com coeficiente de determinação superior a 99%.

FIGURA 34 - REGRESSÃO PARA O FATOR ISOLADO VELOCIDADE ALVO





FONTE: O autor (2021).

O incremento não proporcional entre o consumo de combustível e a potência gerada na barra de tração resultam em maior eficiência no aproveitamento da energia contida nos combustíveis, e consequente redução do CEC (FIGURA 34A). A qual, de acordo com a equação gerada, proporciona os maiores níveis de desempenho energético ao operar na velocidade de 8,5 km h<sup>-1</sup>. Entretanto de acordo com Farias et al. (2017) o conjunto deve apresentar valores de CEC inferiores a 200,0 g kW h<sup>-1</sup> para ser considerado eficiente, desta forma constata-se que o conjunto opera eficientemente entre as velocidades alvo de 8,1 e 9,0 km h<sup>-1</sup>.

Para o CEO (FIGURA 34B) observa-se o comportamento decrescente polinomial em detrimento da velocidade alvo, proporcionando maior rendimento energético por volume de solo mobilizado ao operar em 9,8 km h<sup>-1</sup>. Em relação ao CCO (FIGURA 34C) constata-se o incremento da área trabalhada com o aumento da velocidade alvo, que de acordo com a equação gerada a área trabalhada é acrescida em 0,2 ha com o aumento da velocidade em um quilometro por hora. Assim minimizando o tempo necessário para cumprir a janela de operação (DAMANAUSKAS et al., 2019).

## 4 CONCLUSÃO

Através dos dados obtidos com ambos os perfilômetros durante os ensaios laboratorial e a campo, constata-se a validação de fase do equipamento desenvolvido e a possibilidade da realização de leituras eletrônicas com menor tempo de aquisição e interferência no ambiente durante as avaliações.

O acréscimo da velocidade operacional proporciona incremento nos níveis de rendimento energético da operação de preparo do solo.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Para trabalhos futuros, o laboratório poderá utilizar o perfilômetro eletrônico em experimentos mais eficientes, ou então, apenas um dos dois de maneira individual. Logo, possibilita-se analisar o comportamento dos parâmetros de perfilometria em diferentes operações de preparo do solo, a fim de estabelecer a eficiência destas atividades.

## REFERÊNCIAS

- AHMADI, I. A draught force estimator for disc harrow using the laws of classical soil mechanics. **Biosystems Engineering**, v. 171, p. 52-62, 2018.
- ALLMARAS, R. R. et al. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. **USDA**, p.22, 1966.
- 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.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (ASABE). **ASABE S296.4**: Uniform terminology for traction of agricultural tractors, self-propelled implements, and other traction and transport devices. St. Joseph, 1999.
- ARDUINO. Arduino Products. Itália, 2021. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ISO 14396**: Motores alternativos de combustão interna - Determinação e método para a medição da potência de motor. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR. 7148**: Petróleo e Derivados de Petróleo-Determinação da Massa Específica, Densidade Relativa e API-Método do Densímetro. Rio de Janeiro, 2013.
- ATMEL. Microchip. Europa, 2021. Disponível em: <<https://start.atmel.com/>>. Acesso em: 24 jul. 2021.
- BAUER, T. et al. Long-term agricultural management effects on surface roughness and consolidation of soils. **Soil and Tillage Research**, v. 151, p. 28-38, 2015.
- BÖGEL, T. et al. Assessment of soil roughness after tillage using spectral analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 159, p. 73-82, 2016.

BORGES, D. F. et al. Perfilômetro de barra corrediça: avaliação de metodologia para análise da rugosidade do solo. **Energia na Agricultura**, v. 34, n. 4, p. 471-478, 2019.

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.

CARVALHO FILHO, A. et al. Soil tillage methods: alterations in the roughness of the soil. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 229-237, 2007.

DAMANAUSKAS, V. et al. Efficiency of disc harrow adjustment for stubble tillage quality and fuel consumption. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104311, 2019.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **DIN 70020**: Automotive engineering, maximum speed, acceleration and other terms, definitions, and tests. Berlin, 1986.

ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE OF THE UNITED NATIONS REGULATION (ECE). **ECE/80/1269**: Council directive on the approximation of the laws of the member states relating to the engine power of motor vehicles - Road vehicles engineering. EU, 1980.

ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE OF THE UNITED NATIONS REGULATION (ECE). **ECE/97/68**: Medidas contra la emisión de gases y partículas contaminantes procedentes de los motores de combustión interna que se instalen em las máquinas móviles no de carretera. EU, 1997.

ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE OF THE UNITED NATIONS REGULATION (ECE). **ECE/R24**: Uniform Provisions Concerning the: I The Approval of Compression Ignition (C.I.) Engines with Regard to the Emission of Visible Pollutants; II The Approval of Motor Vehicles with Regard to the Installation of C.I. New York, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Serviço Nacional de Pesquisa de Solos: Manual de Métodos de Análise de Solo**. EMBRAPA solos, Brasília, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Serviço Nacional de Pesquisa de Solos: Manual de Métodos de Análise de Solo**. EMBRAPA solos, Brasília, 2017. 577 p.

FARIAS, M. S. et al. Air and fuel supercharge in the performance of a diesel cycle engine. **Ciência Rural**, v. 47, 2017.

FENG, Q. et al. Can deep tillage enhance carbon sequestration in soils? A meta-analysis towards GHG mitigation and sustainable agricultural management. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 133, p. 110-293, 2020.

FERENČÍK, M. et al. Detection of forest road damage using mobile laser profilometry. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 166, p. 105010, 2019.

FERNANDES, H. C. et al. Avaliação da demanda energética numa operação conjugada de preparo do solo. **Revista Ceres**, v. 54, n. 312, p. 133-139, 2007.

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

FORSETI. Estruturas de alumínio Bosch. São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://forsetisolucoes.mercadoshops.com.br/>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

FRANCETTO, T. R. et al. Effect of the distance between the cutting disc and furrow openers employed in row crop planting on soil mobilization. **Engenharia Agrícola**, v. 41, p. 148-160, 2021.

GAMERO, C. A.; BENEZ, S. H. Avaliação da condição do solo após a operação de preparo. **SILVEIRA, GM IV Ciclo de estudos sobre mecanização agrícola. Jundiaí: Fundação Cargill**, p. 12-21, 1990.

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.

GILLIOT, J. et al. Soil surface roughness measurement: A new fully automatic photogrammetric approach applied to agricultural bare fields. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 134, p. 63-78, 2017.

HE, S. et al. Changes of soil microrelief and its effect on soil erosion under different rainfall patterns in a laboratory experiment. **Catena**, v. 162, p. 203-215, 2018.

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

ISSAKA, F. et al. Sustainable conservation tillage improves soil nutrients and reduces nitrogen and phosphorous losses in maize farmland in southern China. **Sustainability**, v. 11, n. 8, p. 2397, 2019.

JASPER, S. P. et al. Desempenho do trator de 157 kW na condição manual e automático de gerenciamento de marchas. **Scientia Agraria**, v. 17, n. 3, p. 55-60, 2016.

KOGUT, Z. et al. The effect of the disc setup angles and working depth on disc harrow working resistance. **Biosystems engineering**, v. 151, p. 328-337, 2016.

LASKOSKI, M. et al. Desenvolvimento, construção e validação do perfilômetro a laser. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 25, n. 2, p. 132-138, 2017.

LEADSHINE. AC servo systems. China, 2021. Disponível em: <<http://www.leadshine.com/>>. Acesso em: 25 jun. 2021.

LEUZE ELECTRONIC. Sensors and automation technology. Alemanha, 2021. Disponível em: <<https://www.leuze.com/pt/BR/>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

MARTINEZ-AGIRRE, A. et al. Evaluation of surface roughness parameters in agricultural soils with different tillage conditions using a laser profile meter. **Soil and Tillage Research**, v. 161, p. 19-30, 2016.

MARTINS, M. B. et al. Fuel consumption between two soil tillage systems for planting sugarcane. **Sugar Tech**, v. 23, n. 1, p. 219-224, 2021.

MARTINS, M. B. et al. Otimização energética de um trator agrícola utilizando normas técnicas em operações de gradagem. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 1, p. 52-57, 2018.

MICHEL, J. A. et al. Energy requirements of two tillage systems for irrigated sugarbeets, dry beans and corn. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 6, p. 1731-1735, 1985.

MOHEUDDIN, M. et al. A new study of trapezoidal, Simpson's 1/3 and Simpson's 3/8 rules of numerical integral problems. **Applied Mathematics and Sciences: An International Journal**, v. 6, n. 4, 2019.

MONTEIRO, L. de A. et al. Performance of an agricultural tractor equipped with radial and bias ply tires on three levels of liquid ballast. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 3, p. 551-560, 2011.

MORENO, R. et al. Shadow analysis: A method for measuring soil surface roughness. **Geoderma**, v. 146, n. 1-2, p. 201-208, 2008.

