

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Henrique Eguilhor Rodrigues

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM MECANISMO
ROTATIVO PARA DESCOMPACTAÇÃO DE SOLO**

**Santa Maria, RS.
2021**

Henrique Eguilhor Rodrigues

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM MECANISMO ROTATIVO PARA
DESCOMPACTAÇÃO DE SOLO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Airton dos Santos Alonço

Santa Maria, RS.
2021

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor. Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Rodrigues, Henrique Eguilhor
DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM MECANISMO ROTATIVO
PARA DESCOMPACTAÇÃO DE SOLO / Henrique Eguilhor
Rodrigues.- 2021.
130 p.; 30 cm

Orientador: Airton dos Santos Alonço
Coorientador: Tiago Rodrigo Francetto
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2021

1. Máquinas Agrícolas 2. Relação máquina-solo 3.
Adensamento de solo I. dos Santos Alonço, Airton II.
Rodrigo Francetto, Tiago III. Título.

© 2021

Todos os direitos autorais reservados a Henrique Eguilhor Rodrigues. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação.

Endereço: Rua João Machado Soares, n.1714, Bairro Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97110-000

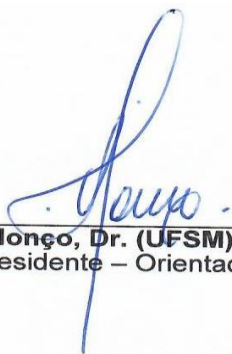
Fone: (55) 999405885; E-mail: henrique_eguilhor@hotmail.com

Henrique Eguilhor Rodrigues

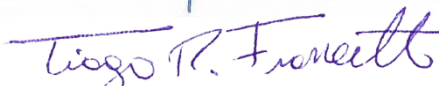
**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM MECANISMO ROTATIVO PARA
DESCOMPACTAÇÃO DE SOLO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

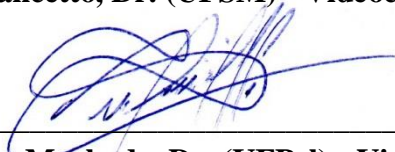
Aprovado em 31 de agosto de 2021:



Airton dos Santos Alonço, Dr. (UFSM) – Videoconferência
(Presidente – Orientador)



Tiago Rodrigo Francetto, Dr. (UFSM) - Videoconferência



Antônio Lilles Tavares Machado, Dr. (UFPel) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2021.

DEDICATÓRIA

A Deus e aos meus pais Carlos e Sonia Rodrigues.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus porque dele, e por ele, e para ele, são todas as coisas.

- Aos meus pais Carlos e Sônia Rodrigues pelo amor, suporte e incentivo, amo vocês.

- À minha esposa Lanes Jaques pelo amor, carinho, paciência, compreensão, suporte emocional, auxílio antes, durante e após a execução deste trabalho.

- Ao Professor Dr. Airton dos Santos Alonço pela preciosa orientação, valiosos ensinamentos, compreensão, confiança e momentos de descontração como nossos debates amigáveis sobre futebol.

- Ao Professor Dr. Tiago Rodrigo Francetto pelos belos conselhos, amizade, compreensão e auxílio em todas as etapas na construção deste trabalho.

- Ao querido e amigo, colega de laboratório, professor Rafael Sobroza Becker pelos valiosos conselhos, ensinamentos, cumplicidade, auxílio em todos os momentos, sem o qual não seria possível concretizar este objetivo.

- Ao meu irmão Ricardo Rodrigues e sua esposa Dielen pelo amor, incentivo, carinho e suporte emocional e financeiro.

- A minha irmã Fernanda e seu esposo Heron Miranda pelo apoio, incentivo e momentos alegres.

- A minha sogra Leonarda pela amizade, auxílio e belas recepções em Alegrete.

- Ao Professor Dr. Carlos Aurélio Dilli por compreender e zelar nossos sonhos, pelos belos conselhos, incentivos, amizade e simplicidade. Vou levá-lo para a vida como exemplo de professor.

- Ao Professor Dr. Vilnei de Oliveira Dias pelas oportunidades, ensino e preciosos conselhos após as apresentações das disciplinas de Máquinas Agrícolas I, II e III. Você é um professor exemplar no que tange a dedicação e ensino!

- Ao Professor Dr. Ricardo Tadeu Paragisnki pelo incentivo a todo o momento, as universidades precisam de mais professores como você!

- A banca examinadora, composta pelos professores Antônio Lilles Machado e Tiago Francetto.

- Ao amigo e colega Wagner da Cruz pelo suporte, auxílio, cumplicidade e pelos belos momentos juntos.

- Aos meus professores do Colégio Estadual Emílio Zuñda José Emiliano, Celi Balbino, Léia, Ana Marta, Edson Diniz, Rodnei (*in memoriam*), Marta Felipette, Isabel

Bilheri, Claudio Amir e Reni Almeida vocês foram os primeiros a contribuírem nesse trabalho.

- Aos meus amigos e colegas de universidade engenheiros Luiz Felipe Leonardi, Sander Bernardi, Marcelo Ribeiro, Leonardo Petry, Fabrício Fernandes, Adam Prado, Cassio Elias Santos e Henrique Grecco pelos momentos incríveis vividos durante esta trajetória.

- Ao estimado amigo e sempre lembrado Eduardo Marzari (*in memoriam*) pelos belos momentos de alegrias, choros, companheirismo e aprendizados.

- Aos meus queridos amigos e colegas Thalles Fagundes, Guilherme Ramos, Natália Amaral, Daiane Lamberty, Luiza Ponche e Luciane Arce pelos momentos alegres, tristes e por tornarem a trajetória na engenharia um pouco mais suave e descontraída.

- Aos Amigos Alan Gonçalves, Pâmela Oliveira, Raissa Morais, Hailon Lagmann, Lucas Daniel Cezar, Luan Quadros, Marcus de Oliveira, Rafael Fredo, Dionatan Soares, Leandro Vargas e Guilherme Souza pelos momentos de alegria e descontração.

- Ao amigo Luiz Felipe Dorneles e o pessoal do PGM da Igreja Batista de Camobi pela amizade, companheirismo e hospitalidade.

- Ao grupo de pesquisa LASERG de Cachoeira do Sul orientados pelo professor Tiago Rodrigo Francetto, composto por Eduarda Aono, Alice Balansin, Vitor Santos, Romeu Mallmann que muito contribuíram durante o experimento.

- Ao amigo e colega Tiago Lopes pela bela recepção e auxílio em Santa Maria.

- Ao amigo Vitor Kochenborger graduando do curso de Zootecnia da UFSM.

- Aos Professores Mirta Petry e Juliano Martins pela compreensão e cedência do espaço para a realização do experimento.

- Ao Professor Luciano Pes pela atenção e empréstimo da área para o desenvolvimento deste trabalho.

- Ao colega e amigo Engenheiro Agrícola Edvaldo Fahur (Baiano), funcionário da UFSM que me auxiliou em todo momento na execução deste experimento.

- Ao apoio institucional da Universidade Federal de Santa Maria.

- Ao Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas - LASERG.

- A CNPQ pelo incentivo e suporte.

O meu muito obrigado!

“Muitos homens devem a grandeza da sua vida aos obstáculos que tiveram que vencer”.

Charles H. Spurgeon

RESUMO

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM MECANISMO ROTATIVO PARA DESCOMPACTAÇÃO DE SOLO

AUTOR: Henrique Eguilhor Rodrigues

ORIENTADOR: Airton dos Santos Alonço

O presente trabalho buscou desenvolver e avaliar um mecanismo protótipo que apresente maior eficiência na mobilização do solo, uma alternativa aos implementos escarificadores e subsoladores, sobretudo visando reduzir o esforço tratorio e a demanda energética. O experimento foi realizado em uma área de propriedade da Universidade Federal de Santa Maria, localizada no município de Santa Maria/RS. O delineamento utilizado foi blocos casualizados, formados por 6 tratamentos em um esquema fatorial 2x3. Sendo esse composto por 2 mecanismos (protótipo e haste escarificadora) montados em um porta-ferramentas móvel em 3 velocidades de deslocamento (1,30, 1,60 e 1,90 m s⁻¹). Os resultados mostram que o desenvolvimento do protótipo no âmbito construtivo foi satisfatório, desempenhou a função para a qual foi designada sem apresentar avarias, validando-o com grande potencialidade de utilização, após aprimoramentos, e promissor método de descompactação. A geometria do protótipo favoreceu a redução da demanda de força (-62,1%) e potência (-67,7%) na barra de tração, entretanto, o consumo de combustível se comportou de maneira instável. A penetração das hastes do protótipo de acordo com o deslocamento do trator não proporcionaram maiores níveis de profundidade (-36,3%) e largura de sulco (-8,4%), resultando em média uma área de solo mobilizada menor (-36,4%). Após as operações a área de solo elevada pelo protótipo foi menor (-26,2%), evidenciando aptidão para manejos conservacionistas. O protótipo estabeleceu uma menor resistência específica operacional (-39,6%) e tração específica (-38,96%), no entanto, fatores externos às influenciaram proporcionando tais resultados, como penetração das hastes em camadas mais superficiais e menos adensadas quando comparada a haste escarificadora, além da gigantesca variabilidade do teor de água no solo da área experimental.

Palavras-chave: Máquinas agrícolas. Relação máquina-solo. Adensamento de solo.

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A ROTATING MECHANISM FOR SOIL UNCOMPACTATION

AUTHOR: Henrique Eguilhor Rodrigues

ADVISOR: Airton dos Santos Alonço

The present work sought to develop and evaluate a prototype mechanism that presents greater efficiency in soil mobilization, an alternative to scarifying and subsoiling implements, mainly aiming to reduce the traction effort and energy demand. The experiment was carried out in an area owned by the Federal University of Santa Maria, located in the city of Santa Maria/RS. The design used was randomized blocks, formed by 6 treatments in a 2x3 factorial scheme. This being composed of 2 mechanisms (prototype and scarifying shank) mounted on a mobile tool holder at 3 displacement speeds (1.30, 1.60 and 1.90 m s⁻¹). The results show that the development of the prototype in the constructive scope was satisfactory, it performed the function for which it was designed without showing any damage, validating it with great potential for use, after improvements, and a promising method of unpacking. The prototype's geometry favored the reduction in the demand for force (-62.1%) and power (-67.7%) in the drawbar, however, fuel consumption behaved in an unstable way. The penetration of the prototype rods according to the displacement of the tractor did not provide greater levels of depth (-36.3%) and furrow width (-8.4%), resulting in an average smaller mobilized soil area (-36.4%). After the operations, the soil area raised by the prototype was smaller (-26.2%), showing aptitude for conservation management. The prototype established a lower specific operational strength (-39.6%) and specific traction (-38.96%), however, external factors influenced them, providing such results, such as penetration of the rods in more superficial and less dense layers when compared the scarifying rod, in addition to the gigantic variability of the water content in the soil in the experimental area.

Keywords: Agricultural machinery. Machine-ground relationship. Soil densification.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Proporção dos sistemas de preparo do solo no Brasil.....	29
Figura 2 - Representação do processo de desagregação do solo com o implemento de hastes.....	40
Figura 3 - Característica dos perfis de hastes de escarificadores e subsoladores.....	40
Figura 4 - Parâmetros geométricos de ponteiros para escarificadores e subsoladores	41
Figura 5 - Área de solo mobilizada de acordo com a presença ou ausência de asas na ponteira.....	42
Figura 6 - Representação da mobilização do solo por ponteiros com asas e sem asas.....	42
Figura 7 - Força média obtida na barra de tração (<i>a</i>) e consumo horário de combustível (<i>b</i>) para tracionar o elemento comercial e experimental.....	43
Figura 8 - Esquemática do rompimento simultâneo de camadas compactadas de solo.....	44
Figura 9 - Força média na barra de tração com duas e três hastes para os melhores resultados comparados a testemunha.....	45
Figura 10 - Resultados da força média na barra de tração para sulcador de semeadora-adubadora com e sem disco de corte liso.....	46
Figura 11 - Força média na barra de tração e consumo horário de combustível para o conjunto trator-semeadora de três linhas.....	47
Figura 12 - Município de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.....	52
Figura 13 - Localização espacial da área experimental.....	53
Figura 14 - Método de coleta de amostra seca utilizado no experimento (<i>a</i>). Penetrômetro utilizado no experimento (<i>b</i>).....	54
Figura 15 - Conjunto trator e EPFM.....	62
Figura 16 - Estrutura Porta Ferramentas Móvel desenvolvida por Gassen (2011).....	64
Figura 17 - Materiais que compõe o projeto.....	65
Figura 18 - Torneamento realizado na extremidade da barra aço cilíndrico (<i>a</i>); Conformação de duas seções de barra chata de aço em um círculo (<i>b</i>)...	66
Figura 19 - Composição do cilindro (<i>a</i>); arranjo e ordenamento de 45° entre hastes (<i>b</i>); espaçamento entre duplas de hastes (<i>c</i>); estrutura final do projeto (<i>d</i>)	67
Figura 20 - Projeto fixado à EPFM.....	67

Figura 21 - Haste de escarificador utilizado como comparativo no estudo.....	68
Figura 22 - Fluxômetro utilizado para determinar o consumo de combustível (a); engrenagens no interior do fluxômetro que geram pulsos elétricos (b)...	69
Figura 23 - Definição de valor utilizado na equação do consumo horário de combustível.....	70
Figura 24 - Instrumento célula de carga do tipo “S” utilizada no experimento.....	70
Figura 25 - Esquematização com o sensor e a roda dentada para mensuração de rotação dos rodados motriz.....	72
Figura 26 - Dispositivo de armazenamento de dados.....	72
Figura 27 - Esquematização do <i>datalogger</i> e sensores no trator (vista superior).....	73
Figura 28 - Perfilômetro. Exemplo de utilização no campo (a); Exemplo de marcação em folha de papel milimetrado (b).....	74
Figura 29 - Mecanismo desenvolvido para a mobilização do solo.....	75
Figura 30 - Estrutura porta ferramenta móvel (EPFM) e projeto de mecanismo desenvolvido.....	76
Figura 31 - Peso exercido sobre eixo do protótipo.....	77
Figura 32 - Deformação total em milímetros da haste penetradora.....	79
Figura 33 - Médias de Índice de Cone em função da profundidade.....	81
Figura 34 - Tendência da demanda de força de tração em função da velocidade....	85
Figura 35 - Tendência da demanda de potência na barra de tração em função da velocidade.....	86
Figura 36 - Tendência do Consumo horário de combustível em função da velocidade.....	89
Figura 37 - Tendência do Patinamento dos rodados motrizes em função da velocidade.....	91
Figura 38 - Perfil do solo. Haste escarificadora (a) e protótipo (b).....	95
Figura 39 - Zona de atuação da haste em que o protótipo não alcançou. Médias de Índice de Cone em função da profundidade.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escarificadores produzidos no Brasil.....	48
Tabela 2 - Peso dos principais escarificadores produzidos no Brasil.....	49
Tabela 3 - Detalhamento dos tratamentos executados nos experimentos de campo.....	55
Tabela 4 - Especificações do trator.....	63
Tabela 5 - Instrumentos utilizados e as variáveis extraídas.....	69
Tabela 6 - Valores determinados das variáveis do solo.....	80
Tabela 7 - Resumo da análise de variância para as variáveis referentes às ferramentas haste e protótipo com as velocidades (1,30, 1,60 e 1,90 m s ⁻¹).....	83
Tabela 8 - Função matemática que descreve a demanda de força de tração para cada mecanismo.....	85
Tabela 9 - Função matemática que descreve a demanda de potência na barra de tração para cada mecanismo.....	87
Tabela 10 - Função matemática que descreve a demanda de combustível por hora para cada mecanismo.....	89
Tabela 11 - Função matemática que descreve o percentual de patinamento para cada mecanismo.....	91
Tabela 12 - Variáveis com efeitos significativos para ferramenta.....	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	HIPÓTESES	25
1.2	OBJETIVOS	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	SOLO AGRÍCOLA	26
2.2	PRÁTICAS CONSERVACIONAISTA NO PREPARO DO SOLO	27
2.3	A COMPACTAÇÃO DO SOLO	30
2.3.1	Causas da compactação do solo	30
2.3.2	Consequências da compactação do solo	33
2.4	MÉTODOS DE DESCOMPACTAÇÃO	36
2.5	ELEMENTOS DESCOMPACTADORES.....	39
2.6	EQUIPAMENTOS ALTERNATIVOS.....	49
3	MATERIAL E MÉTODOS	52
3.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	52
3.2	PLANO EXPERIMENTAL E ESTATÍSTICO	55
3.3	CONCEITOS DE FÍSICA DO SOLO.....	55
3.3.1	Resistência à penetração	55
3.3.2	Empolamento do solo	56
3.3.3	Teor de água	57
3.3.4	Porosidade total	57
3.3.5	Densidade	58
3.4	CONCEITOS DE ANÁLISE DE DESEMPENHO	58
3.4.1	Força na barra de tração	58
3.4.2	Potência na barra de tração	59
3.4.3	Resistência específica operacional	60
3.4.4	Consumo de combustível	60
3.4.5	Patinagem dos rodados motrizes	61
3.5	EQUIPAMENTOS	62
3.5.1	Trator	62
3.5.2	Estrutura Porta Ferramentas Móvel (EPFM)	63
3.5.3	Elementos descompactadores	64
3.5.4	Instrumentação	68
3.5.5	Consumo horário de combustível	69
3.5.6	Esforço tratório	70
3.5.7	Patinamento	71
3.5.8	Armazenamento de dados	72
3.5.9	Empolamento do solo	73
4	RESULTADO E DISCUSSÃO	75
4.1	PARÂMETROS DE PROJETO	75
4.2	CARACTERÍSTICAS DO SOLO E MATÉRIA SECA.....	80
4.3	ANÁLISE DA VARIÂNCIA	81
4.4	FORÇA DE TRACÇÃO	84
4.5	POTÊNCIA NA BARRA DE TRACÇÃO	86
4.6	CONSUMO HORÁRIO DE COMBUSTÍVEL	88
4.7	PATINAMENTO	90
4.8	VARIÁVEIS COM EFEITOS SIGNIFICATIVOS PARA FERRAMENTA	93
5	CONCLUSÃO	99

6	REFERÊNCIAS	100
	APÊNDICE A – MÉDIA DA RESISTENCIA À PENETRAÇÃO PARA AS UNIDADES EXPERIMENTAIS	117
	APÊNDICE B – PERFIL DA ÁREA DE SOLO ELEVADA, MOBILIZADA, PROFUNDIDADE E LARGURA DE SULCO	123
	APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA	126

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com extensa área cultivada e um dos líderes na escala de produção. Em 2019/2020 o Brasil obteve uma produção recorde de grãos ultrapassando os 250 milhões de toneladas, utilizando uma área aproximada de 65,6 milhões de hectares (CONAB, 2020). Em uma projeção da safra agrícola 2020/2021, mostra que a produção brasileira está estimada em 271,7 milhões de toneladas em uma área de 68,3 milhões de hectares, novamente atingindo patamares superiores aos outros anos (CONAB, 2021).

Com decorrer dos anos, o avanço da tecnologia no que tange a área das ciências agrárias, houve uma grande modernização na mecanização. A agricultura brasileira passou por consideráveis mudanças nos últimos anos, impulsionando a exportação e colaborando para o crescimento da economia do Brasil (TEIXEIRA, 2005).

Com todas as qualidades e vantagens da inovação no setor agrário, também houve algumas desvantagens, como o excesso de peso das máquinas ligado ao mau uso, práticas de cultivos inadequadas ou ultrapassadas e, sobre tudo um mau manejo e conservação do solo. Todos esses fatores afetam diretamente na compactação do solo. Holtz & Kovacs (1981) definiram a compactação do solo como o adensamento dos solos por meio da aplicação de energia mecânica. Outra definição de compactação foi dada por Curi et al. (1993), que define como a redução do volume do solo e a diminuição da porosidade.

As etapas de um sistema de produção agrícola consistem basicamente no manejo do solo (preparo e correção química), implantação da cultura, cultivo, retirada da produção e beneficiamento ou processamento. O manejo são as diversas intervenções e operações realizadas para melhorar as condições visando à semeadura, o desenvolvimento e uma maior produtividade de alimentos. Não é uma ação permanente, de modo que, ao longo de cada novo cultivo o manejo se faça presente (SILVA, 2014; SALVADOR et al., 2008).

Os diversos métodos de manejos na propriedade são capazes de gerar um adensamento de maior ou menor intensidade, em consequência a isso, um grande potencial em influenciar negativamente na resistência mecânica à penetração, crescimento radicular, porosidade, densidade do solo, absorção de água e nutrientes, levando por fim, um decréscimo significativo na produtividade das culturas (FREDDI et al., 2007).

O resultado da relação entre altas produtividades, tecnologia de sementes e máquinas, mostram que estão diretamente correlacionadas entre si, uma forma de buscar uma agricultura mais competitiva com um bom manejo conservacionista e ecossistêmico (FRANÇA NETO et al., 2016; BARUFFI, 2015).

A aplicação do sistema plantio direto ocasionou benefícios em questões ambientais e econômicas, colaborando para o crescimento da produção de grãos no Brasil. No entanto, a compactação do solo é um sério problema, o qual perturba aos produtores e os pesquisadores das ciências agrárias (NUNES, 2014). Deste modo, qualquer prática conservacionista, em que há a introdução de máquinas agrícolas, mesmo que de uma maneira não intencional, pode colaborar para a formação de uma camada de solo compactada.

A colheita mecanizada gerou diversos benefícios como a redução do custo de operação e a solução para problemas como a falta de mão de obra. Entretanto, em determinadas culturas acarretou o adensamento dos solos e é um tema que está dia após dia no centro das atenções, por avançar de maneira preocupante com consequências negativas na produtividade e prejuízos financeiros (SEVERIANO et al., 2010; SEIXAS e OLIVEIRA JUNIOR, 2001).

A compactação do solo, seja por pé de arado, pé de semeadura direta ou mesmo tráfego de animais e máquinas agrícolas, é um problema nas áreas cultiváveis em nível mundial, o que limita a qualidade física do solo e a produtividade (RICHART, 2005).

Existem diversos estudos (ROQUE et al., 2010; GIRARDELLO et al., 2014; KOCHHANN et al., 2000; KLEIN, 2014) que mostram os efeitos e causas do adensamento de solo, o certo é que este efeito é um resultado de diversos fatores e práticas utilizadas por produtores, como citado anteriormente, detalhes que podem interferir no resultado final da produção.

A agricultura está dia após dia mais competitiva, em busca de maiores produtividades em menores áreas com menores custos. E tais podem provocar grandes perdas financeiras.

Atualmente em sua grande maioria, são utilizados no processo de descompactação do solo implementos como escarificadores e subsoladores. O uso de cada equipamentos varia de acordo com a profundidade da camada compactada (SEKI et al., 2015; NICOLOSO et al., 2008; GASSEN et al., 2014). Geralmente adotam-se o uso de escarificadores para profundidades de até 0.30 m e subsoladores para maiores profundidades. Entretanto, as operações com esses implementos exigem uma alta demanda de tração, e conseqüentemente um alto consumo energético (BELLÉ et al., 2014; GASSEN et al., 2014; MACHADO et al., 2015). Apesar de essas ferramentas demandarem maiores custos operacionais, se faz necessário o seu uso para evitar maiores perdas financeiras e ambientais.

Desta maneira, o presente estudo teve por objetivo desenvolver um protótipo que opere como descompactador de solo, com geometria diferente dos implementos escarificadores e subsoladores. Sobretudo, avaliar e comparar o seu desempenho no que tange a mobilização de solo, requerimento energético e esforço tratório.

1.1 HIPÓTESES

- I. Se o princípio de funcionamento do implemento favorece a uma redução de tração, então haverá uma redução na potência média na barra de tração e do consumo horário de combustível;
- II. O implemento proposto em operação promove diversas penetrações no solo por metro quadrado através das hastes, se a quantidade de penetrações no solo proporciona maiores níveis de profundidade e larguras de sulco, então o mecanismo apresentará maior volume de solo subsuperficial mobilizado;
- III. Se o princípio de funcionamento do protótipo reduz a força de tração e as diversas penetrações no solo pelas hastes mobilizam um volume de solo semelhante aos implementos já existentes, então o mecanismo desenvolvido apresentará uma resistência específica operacional menor;
- IV. A força de tração específica é a demanda de tração necessária para movimentar uma ferramenta horizontalmente em razão de determinada profundidade, se o protótipo apresentar uma demanda na relação de força de tração por nível de profundidade menor, então o mecanismo oferecerá maior eficiência de operação;
- V. Se o protótipo apresentar redução nas variáveis força de tração específica e resistência específica operacional quando comparado a haste, então o projeto desenvolvido terá melhor desempenho operacional que os implementos de hastes;
- VI. Se após as operações a área de solo elevada pelo protótipo for menor que a haste, então o mecanismo projetado evidenciará maior aptidão no que diz respeito a manejo conservacionista;

1.1 OBJETIVO

Desenvolver um mecanismo com a função de promover a descompactação do solo, avaliando o seu desempenho por meio da determinação do seu esforço tratório e requerimento energético, comparando-o às ferramentas já existentes no mercado capazes de realizar a mesma função. Além disso, avaliar parâmetros de projeto e fornecer informações a indústria sobre o seu desempenho operacional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLO AGRÍCOLA

Quando o uso do solo agrícola é intensificado, conseqüentemente, a qualidade física e a hídrica são modificadas, reduzindo sua aptidão e na maioria das vezes, influenciam de forma negativa o crescimento das plantas (SANTOS, 2010a). Segundo o mesmo autor, essas alterações são mais evidentes quando comparados aos métodos de uso do solo sob vegetação natural.