ODEY, S. O.; MANUWA, S. I. Development of Profilometer for Measuring Area of Soil Disturbance by Narrow Tillage Tools. **IJRES**, v. 6, n. 1, p. 26-32, 2018.

PEQUENO, I. D. et al. Desempenho operacional de conjunto trator-grade em argissolo amarelo no semiárido nordestino. **Nucleus**, v. 9, n. 2, 2012.

POLYAKOV, V.; NEARING, M. A simple automated laser profile meter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 2, p. 327-331, 2019.

QUEIROZ, R. F. de et al. Cargas no depósito de fertilizante de uma semeadora-adubadora e desempenho operacional1. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, p. 271-277, 2017.

SALVADOR, N. et al. Requerimento energético e desagregação do solo em diferentes sistemas de preparo periódico num Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 6, n. 04, p. 226-234, 1998.

SANTOS, J. dos. Equipamento conjugado de preparo do solo: desempenho em função da posição das hastas escarificadoras, do tipo de ponteira e da rotação do rotor. 1993. 178 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1993.

SCARPARE, F. V. et al. Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 110-118, 2019.

SCHLOSSER, J. F. et al. Análise comparativa do peso específico dos tratores agrícolas fabricados no Brasil e seus efeitos sobre a seleção e uso. **Ciência Rural**, v. 35, p. 92-97, 2005.

SCHLOSSER, J. F. et al. As “diferentes” potências dos motores. **Cultivar Máquinas**, v. 4, n. 4, 2020b.

SCHLOSSER, J. F. et al. Power hop in agricultural tractors. **Ciência Rural**, v. 50, 2020a.

SCHNEIDER, F. et al. The effect of deep tillage on crop yield—What do we really know?. **Soil and tillage research**, v. 174, p. 193-204, 2017.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **SAE J1349**: Engine power test code-Spark ignition and compression ignition-net power rating. EUA, 1995.

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

STOLF, R. Grade leve, média, pesada e superpesada: classificação e função. **Álcool e Açúcar**, v. 6, p. 36-44, 1986.

SUGAMOSTO, M. L. **Uso de técnicas de geoprocessamento para elaboração do mapa de aptidão agrícola e avaliação da adequação de uso do centro de estações experimentais do Canguiri, município de Pinhais - Paraná**. 2002. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2002.

SUN, M. et al. Long-term evaluation of tillage methods in fallow season for soil water storage, wheat yield and water use efficiency in semiarid southeast of the Loess Plateau. **Field Crops Research**, v. 218, p. 24-32, 2018.

THOMSEN, L. M. et al. Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model. **Soil**, v. 1, n. 1, p. 399-410, 2015.

TIAN, H. et al. Computer vision technology in agricultural automation - A review. **Information Processing in Agriculture**, v. 7, n. 1, p. 1-19, 2020.

VANNI, S. M. **Modelos de regressão: Estatística aplicada**. São Paulo: Legmar Informática, 1998. 177 p.

VANTSEVICH, V. Multi-wheel drive vehicle energy/fuel efficiency and traction performance: Objective function analysis. **Journal of Terramechanics**, v. 44, n. 3, p. 239-253, 2007.

## APÊNDICE 1 – MONITORAMENTO DO TEOR DE ÁGUA DO SOLO

Os resultados do monitoramento do teor de água do solo na área experimental, estão descritos na (TABELA 9) a seguir.

TABELA 9 - RESULTADOS DO MONITORAMENTO DO TEOR DE ÁGUA DO SOLO NA ÁREA EXPERIMENTAL ANTES DO PREPARO DO SOLO

Data de coleta	Profundidade	Umidade gravimétrica (Kg Kg <sup>-1</sup> )	
		A	B
22/09/2021	0,00 – 0,20 m	0,244	0,232
	0,20 – 0,40 m	0,387	0,510
28/09/2021	0,00 – 0,20 m	0,259	0,247
	0,20 – 0,40 m	0,370	0,367
06/11/2021	0,00 – 0,20 m	0,339	0,402
	0,20 – 0,40 m	0,198	0,283
25/11/2021	0,00 – 0,20 m	0,299	0,332
	0,20 – 0,40 m	0,276	0,240
02/12/2021	0,00 – 0,20 m	0,310	0,308
	0,20 – 0,40 m	0,300	0,295
09/12/2021	0,00 – 0,20 m	0,309	0,310
	0,20 – 0,40 m	0,304	0,305

FONTE: O autor (2021).