Beutler et al., (2006) cita que apesar da utilização significativa de fertilizantes e defensivos terem uma grande influência na produtividade das culturas, há um limitante considerável na produção em razão da compactação, com efeitos causados nas plantas, tais como: aeração deficiente, impedimento mecânico no crescimento das raízes e redução na taxa de absorção de água e nutrientes.

Por vezes, o cuidado com o solo é deixado de lado, mesmo sendo um dos recursos naturais mais relevantes para a maioria das espécies, a produção de alimentos é apenas uma das diversas funções realizadas pelo solo GUBIANI & REINERT (2019). Os autores destacam, ainda, que a descompactação pode ser útil mesmo não havendo resultado imediato na produção, ou seja, tal operação pode ser refletida a médio ou longo prazo, com melhorias mais intensas no solo, tornando-o mais estável.

Há um grande estudo e avanço tecnológico no que diz respeito a tecnologias de máquinas, sistemas de irrigação e, inclusive, no âmbito de sementes. Em razão da maneira com que a agricultura é modernizada, produtores encontram dilemas no manejo e na conservação do solo de suas propriedades, tendo como objetivo o uso intensivo do solo e, por vezes, não sendo coerente com práticas conservacionistas (AUDEH et al., 2011). Eles salientam que um dos fatores mais significativos para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável é a qualidade do solo, o conhecimento e a conscientização que os produtores adquirem a respeito da sua utilização, associada ao bom manejo, esses são os primeiros passos para a preservação do meio ambiente.

É sabido que o solo adensado afeta diretamente a relação física, química e biológica, e conseqüentemente influencia diretamente no desenvolvimento da cultura implantada. Todo investimento financeiro em tecnologias, inclusive o esforço físico no labor do dia a dia, na busca por altas produtividades, é prejudicado por detalhes como a compactação do solo (COMPAGNONI, 2013).

Ao descompactar o solo, de maneira mecânica ou biológica, ocorre a diminuição da sua densidade e o aumento do índice de vazios, ou seja, um maior número de macro e microporos (NICOLOSO et al., 2008). O produtor, tendo em vista resultados financeiros favoráveis, para um maior rendimento na produção, está sempre na busca por melhorias, seja no manejo, seja até mesmo na qualidade do serviço, ainda que se façam necessários investimentos em máquinas e implementos (ARTUZO et al., 2015; ERENO, 2008).

Segundo Vian (2009) Os agricultores, com objetivos de alavancar o nível de produção e de vendas, associados ao aumento de programas de crédito rural, estão em busca de mais investimentos na produção. Ele ressalta que tal processo gera um aumento na demanda de máquinas e implementos agrícolas, como efeito as indústrias direcionam recursos e investimentos no desenvolvimento e na área de pesquisa, visando aperfeiçoar o desempenho de seus produtos.

2.2 PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS NO PREPARO DO SOLO

Há evidências de que o homem pratica a agricultura há pelo menos dez mil anos (FELDENS, 2018; KAMIYANA, 2011; MAZOYER & ROUDART, 2010). Existem grupos de arqueólogos que acreditam ter encontrado indícios de que a agricultura já era praticada há pelo menos vinte mil anos, ou seja, dez mil anos antes do que era imaginado (MAHER et al., 2011). Os autores ainda afirmam que tal prática não foi uma atividade de um pequeno grupo, mas que ocorreu em diversas povoações vizinhas.

Segundo Magalhães (2013), a época da transição na qual o homem passou de caçador coletor para agricultor sedentário ainda é motivo de grandes debates. Entretanto, o autor afirma que a capacidade de interferência humana sobre o ambiente e sobre o manejo na agricultura foi capaz de permitir que diferentes sociedades pudessem relacionar algumas culturas e técnicas, como sua própria formação cultural e histórica.

O homem Neanderthal vivia puramente da coleta de alimentos e caça de animais, havia um perfeito equilíbrio ecológico. À medida que os anos passaram, a espécie humana tornou-se numerosa, o seu espaço ambiental não supriu mais suas necessidades de alimentos, então começou a buscar soluções para o seu problema. A primeira delas foi a migração para outras regiões com mais abundância de água e comida, tornando esse o marco histórico do primeiro desequilíbrio ecológico provocado pelo homem (FELDENS, 2018).

Até os dias atuais, o homem sempre progrediu sucessivamente em causar danos ao ecossistema, tendo como resultado o desequilíbrio ambiental (SAMBUICHI et al., 2012).

Também é importante frisar que o homem, como nunca antes na história, comparado aos seus antepassados, está de tal maneira empenhado em preservar e harmonizar as práticas agrícolas com o meio ambiente, o que o torna mais consciente e lúcido perante os problemas ambientais causados até então (BUAINAIN et al., 2014; MORETTI & ZUMBACH, 2012).

Essa consciência dos produtores rurais os tem forçado a adotar práticas e manejos conservacionistas, inclusive na utilização de equipamentos e implementos que possam auxiliar no combate à degradação ambiental (SAMBUICHI et al., 2012).

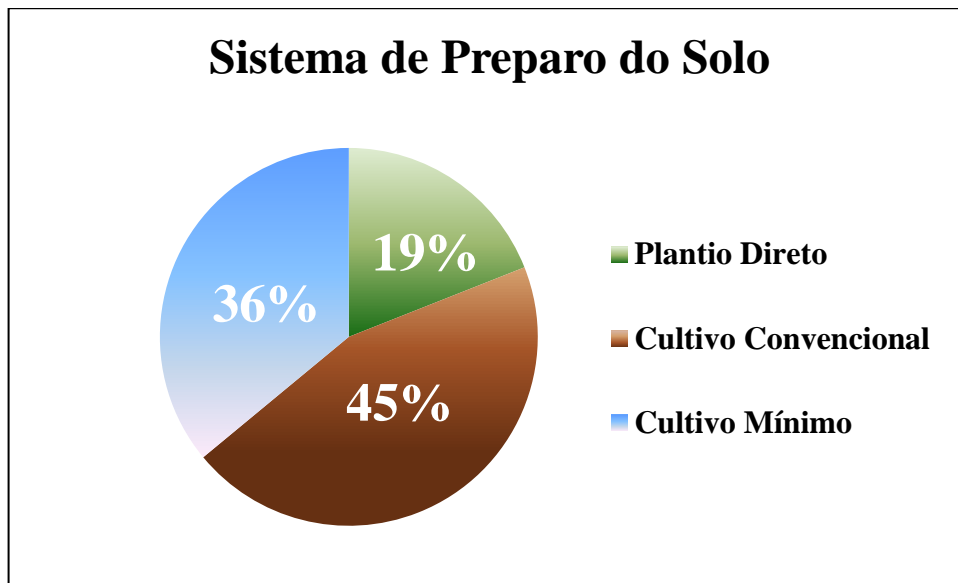
Um dos elementos mais suscetível à degradação causada pelo homem nas atividades agrícolas é o solo, sendo que Stefanoski et al., (2013) cita que o uso do solo com a agricultura tradicional é a que mais preocupa. Além disso, o manejo e o preparo é a atividade que mais exerce influência na qualidade física do solo. O autor cita ainda que a qualidade física do solo engloba a habilidade de manter, de maneira efetiva, as funções ambientais e/ou funções ecossistêmicas essenciais à saúde do ecossistema.

Segundo o Censo Agro (2017), no Brasil, o preparo do solo, em sua grande maioria, ainda é da maneira convencional como mostra a Figura 1.

O sistema convencional consiste no preparo primário do solo (operações iniciais de mobilização do solo), identificado pela teoria geral da aração a qual prevê que o arado realizará o corte de uma fatia do solo retangular chamada leiva, a elevação e o faturamento da mesma, volteando-a até uma nova posição. Posteriormente é feito o preparo secundário do solo, utilizando-se normalmente uma grade para nivelar e destorroar a superfície da camada de solo que sofreu o preparo primário, com a ideia de adequá-lo ao recebimento das sementes, de forma a permitir o pleno desenvolvimento produtivo da cultura (Machado et al., 2005).

Além disso, promove o corte e o enterro de plantas daninhas, auxiliando no controle de pragas e patógenos do solo (LISBOA et al., 2012; GABRIEL FILHO et al., 2000).

Figura 1 – Proporção dos sistemas de preparo do solo no Brasil.



Fonte: Adaptado de Censo Agro 2017/IBGE.

Ao longo do tempo, as consequências decorrentes do preparo convencional foram sendo percebidas, não apenas no solo, mas também em todo o ambiente. O preparo da maneira convencional, quando mal realizado, pode gerar grandes impactos na estrutura do solo, reduzindo os níveis de matéria orgânica, limitando a infiltração de água, gerando, ao longo do tempo, camadas compactadas e provocando erosão. Além do mais, tende a inviabilizar o desenvolvimento e até mesmo o cultivo de determinadas espécies (ORMOND, 2013; LISBOA et al., 2012;).

Wünsche & Denardin (1980) afirmam que a erosão do solo é o resultado lógico de uma exploração agropecuária inadequada. O preparo convencional, além de todo o infortuno decorrentes da sua aplicação, também é o sistema que mais exige energia. Em outras palavras, é o método de preparo do solo que mais desperdiça energia (RIQUETTI, 2011; SALVADOR et al., 2010; FERNANDES; SILVEIRA; RINALDI, 2008).

A agricultura em bases conservacionistas demanda uma agricultura permanente, isto é, em todas as atividades e operações agrícolas, deve-se objetivar a conservação do meio ambiente e, como resultado, também do solo, tendo em vista que a conservação do solo é a soma de todas as práticas agrícolas e pecuárias que visam conservar sua fertilidade e inibir o seu esgotamento progressivo (WÜNSCHE & DENARDIN, 1980).

Para uma agricultura sustentável três pilares da sustentabilidade devem ser fortalecidos: o ambiental, o social e o econômico. A adoção de práticas sustentáveis

proporcionaria a conservação de recursos naturais e a produtividade agrícola ao gerar menores impactos ao meio ambiente e, por conseguinte, potencializar a produção com um mínimo de insumos extras. Já com relação a parte social e econômica, haveria satisfação das necessidades da humanidade, com alimentos e renda, haja vista, atender às necessidades sociais das famílias e das comunidades rurais (BARRETO, 2007).

2.3 A COMPACTAÇÃO DO SOLO

2.3.1 Causas da Compactação do Solo

Com o expressivo crescimento do número de máquinas e implementos agrícolas associadas ao tráfego indiscriminado sobre as áreas cultiváveis, excesso de carga animal, métodos de manejos inadequados e até mesmo precipitações em solo descoberto, ocorre um efeito negativo, a compactação de camadas de solo, sejam superficiais ou subsuperficiais.

O adensamento de solo é um processo em que há uma redução de volume quando uma pressão externa é aplicada. O solo e suas propriedades físicas têm sofrido um efeito adverso devido à compactação, consequência gerada pela pressão que atua sobre sua superfície por inúmeras razões, tais como: pisoteio de animais, fluxo de máquinas agrícolas e por diferentes métodos de manejo (KUNZ et al., 2013). Além disso, milhões de hectares de terras agrícolas estão reduzindo a qualidade física do solo em consequência aos efeitos da compactação a qual estão sendo expostos. Tal efeito negativo ocorre em nível mundial e é considerado como um dos principais obstáculos para elevadas produtividades (LIMA, 2004).

Segundo Zonta et al. (2012), o impacto das gotas de água no solo gera uma camada superficial compactada, denominada encrostamento superficial. Tal efeito é causado pela quebra dos agregados devido à força mecânica do impacto das gotas da chuva no solo, sendo uma resultante de processos complexos e dinâmicos, de modo que ocorre a consolidação e o rearranjo das partículas do solo em uma estrutura coesa.

A compactação da superfície do solo, gerada pela formação de crostas, diminui consideravelmente, a proporção de infiltração de água (SILVA, 2007). Zonta et al. (2012) reforçam o entendimento ao citar que o encrostamento superficial pode apresentar espessura que varia entre 0,1 e 50,0 mm. Entre as implicações que influenciam nas propriedades físicas do solo, estão a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica. Segundo Zonta et al. (2012), a taxa de infiltração para solos sem cobertura reduz-se em 75%, comparada aos solos com cobertura.

Tamanhas consequências, além da redução do teor de água no solo, provocam tanto o aumento tanto do volume quanto da velocidade do escoamento superficial da água.

As máquinas agrícolas são um dos principais fatores que contribuem para a produção de alimentos no mundo. Além disso, permitiram a produção em grande escala com a expansão das áreas cultivadas e o aumento da produção, o que trouxe um pico extraordinário na produtividade do trabalho quando comparado ao trabalho humano e animal (ARAÚJO, 2004). As máquinas agrícolas que estão dia após dia em constante desenvolvimento promoveram e ainda promovem uma melhor qualidade de serviço e menor esforço físico do trabalhador rural.

Entretanto, há um aspecto negativo a ser levado em consideração. O uso indiscriminado desses elementos sobre as áreas cultiváveis pode gerar problemas como a compactação do solo (CUNHA; CASCÃO; REIS, 2009). Silva (2015) cita que com a introdução da mecanização no sistema agrícola, o tráfego de máquinas em operações como no preparo do solo, plantio, tratos culturais e colheita estão progressivamente causando problemas de adensamento de solo.

Segundo Silva et al. (2003) o frequente movimento dos rodados de máquinas sobre as áreas agrícolas, têm provocado alterações nos atributos físicos e mecânicos do solo. O autor cita ainda que o contínuo aumento das cargas externas associadas à inflação inadequadas dos rodados contribui ainda mais para a degradação das camadas do solo. Rodrigues et al. (2020) realizaram um estudo evidenciando a compactação do solo em relação à pressão de insuflação dos pneus de um trator agrícola. Eles concluíram em sua análise que, com o aumento da pressão de insuflação, ocorre o aumento significativo da pressão que o pneu exerce sobre o solo.

Ferreira (1998) afirma que o peso da máquina, área de contato, umidade, tipo de solo e o número de vezes que ocorre o tráfego no local, combinados, ampliam ainda mais os impactos ambientais relacionados ao solo. Klein e Libardi (2002) reiteram citando que o fluxo excessivo e indiscriminado de máquinas agrícolas em diferentes condições de umidade é a principal causa da compactação. Eles afirmam ainda que, tal efeito causa a diminuição dos poros, sendo os macroporos os mais afetados, os quais influenciam nas propriedades físico-hídricas.

Esta consequência, causado pelo fluxo de máquinas e implementos agrícolas, pode promover um aceleração na erosão e queda de produtividade (FERREIRA, 1998). O fato é que, embora de maneira involuntária, ao introduzir máquinas e implementos agrícolas em áreas cultiváveis, mesmo que minimamente, ocorre um adensamento de solo.

O efeito de adensamento do solo causado pelo pisoteio animal pode ser observado nas camadas de zero a 10,0 cm (LANZANOVA, 2005). O nível de compactação gerado pela pressão das patas dos animais sobre o solo pode ser duas vezes maior do que a pressão exercida pelas rodas do trator (SOUSA; SILVA; RESENDE, 1998). O efeito é agravado ainda mais pela perda de cobertura, causada pelo impacto do pisoteio, e na retirada da vegetação pelos animais no pastejo, o que influencia na diminuição da taxa de infiltração, crescimento radicular das plantas e aumento da potencialidade de erosão (MARCHÃO et al., 2009).

Segundo Vzootto; Marchezan e Segabinazzi (2000), o pisoteio dos animais ocasiona redução da porosidade total e aumento da densidade do solo. Eles citam ainda que o dano ocorre em maior grau nos primeiros 5,0 cm. Kunz et al. (2013) também afirmam que alterações no sistema poroso, conseqüentemente, alteram as propriedades físicas do solo com reflexos no seu movimento de ar e de água nas camadas superficiais.

As espécies bovina, equina e asinina são as que apresentam maior nível de pressão, enquanto que a espécie caprina produz apenas 77,5% quando comparada a essas espécies (SOUSA; SILVA; RESENDE, 1998). Esse efeito pode ser ampliado de acordo com a carga animal, intensidade de pastejo, teor de umidade, cobertura e características do solo (MARCHÃO et al., 2007).

Machado et al. (2005) indicam que o pé de arado vem a ser uma camada de solo compactada subsuperficialmente, originada pela passagem do arado sempre a mesma profundidade ao longo de vários anos, fazendo que o solo tenha diminuída sua capacidade de absorção e retenção de água, saturando-se rapidamente, prejudicando as plantas por falta de ar, visto que os poros vão estar ocupados por água. Também salientam que esta possibilidade de um rápido encharcamento do solo será uma agente facilitador para que a parte superior do solo, que é a mais fértil, seja carregada através do escorrimento superficial. Santiago & Rosseto (2020) também afirmam que o pé de arado é originado pelo uso excessivo e inadequado de implementos agrícolas como grade e arado, sendo que esse processo cria camadas sub e superficiais compactadas. Tal dano vem sendo observado sistematicamente em áreas cultiváveis, onde os sistemas convencionais de manejo do solo são predominantes (STONE; GUIMARÃES; MOREIRA, 2002).

Operações com grades niveladoras e destorroadora, ou seja, cortes em pouca profundidade podem gerar uma camada superficialmente adensada. Já as grades pesadas ou aradoras operam em profundidades, variando entre 10 a 20 cm, adensam a camada subsuperficial e formam o pé-de-grade com uma espessura aproximada de 5,0 cm (SILVA, 2020). Stone e Silveira (1999) realizaram um estudo sobre a atuação do sistema de preparo na

compactação do solo e concluíram que o sistema de preparo convencional propicia a formação de uma camada mais compactada entre 10 e 24 cm de profundidade. O pé-de-arado atua como agente de resistência física, sendo que esse efeito influencia tanto no crescimento das raízes como no favorecimento de erosão.

O Sistema Plantio Direto (SPD) baseia-se no não revolvimento do solo, permanência de uma cobertura vegetal e na rotação de cultura (SALTON; HERNANI; FONTES, 1998). O SPD, no qual ocorre o mínimo revolvimento, proporciona ao solo maiores teores de água em relação ao sistema de cultivo convencional e mínimo. Isso ocorre devido à manutenção dos resíduos culturais que conserva a temperatura do solo e reduz as taxas de evaporação (KUNZ et al., 2013).

O surgimento do SPD no Brasil ocorreu na década de 1970, em trabalhos e pesquisas realizados nos estados do Rio Grande do Sul e do Paraná (SALTON; HERNANI; FONTES, 1998). Cruz et al. (2020) citam que o sistema é uma técnica de cultivo conservacionista, de modo que dispensa o preparo convencional de aração e gradagem. Eles citam ainda que, embora tenha surgido décadas antes, a tecnologia do SPD no Brasil teve seu grande desenvolvimento a partir da década de 1990 e, atualmente, está altamente difundida entre os agricultores de todo o país.

Entretanto, há diversas situações com relatos de diminuição da porosidade e aumento da densidade do solo com o uso do SPD (STONE; GUIMARÃES; MOREIRA, 2002). Stone e Silveira (1999) identificaram que a técnica de semeadura direta ocasiona uma maior compactação entre 15 a 22 cm de profundidade. Já Klein & Boller (1995), em seus estudos sobre os métodos de manejos em áreas sob plantio direto, preconizam que, apesar dos benefícios provenientes do SPD, houve um aumento de densidade na camada superficial do solo entre 0 e 5,0 cm.

O simples fato de não haver revolvimento do solo no sistema de semeadura direta provoca um aumento de densidade. Essa compactação ocorre de maneira sistemática em áreas sob esse sistema, ocorrendo em maior intensidade nas laterais da lavoura conhecidas como “cabeceiras” e reduzindo aos poucos para o centro da área (SILVA et al., 2004).

2.3.2 Consequências da compactação

Mendonça et al. (2009) citam que há uma grande relação entre solos degradados e a compactação, ou seja, ao haver uma camada subsuperficial de solo compactada, a taxa de infiltração de água é reduzida. Eles afirmam ainda que em consequência disso, ocorre o

aumento do volume e da velocidade superficial da água sobre esses solos, podendo ainda propiciar a ocorrência de enxurradas.

Ao realizar o preparo do solo de maneira convencional, o material orgânico da superfície é incorporado; e o solo, na superfície, aos poucos, vai sendo degradado. Como resultado, a estrutura do solo torna-se mais suscetível ao transporte de sedimentos pelas enxurradas. Outro fator que contribui para a degradação é o fluxo horizontal de água, tendo em vista que tal processo irá descompor o horizonte A, rico em matéria orgânica (RACHWAL, 2003), extremamente importante no que se refere à produção agrícola. Além disso, com o decorrer do tempo, haverá erosões em grandes proporções (GILLES et al., 2009).

Mendonça et al. (2009) e Reichert, Suzuki & Reinert (2007), salientam que a compactação subsuperficial gera um aumento na aceleração do escoamento superficial, reduzindo a capacidade de infiltração e crescimento das raízes, aumentando o risco de erosão. Silva (2006) afirma que uma das principais implicações da erosão é o transporte de sedimentos causados pelo escoamento superficial, sendo transportada uma grande quantidade para leitos de rios e reservatórios, o que diminui, ao longo do tempo, a capacidade de armazenamento de água. Além disso, o autor aponta que a perda de solo agriculturável aumenta a tendência de enxurradas, gerando uma série de complicações de natureza social, econômica e ambiental.

Outros fatores negativos que ocorrem em decorrência da compactação é a redução na taxa de infiltração de água e redução da macro e microporosidade, que são os responsáveis pelo armazenamento e fornecimento de ar e água às plantas. (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). O solo é composto por sólidos (partículas minerais), líquidos (água) e gases (vapor de água e CO₂) (MELO & LIMA, 2007) e, ao ser compactado, ocorre uma redução no tamanho dos poros, aumentando a sua densidade, havendo mais massa de solo por unidade de volume, ou seja, o adensamento é em razão da compressão, causado pela retirada de ar gerado pelo manejo inadequado (FIGUEIREDO et al., 2000).

Segundo Ribeiro et al. (2007) há uma relação ideal de poros no que diz respeito à quantidade e à variação de diâmetros, tendo consequências diretas na produtividade das culturas, sendo essa uma condição fundamental na fertilidade do solo e que tem capacidade de influenciar diretamente na relação entre teor de água disponível, drenagem, temperatura, penetração das raízes, aeração e absorção de nutrientes. O Autor destaca ainda que, a distribuição e proporção dos poros do solo condicionam o seu comportamento físico-hídrico e a sua resistência à penetração, o que reflete diretamente na potencialidade agrícola.

Paiva (2007) cita que o crescimento da área foliar também está relacionado à sensibilidade da falta d'água. O autor afirma ainda que a deficiência hídrica influencia no desenvolvimento das culturas, o que acarreta alterações fisiológicas, bioquímicas e morfológicas, havendo variações de acordo com o estágio e período de desenvolvimento.

Em decorrência de camadas subsuperficiais compactadas, há o impedimento do crescimento das raízes, o que promove o surgimento de uma cultura com raízes em pouca profundidade (MAZURANA et al., 2013; BERGAMIN et al., 2010). Desse modo, além de se tornar suscetível ao déficit hídrico, também possuirá menor área na busca e absorção de nutrientes, aumentando assim a perda de rendimentos e prejuízos financeiros (BEULTER & CENTURION, 2004).

O solo, juntamente com a água, é um dos recursos naturais mais importantes para a maior parte das espécies, entretanto, é o mais degradado pelo ser humano. Silva (2006) aponta que o manejo inapropriado do solo traz implicações instantâneas, tendo em vista que ele é o suporte das culturas. Os efeitos como a redução da biomassa nativa e da produtividade é perceptível, o que reflete na produção das lavouras e, conseqüentemente, no rendimento financeiro ao produtor. O autor indica ainda que, anualmente, são perdidos milhões de toneladas de solo pela atuação hídrica.

As conseqüências geradas nas plantas a partir da compactação têm o seu início na limitação do crescimento radicular, tendo em vista que as raízes da cultura são o primeiro componente da planta a sentir os resultados da compactação (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

A resistência mecânica do solo à penetração é frequentemente utilizada para avaliar o estado de compactação do solo, tendo em vista sua praticidade e rapidez nas determinações (VALICHESKI et al., 2012). Segundo Sá e Santos Junior (2005), são considerados limitantes ao crescimento radicular medidas em torno de 2,0 MPa para culturas anuais, 2,5 MPa para pastagens e 3,0 MPa para espécies arbóreas. Entretanto, os autores reiteram que tais valores são apenas uma referência, uma vez que, varia num mesmo solo em função da densidade e da umidade, ou seja, esses fatores podem influenciar mostrando um falso diagnóstico.

Para Reichert, Reinert & Braida (2003) apesar de ser relacionado à condição estrutural, há indicativos nítidos de que o impedimento radicular é anulado ou reduzido quando o solo apresenta resistência à penetração igual ou menor que 2,0 MPa. De acordo com Taylor, Roberson, & Parker Junior (1966), usualmente são tomados como padrão valores próximos a 2,0 MPa, como limite crítico para o desenvolvimento das raízes da cultura.

Entretanto, diversos autores apontam que tais valores são apenas uma convenção tomada como referência a partir de estudos. Os próprios autores Sá e Santos Junior (2005) afirmam que as medidas tomadas como referencial podem variar de acordo com cultivares, variedades e culturas, podendo haver interferências no índice de cone, ou seja, apresentar variação no mesmo solo em função da umidade e da densidade. Eles citam ainda que há necessidade de maiores estudos para melhor quantificá-los.

Há diferença nos termos para definir o grau de influência da compactação na cultura: crítico seria um valor de resistência à penetração que retardaria o crescimento ou alguma função da planta; e restritivo ou limitante seria o valor de resistência de penetração que impede ou interrompe o crescimento ou função da planta (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Secco et al. (2009) citam que há dificuldade em estabelecer no campo a resistência do solo à penetração crítica, em razão de que a umidade do solo interfere diretamente na resistência à penetração. O aumento da umidade pode influenciar de maneira rápida uma possível condição de limitante para não limitante.

Genro Juniro, Reinert & Reichert (2004) também afirmam que os níveis críticos de resistência do solo para o desenvolvimento das raízes da cultura variam com o tipo de espécie cultivada e solo. Reichert, Suzuki & Reinert (2007) vão mais além e apontam que esses não são os únicos determinantes diretos, mas o ar, a água e a temperatura também podem influenciar diretamente.

2.4 MÉTODOS DE DESCOMPACTAÇÃO

As causas e as consequências da compactação, seus efeitos no solo, na cultura implantada e até mesmo ao meio ambiente foram apontadas. O tipo de manejo realizado por produtores tem capacidade de influenciar nas propriedades físicas do solo, podendo modificar a dinâmica do ar, de água e de solutos do solo (ABREU, REICHERT & REINERT, 2004). Nesse sentido, para evitar ou romper essas camadas compactadas, são utilizados dois principais métodos, o biológico por meio das raízes das plantas e o método mecânico, com a utilização de máquinas e implementos agrícolas (SANCHEZ, 2012). Abreu, Reichert & Reinert (2004) citam que o método mecânico é uma operação frequentemente utilizada por produtores para reduzir a compactação dos solos. Os autores salientam ainda que o método biológico é uma alternativa, ou seja, uso de plantas que tenham raízes profunda e agressiva, com capacidade de crescer nessas condições.

O procedimento de descompactação biológica de um solo está diretamente ligado a práticas de introdução de culturas que possuam sistema radicular que ocupem vazios da macroporosidade do solo, e - quando em decomposição - geram compostos orgânicos (KOCHHANN; DENARDIN; BERTON, 2000). Nicoloso et al. (2008) cita que no método biológico, são utilizadas plantas de cobertura com sistema radicular pivotante e bem desenvolvido, sendo o nabo forrageiro uma das espécies mais utilizadas já que possui eficiência e aptidão em crescer em solos compactados, formando bioporos estáveis a fim de melhorar os atributos físicos.

Segundo Barros & Jardine (2020) o nabo forrageiro é muito utilizado na descompactação do solo e na adubação verde, favorecendo um preparo biológico. O seu sistema radicular, por ser pivotante, pode atingir profundidades em média de 0,30 m (REINERT et al., 2008). Valicheski et al., (2012) avaliaram espécies de planta de cobertura na minimização dos efeitos da compactação do solo e concluíram que o cultivo da aveia e do nabo forrageiro reduziu os efeitos de adensamento causado pelo tráfego, sobretudo obtendo maiores produtividades de soja.

Cubilla et al. (2002) avaliou plantas de cobertura do solo como minimizador da compactação do solo em sistemas de plantio direto, eles constataram em mais de 85% das parcelas, que as plantas de cobertura e o nabo forrageiro foram capazes de ultrapassar a camada de maior estado de compactação. Francziskowski (2018) estudou o efeito da escarificação mecânica e biológica nas propriedades físicas de um Latossolo e concluiu em seu estudo, que o método mecânico e biológico de escarificação foi satisfatório para a mitigação da compactação até a camada de 0,30 m de profundidade. O autor cita ainda que as plantas utilizadas no experimento proporcionaram valores ideais para a macroporosidade do solo, acima de tudo, a combinação de duas espécies de famílias diferentes proporcionou maior eficiência.

Sanchez (2012) aponta que as culturas utilizadas como cobertura do solo desempenham uma importante função já que elas podem agir como subsoladores naturais, pois possuem sistema radicular agressivo capaz de romper camadas adensadas na subsuperfície. Além disso, o autor cita que essas espécies apresentam, em sua grande maioria, tolerância ao alumínio tóxico, rápido crescimento inicial e sistema radicular profundo e volumoso.

Quanto ao sistema de descompactação mecânica, Kochhann; Denardin; Berton (2000) descreve que o método está baseado no princípio da utilização de implementos de hastes, ou seja, o rompimento de camadas de solo compactadas por meio de máquinas e implementos agrícolas. Eles afirmam ainda que tais mecanismos operam em profundidades superiores a essas camadas, gerando o mínimo revolvimento superficial do solo.

Segundo Seki et al. (2015), a escarificação e/ou subsolagem do solo promove a redução da densidade e da resistência do solo à penetração, com a mínima mobilização, evitando que a palhada seja incorporada ao solo. Barros (2017) salienta que estas operações se destacam como uma alternativa, desde que recomendada após um diagnóstico confirmando as áreas compactadas.

Operações com o implemento escarificador de hastes permite a descompactação do solo, sobretudo favorece o aumento da porosidade de aeração e reduz a densidade e resistência à penetração (FRANCZISKOWSKI, 2018). Camara & Klein (2005) avaliaram a escarificação em plantio direto como uma técnica de conservação do solo e da água. Os autores concluíram nesta análise que a escarificação neste sistema reduziu a densidade e aumentou a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água no solo. Segundo Machado, Alonço & Baumhardt (2011), o rompimento de camadas compactadas através da escarificação e subsolagem trás diversos benefícios visíveis pela diminuição da densidade do solo, o que reduz a resistência à penetração das raízes; e o aumento no volume dos macroporos, melhorando a aeração e drenagem interna do solo. Os autores citam ainda que tais operações permite maior infiltração de água, na qual reduz o escoamento superficial e o tempo de encharcamento do solo.

Entretanto, Araújo et al. (2004) afirmam que apesar dos efeitos resultantes das operações de escarificação serem positivos, tais efeitos se estabelecem por um curto período de tempo. Drescher et al. (2016) realizaram um trabalho para determinar o tempo de duração do efeito da descompactação do solo pelo método mecânico, os tratamentos consistiram em 0, 6, 12, 18, 24, 30 e 36 meses após a operação de escarificação na profundidade de 0,25 m. os autores concluíram que a duração dos efeitos da escarificação mecânica nas variáveis densidade, porosidade total e macroporosidade é inferior a uma safra agrícola. Barros (2017) também avaliou os efeitos e duração da escarificação na descompactação do solo sob o sistema plantio direto, ele concluiu que os benefícios são transitórios, ou seja, esta não é uma operação eficiente a médio ou longo prazo, os efeitos significativos permanecem por um período de 390 dias. Silveira Junior et al. (2012) analisou a qualidade física de um Latossolo vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. Os autores

concluíram com base nas variáveis densidade do solo, porosidade, permeabilidade ao ar e continuidade de poros, que após 18 meses, o plantio direto, com ou sem as operações de descompactação, apresentou a mesma qualidade física.

Dessa maneira, apesar dos resultados permanecerem temporariamente, é visível a real necessidade do processo de descompactação do solo, seja ele pelo método biológico com introdução de plantas de cobertura, seja pelo método mecânico com a utilização de implementos como escarificadores e subsoladores, ou ainda associados.

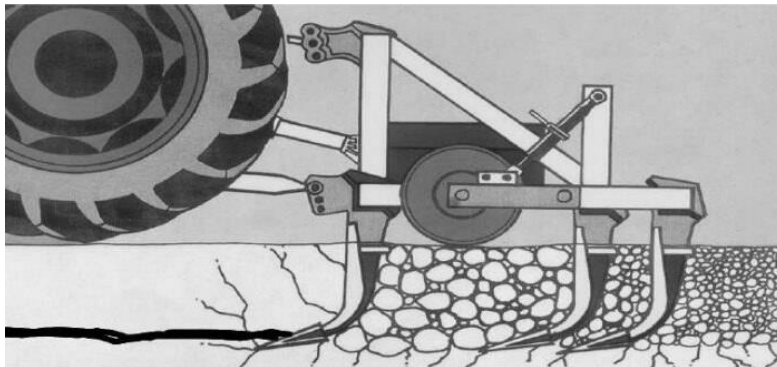
2.5 ELEMENTOS DESCOMPACTADORES

É sabido que um dos principais fatores que afeta a produção agrícola e conseqüentemente causa erosão e degradação do solo é o adensamento. Uma camada de solo compactada impede o crescimento das raízes das culturas implantadas, reduz a infiltração de água proveniente das precipitações, e conseqüentemente reduz o armazenamento e o fornecimento de água às plantas. O adensamento do solo aumenta o escoamento superficial da precipitação, gerando o processo de desagregação e transporte de partículas de solos pelos agentes erosivos.

Todos esses processos são ocasionados devido ao solo compactado podendo ao longo do tempo, proporcionar sua erosão. Dessa maneira, se faz necessário à utilização de implementos como escarificadores ou subsoladores e até mesmo hastes sulcadoras de semeadoras para romper essas camadas compactadas, visto que, a utilização desses implementos como elementos descompactadores varia de acordo com a profundidade da camada compactada.

Os implementos escarificadores e subsoladores são utilizados para desagregar camadas de solo compactadas (Figura 2), devido ao fato de apresentarem mínima mobilização superficial, são indicados para operações em áreas que contêm material vegetal sobre a superfície (MACEDO; MONTEIRO & SANTOS, 2016). Ribeiro (2005) também enfatiza que a principal função destes implementos com hastes é desagregar subsuperficialmente o solo. Ele destaca ainda, que são menos agressivos a estrutura do solo quando comparado aos que usam discos, de modo que não pulverizam demasiadamente os mesmos.

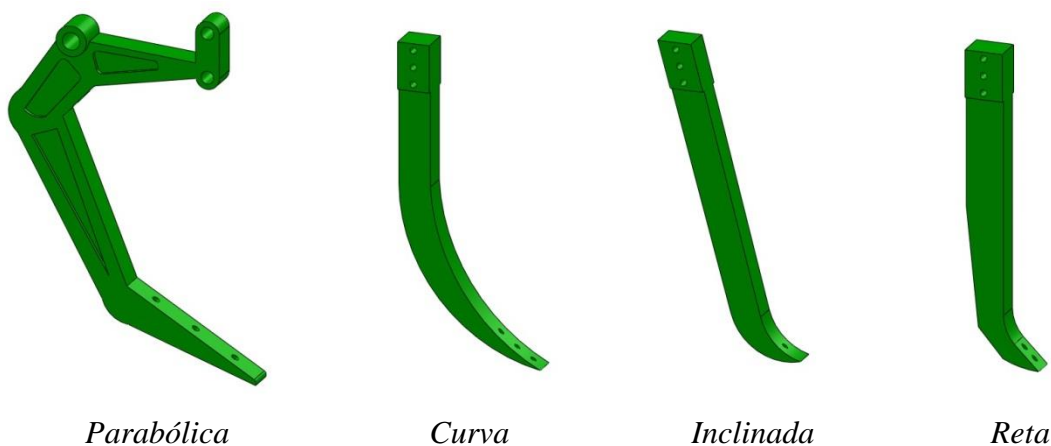
Figura 2 – Representação do processo de desagregação do solo com o implemento de hastes.



Fonte: Adaptado de Santos, J. (2012).

Segundo Furini (2018) as hastes de implementos escarificadores e subsoladores são estreitas e compridas, a fim de promover o rompimento do solo tridimensionalmente, ou seja, para cima, para frente e para os lados. Balastreire (2004) cita que o seu formato tem uma significativa influência na força de tração necessária para a operação, de modo que, é o principal componente de corte do solo até a profundidade de trabalho da ponteira. O autor salienta ainda que constitui-se de uma barra de aço plana com um formato que varia em função do fabricante, podendo ser parabólica, curva, inclinada e reta (Figura 3). Além disso, o requerimento de demanda de potência do trator ou por haste aumenta de acordo com esta sequência (SILVA et al., 2015).

Figura 3 – Característica dos perfis de hastes de escarificadores e subsoladores.

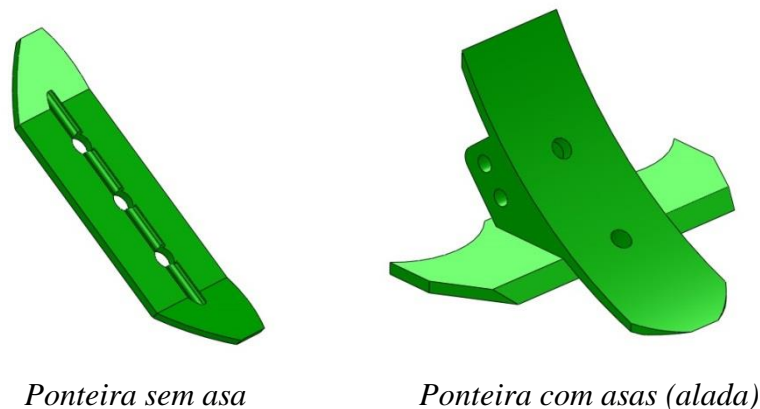


Outro componente primordial aos implementos escarificadores e subsoladores é a ponteira. Existem diversos formatos, podendo ainda ser classificadas em ponteiros com asas

(alada) e sem asas (Figura 4), tal variação de parâmetros geométricos interfere diretamente no desempenho das mesmas (MACHADO & CHANG, 1996). Silva et al. (2015) ressalta que a ponteira é o órgão ativo dos escarificadores e subsoladores, ela promove o rompimento do solo ao movimentar-se sob a superfície do mesmo. Além do mais, o autor afirma que para haver o rompimento tridimensional do solo, é importante trabalhar em profundidades entre cinco a sete vezes a largura da ponteira.

Balestreire (2004) indica que a ponteira é o órgão fundamental para a desagregação de um volume de solo a sua frente, tal volume desagregado é em função do teor de umidade. Isto é, em excesso de umidade, a ponteira apenas cortará o solo sem exercer consideráveis forças tridimensionais para desagregá-lo. Macedo, Monteiro & Santos (2016) citam que a água atua como um lubrificante ao operar em excesso de umidade, além de uma menor área mobilizada impede que a ponteira exerça sua função de fraturar o solo.

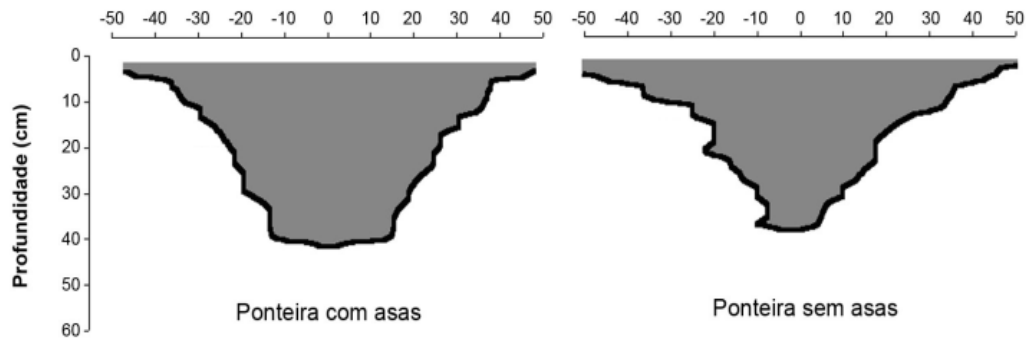
Figura 4 – Parâmetros geométricos de ponteiras para escarificadores e subsoladores.



Rosa et al. (2011) também enfatiza ao citar que a geometria da ponteira interfere diretamente no formato de ruptura do solo, além disso, dependendo do ângulo de ataque pode contribuir para uma compactação abaixo da linha mobilizada. Estes mesmos autores realizaram um estudo do efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira com ângulo de ataque de 20°, eles concluíram que com este ângulo de ataque da ponteira, ao invés de ocorrer compactação na soleira, houve a mobilização do solo, resultando em menor resistência mecânica à penetração. Machado e Chang (1996) avaliaram a influência da geometria no desempenho de ponteiras aladas de escarificadores. Os autores concluíram nesta avaliação, que as ponteiras com maiores ângulos de ataque apresentam uma tendência para maiores valores de força vertical e horizontal, além disso, maior área transversal de solo mobilizado. Sasaki, Gonçalves & Bentivenha (2005) estudaram o desempenho operacional de hastes

subsoladoras em função da ponteira. Eles destacam que apesar da ponteira com asas demandarem 18% maior de força de tração que a sem asas, esta porém, mobilizou em média uma área 25% maior de solo, como pode ser observado na Figura 5.

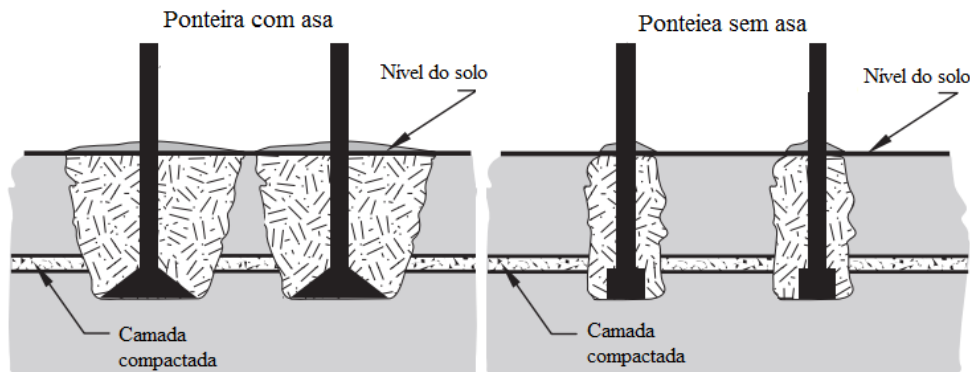
Figura 5 – Área de solo mobilizada de acordo com a presença ou ausência de asas na ponteira.



Fonte: Adaptado de Sasaki, Gonçalves & Bentivenha (2005).

Tal resultado se assemelha com o que afirmou Kees (2008), ao evidenciar que ponteiros alados nas hastes demandam maior requerimento de tração, no entanto, em sua grande maioria mobilizam uma área maior de solo quando comparada às ponteiros sem asas (Figura 6). O autor salienta ainda que as ponteiros com asas dispõem-se em diversos formatos e características física e quando colocadas atrás da borda dianteira da haste, tendem a reduzir o requerimento de tração.

Figura 6 – Representação da mobilização do solo por ponteiros com asas e sem asas.



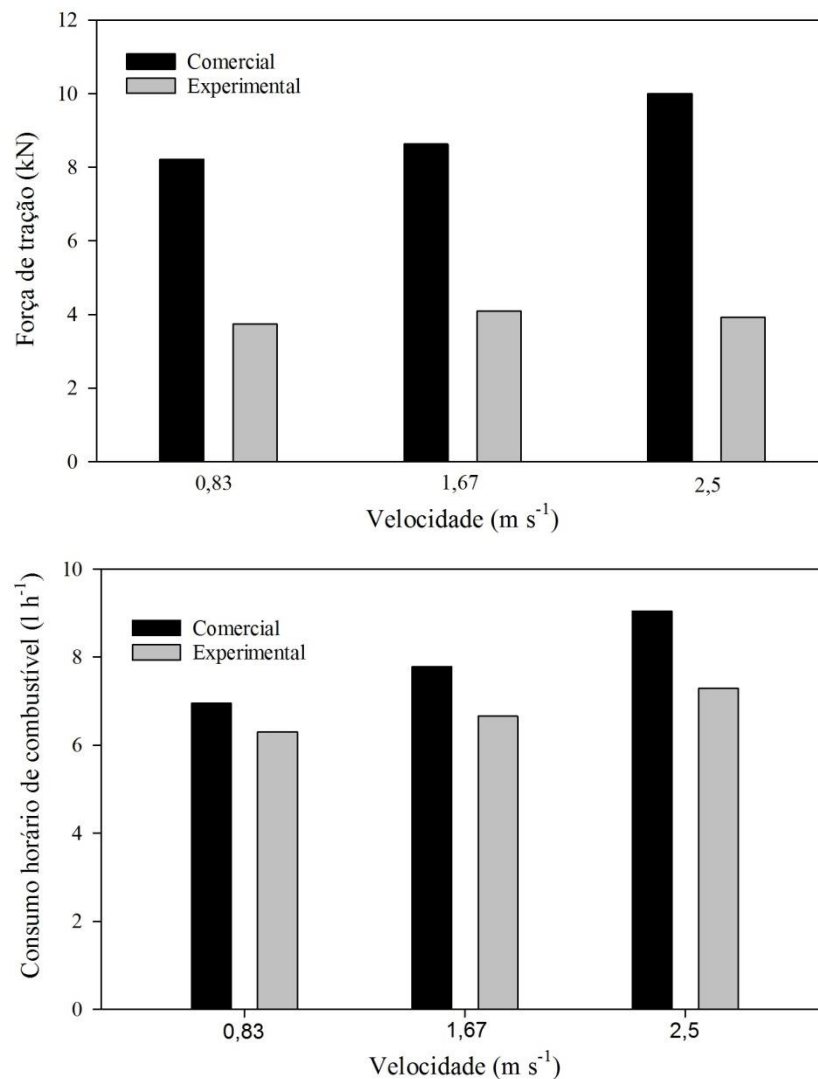
Fonte: Adaptado de Kees (2008).

Quanto a utilização de implementos com hastes ocorrem algumas desvantagens, geralmente as operações demandam um considerável nível de requerimento energético e esforço tratorio (MONTANHA, 2013). Bellé et al., (2014) realizaram um estudo acerca do consumo energético na utilização de escarificadores em sistemas de semeadura direta. As

análises foram baseadas na utilização de dois elementos descompactadores, sendo um comercial e outro experimental, ambos foram utilizados com e sem disco de corte de palha, em três diferentes velocidades (0,83; 1,67 e 2,5 m s^{-1}).

Os autores constataram que a presença do disco de corte à frente das hastes não alterou a força média na barra de tração, porém promoveu a redução do consumo horário de combustível. A Figura 7 mostra os resultados de força média na barra de tração e o consumo horário de combustível obtido no experimento com o disco de corte de palha.

Figura 7 – Força média obtida na barra de tração e consumo horário de combustível para tracionar o elemento comercial e experimental.

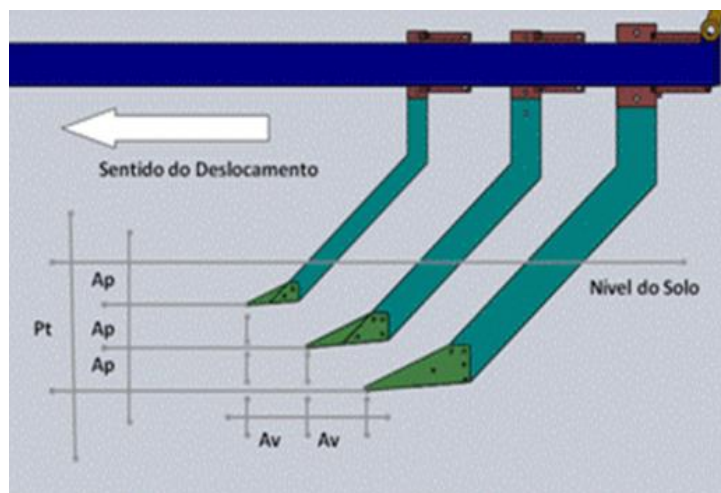


Fonte: Adaptado de Bellé et al., 2014.

O aumento da velocidade de deslocamento proporcionou o acréscimo da força média na barra de tração e o consumo horário de combustível. Em relação aos elementos descompactadores, o elemento experimental apresentou melhores resultados comparado ao comercial, reduzindo a força e a potência média na barra de tração.

GASSEN et al., (2014) também realizaram um estudo para analisar uma ferramenta que rompe, de maneira simultânea, as camadas de solo (Figura 8), baseados na seguinte ideia: se a profundidade de trabalho tem influência no desempenho do implemento, então é possível romper camadas simultâneas, assim melhorando a eficiência do equipamento.

Figura 8 – Esquematização do rompimento simultâneo de camadas compactadas de solo.

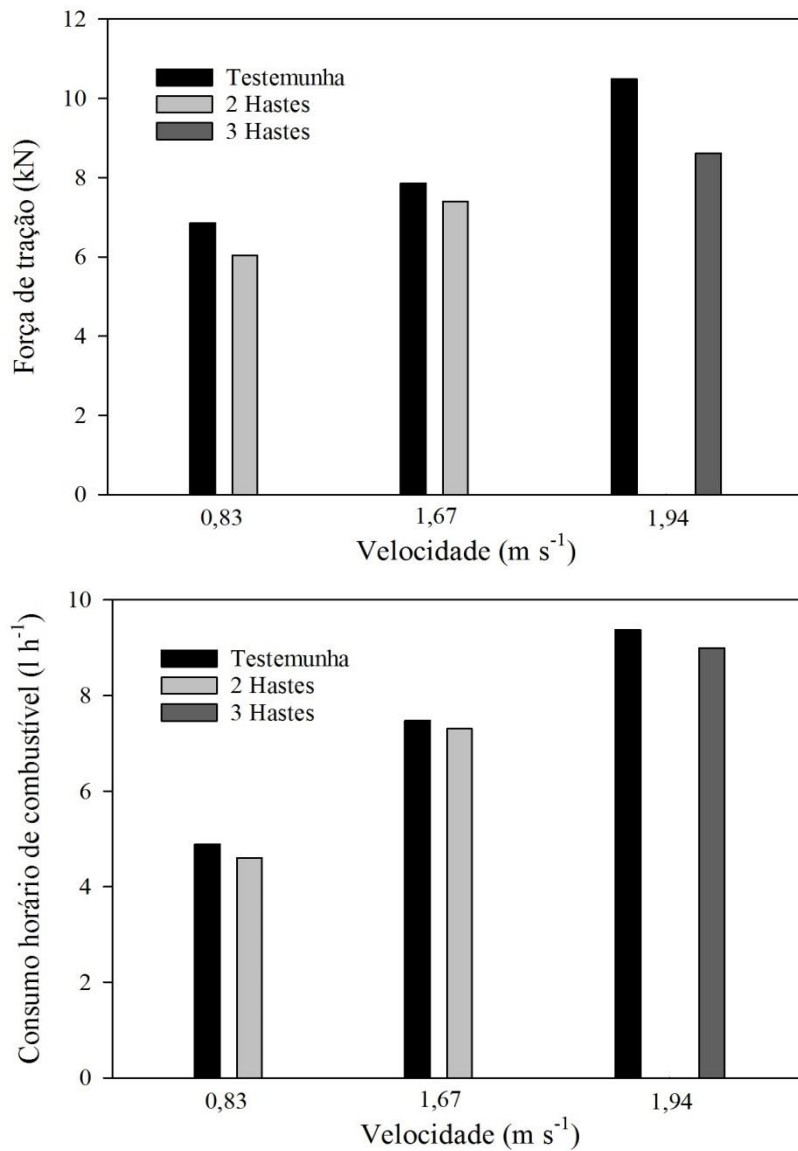


Fonte: Gassen et al., 2014.

O estudo foi fundamentado em dois níveis de aprofundamento (A_p) 0,10 e 0,15 m entre hastes. Para três hastes, foi utilizado o aprofundamento de 0,10 m entre hastes; e para duas hastes, o aprofundamento de 0,15 m, totalizando sempre um A_p de 0,30 m. Os níveis de avanço (A_v) são as distâncias horizontais entre as hastes foram em três níveis: 0,20; 0,30 e 0,40 m.

Como testemunha, foi realizada a operação com apenas uma haste e aprofundamento de 0,30 m. Todas as operações, inclusive a testemunha, foram realizadas em três diferentes velocidades (0,83; 1,67 e 1,94 $m s^{-1}$). O autor concluiu que há, em todos os níveis de velocidade (Figura 9), pelo menos um resultado abaixo do referencial testemunha.

Figura 9 – Força média na barra de tração com duas e três hastes para os melhores resultados comparados a testemunha.

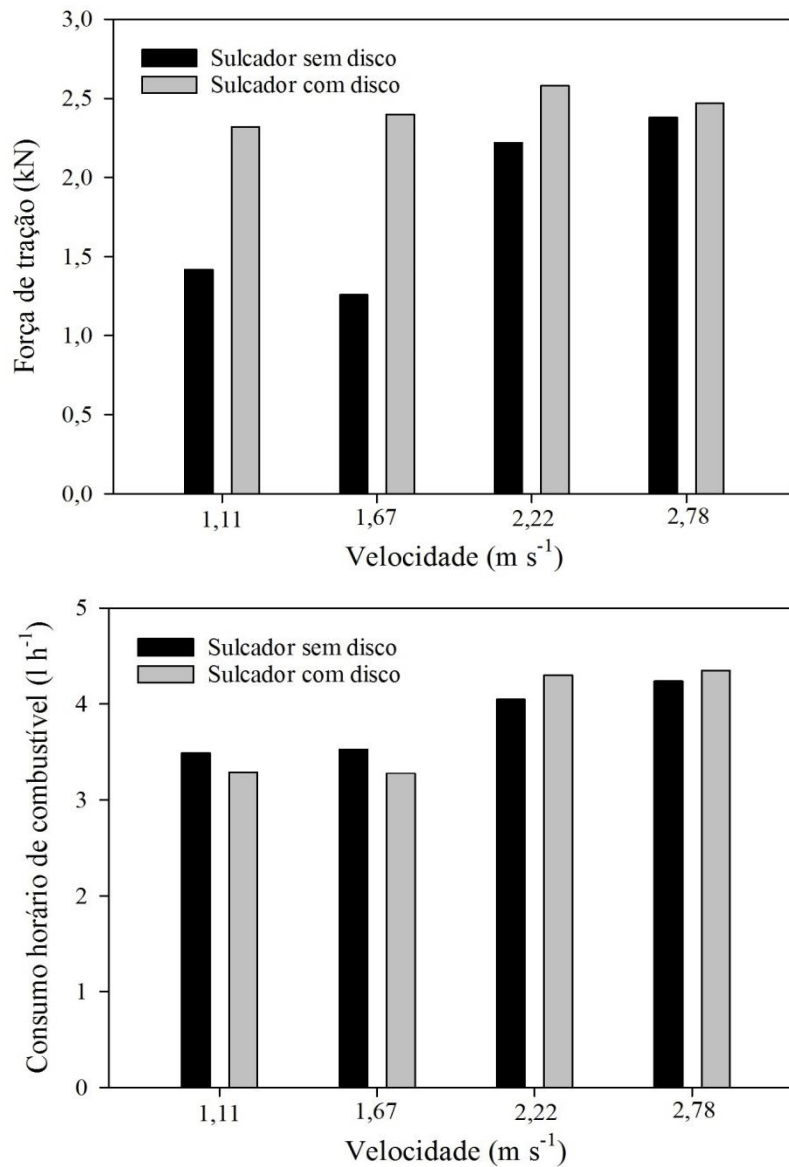


Fonte: Adaptado de Gassen et al., 2014.

FRANCETTO et al., (2016) avaliaram a força de tração e a potência demandada por mecanismos de corte e sulcadores de semeadora-adubadora. O trabalho objetivou estudar a interação entre diferentes discos de corte e sulcadores em função da velocidade (1,11; 1,67; 2,22 e 2,78 m s⁻¹), sendo que os sulcadores analisados foram o disco duplo desencontrado e haste sulcadora. Já os discos de corte observados foram o disco liso e o ondulado.

O sulcador de haste foi o mecanismo que apresentou maior exigência de força de tração (Figura 10). Além disso, ambos, ao serem combinados com os discos de corte, aumentaram o seu requerimento energético.

Figura 10 – Resultados da força média na barra de tração para sulcador de semeadora-adubadora com e sem disco de corte liso.



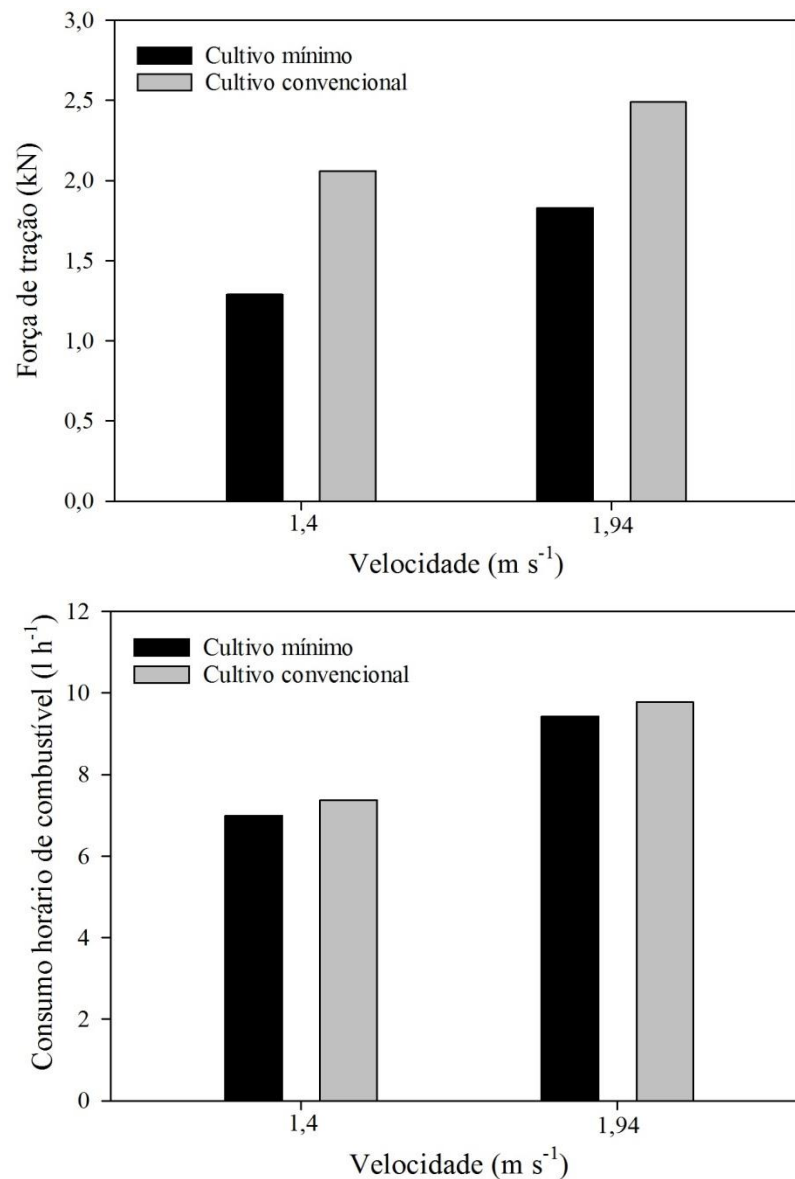
Fonte: Adaptado de Francetto et al., 2016.

RODRIGUEZ et al., (2018) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar o desempenho operacional do conjunto trator-semeadora de feijão. A análise foi baseada em dois sistemas de preparo do solo (Sistema Convencional e Sistema Cultivo Mínimo) associado a duas velocidades (1,40 e 1,94 m s⁻¹). Na metodologia de avaliação, foram utilizados dois tratores em forma de comboio e, por fim, uma semeadora de três linhas.

Quanto aos valores de força na barra de tração (Figura 11 a), o autor aponta que ambos foram alterados significativamente devido ao aumento da velocidade. O sistema de preparo do solo também influenciou significativamente a força e a potência na barra de tração,

apresentando valores mais altos para o sistema de cultivo convencional, fato esse causado pelo maior volume de solo mobilizado pelos órgãos da semeadora.

Figura 11 – Força média na barra de tração e consumo horário de combustível para o conjunto trator-semeadora de três linhas.



Fonte: Adaptado de Rodriguez et al., 2018.

O autor também destacou que, com o aumento da velocidade de 1,40 para 1,94 m s⁻¹ (Figura 11 b), o consumo horário de combustível aumentou significativamente. Foi evidenciado ainda que o sistema de cultivo interfere no consumo horário de combustível. O sistema de cultivo mínimo apresentou um menor consumo, devido à menor resistência ao rolamento.

É perceptível a diferença na exigência da força de tração das ferramentas para implementos como escarificadores e subsoladores quando comparados a outros mecanismos de diferentes implementos.

Furini (2018) destacou os principais implementos utilizados na descompactação do solo (Tabela 1) com suas respectivas características técnicas e que estão disponíveis no mercado agrícola brasileiro. Ele cita ainda que, em sua grande maioria, subsoladores possuem até sete hastes enquanto que, nos escarificadores, geralmente o número de hastes é superior a cinco.

Tabela 1 – Escarificadores produzidos no Brasil.

Fabricante	Nome comercial	Acoplamento	Prof. máxima de trabalho (m)	Potência média por haste (kW)	Velocidade de trabalho indicada ($m\ s^{-1}$)
Escarificadores					
Stara	Fox	Barra de Tração	0,26	9,20	1,11-2,22
Jan	Matic	Barra de Tração	0,30	9,93	1,11-1,67
Tatu M.	EST Matic 300	Barra de Tração	0,26	8,09	1,67-2,22
Piccin	EPCR 300	Barra de Tração	0,26	10,66	-
Khor	Skarific	Barra de Tração	0,35	9,93	1,11-2,22
Inroda	Lince	Barra de Tração	0,26	9,20	1,11-2,22
Ikeda	ESC 7 MA	Barra de Tração	0,35	9,56	-
Subsoladores					
Stara	Asa Laser	Barra de Tração	0,45	15,07	1,11-1,94
Jan	Jumbo Matic	Barra de Tração	0,40	14,71	1,11-1,67
Tatu M.	AST/MATIC 450	Barra de Tração	0,45	13,60	1,39-1,67
Baldan	ASDA	Barra de Tração	0,45	16,55	1,25-1,39
Piccin	SPCR 400	Barra de Tração	0,40	33,09	-
Inroda	Puma	Barra de Tração	0,45	16,55	1,39-1,67
GTS	Terrus	Barra de Tração	0,45	25,74	-

Fonte: Adaptado de Furini, 2018.

No que tange ao consumo de combustível, Gonzales-de-Soto et al., (2015) cita que as necessidades de energia durante as atividades agrícolas estão intimamente relacionadas ao consumo de combustível. Embora o consumo horário de combustível, no estudo de Rodriguez et al., (2018), tenha sido maior quando comparado aos escarificadores, ficou evidenciado o quanto atributos como o manejo e o preparo do solo apresentam influência na demanda energética.

Diante disso, foram percebidos diversos fatores que atuam de forma isolada ou associada no desempenho de conjuntos mecanizados. Que caracterizam importantes parâmetros de desempenho, tais como: habilidade do operador, condições de superfície do solo, patinagem dos rodados, velocidade de deslocamento, características do solo e topográfica da área, entre inúmeras variáveis (GRANJA, 2018).

Segundo Fessel (2003), o desempenho operacional das máquinas agrícolas pode ser definido como um agrupamento de informações multiforme, tendo características operacionais (quantidade e qualidade de trabalho), manejo (regulagens e manutenção) e dinâmicas (velocidade de trabalho e potência requerida). Ele cita ainda que tais informações determinam suas peculiaridades ao realizarem operações sob determinadas condições de trabalho.

Na Tabela 2, segundo os manuais dos próprios fabricantes, podem ser vistos o peso dos principais escarificadores comercializado no país com o respectivo número de hastes

Tabela 2 – Peso dos principais escarificadores produzidos no Brasil.

Número de hastes	Nome Comercial							
	EST MATIC 300	ESC MA	Inroda Lince	JAN Matic	KHOR Skarific	Panther Terramax	Peccin EPCR 300	Stara Fox
PESO (Kg)								
5					1.630	1.750	1.920	
7		2.430	2.460	2.100	2.080	2.200	2.260	2.100
9	2.885	2.790	3.195	2.600	2.490	2.600	2.620	2.500
11	3.385	3.100	3.606	3.040	2.814	3.100	3.230	2.950
13	3.795	3.450	4.410	3.240	3.220	3.450	3.580	3.450
15	4.140	3.818	4.928	3.950	3.680	3.900	4.480	3.850
17	5.250					4.800	5.010	
19	5.850					5.300	5.380	
20			7.824					
21	6.380					5.700		
23	6.720					6.200		
24			8.688					
25							7.639	
28			10.424					
32			11.504					

Fonte: Retirado do manual de operação de cada fabricante (2021).

2.6 EQUIPAMENTOS ALTERNATIVOS

Há máquinas e equipamentos alternativos que também realizam a mobilização de solo, variando de acordo com o princípio de funcionamento e tipos de culturas. Nos sistemas de

produção de grama, para a obtenção de tapetes inteiros, é realizada antes do corte, a passagem de um rolo compactador no solo úmido a fim de favorecer a coesão. Além disso, a máquina de corte estabelece uma espécie de selamento superficial do solo (SANTOS et al., 2014). À vista disso, produtores de grama buscam maneiras para minimizar essa compactação nas camadas de 0 a 15 cm, desenvolvendo diversos equipamentos alternativos como órgãos ativos de semeadoras, grades, adubadoras entre outros, zelando para uma mínima mobilização superficial do solo (SANTOS et al., 2010). Os autores citam ainda que o implemento mais utilizado nesta cultura para escarificar o solo e descompactá-lo é a “estrelinha”, constituído por um chassi de grade leve de arrasto com seções paralelas e discos planos.

Atualmente é comercializado o implemento Aeromix, destinado a descompactação e aeração de solos, operando em profundidades de até 20 cm (IKEDA, 2009). Alves (2010) observou a resistência à penetração de raízes em Latossolo Bruno submetido a sistemas de preparo na integração lavoura-pecuária, dentre os sistemas de preparos avaliados foram: grade aradora, arado de discos, escarificador, subsolador, Aeromix e plantio direto. O autor concluiu que o Aeromix foi o implemento mais eficiente na descompactação de solo na primeira camada avaliada (0-10 cm), afirmando que é o equipamento ideal para a mobilização de solo em profundidades superficiais.

O Implemento denominado “rolo descompactador”, é um equipamento amplamente utilizado no melhoramento de áreas para pastoreio, tendo como principal função de descompactar e permitir maior aeração do solo. Segundo Sanez et al. (2017) a desertificação de pastagens em ecossistemas áridos e semiáridos, é a consequência de anos de excesso de carga animal e exploração demasiada de recursos naturais, que reduzem a cobertura vegetal e aumentam a compactação. Os autores afirmam que a utilização do rolo descompactador é um método de manejo que realiza o rompimento de camadas de solo superficiais compactadas, promovendo trocas gasosas e retenção de água, o que favorece o crescimento da vegetação.

Medina-Guillén et al. (2017) estudaram a reabilitação da estrutura e diversidade da vegetação do deserto com a utilização do rolo descompactador, os pesquisadores comprovaram que o equipamento proporcionou o aumento da diversidade de espécies em um curto período de tempo, sobretudo reduziu significativamente as espécies dominantes. Dominguez (2008) também avaliou o uso do equipamento para a recuperação de pastagens em zonas semiáridas. Concluiu em seu estudo que o tratamento com implemento apresentou uma tendência favorável, estabelecendo uma aparente eficácia na sua utilização.

Entretanto, tais implementos são restritos a alguns tipos de cultura, geralmente as profundidades de operações são limitadas, ou seja, não atuando abaixo de camadas de solo

compactadas que frequentemente ocorrem nas principais culturas. O que tornam os mecanismos ineficientes ou que se necessita de alterações e improvisações.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O projeto teve como foco de abordagem a otimização na solução dos problemas relacionados à compactação do solo a partir do desenvolvimento de um protótipo que auxilia no seu manejo e na sua conservação, bem como na sua descompactação, dentre outras vantagens associadas a essa prática, com uma alternativa diferente dos modelos convencionais existentes no mercado, almejando maiores vantagens e praticidade no seu uso, comparado aos modelos atuais.

O experimento foi realizado em uma área agrícola de propriedade da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), localizada no município de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul (Figura 12). As coordenadas geográficas da área são: 29°43'04" S e 53°44'28" W, com relevo plano suavemente ondulado e com uma altitude média de 106 m acima do nível do mar.

Figura 12 – Município de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.



Fonte: Google Maps, 2021.

A região está localizada no Hemisfério Sul e apresenta clima subtropical úmido (*Cfa*), de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger. As temperaturas médias do mês mais frio giram em torno de 0 a -3°C; e dos meses mais quentes, a média é superior a 22°C, possuindo uma alta amplitude térmica anual. A região possui índice pluviométrico superior a 1250 mm ao ano, não havendo estação de seca em nenhum período.

O espaço utilizado e cedido pela instituição (Figura 13) foi uma área de aproximadamente 1.600,0 m² (20 x 80 m). Na área foi utilizado um ciclo cultural, variando entre leguminosas (soja) e gramíneas (aveia e azevém), todas no sistema de plantio direto.

Figura 13 – Localização espacial da área experimental

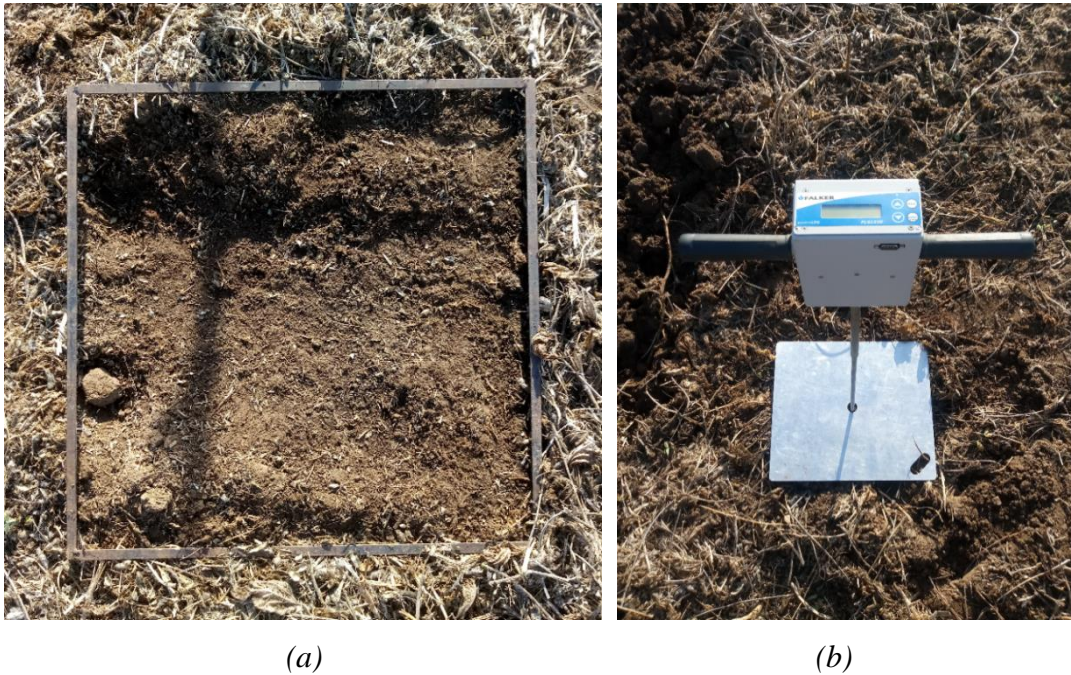


Fonte: Google Earth, 2021.

Inicialmente, na área experimental, foi determinada a presença de matéria seca sobre a superfície do solo por meio de amostras de 0,5 m² por tratamento (Figura 14 *a*). As amostras foram secadas em estufa elétrica com temperatura de 65°C, por aproximadamente 72 horas.

Foi utilizado um Penetrômetro da marca Falker modelo PLG 1020 (Figura 14 *b*) com a ponta de número 2, de acordo com informações do manual indicado para cada tipo de solo. Foram determinados os Índices de Cone com base na média de cinco amostragens por unidade experimental nas profundidades de 0,0 a 0,40 m, com coleta de dados a cada 0,01 m.

Figura 14 – Método de coleta de amostra seca utilizado no experimento (a). Penetrômetro utilizado no experimento (b).



A caracterização textural do solo consistiu na adoção do método de Vettori, este foi realizado no Instituto Federal Farroupilha – Campus Alegrete. O solo encontrado foi classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico com textura franco, sua composição pode ser observado na Tabela 6. Estes solos segundo Reinert et al. (2007) tem características que os definem como solos profundos, avermelhados com textura superficial arenosa apresentando gradiente textural com o horizonte B. O autor destaca ainda que eles são friáveis e bem drenados, pobres em nutrientes e matéria orgânica, são ácidos com baixa CTC e baixa saturação de bases, amplamente utilizado em pastagens e culturas anuais.

Para a caracterização física do solo foram Realizadas 12 coletas aleatórias em profundidade variando entre 0,0 a 0,25 m. Estas foram levadas ao Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas (LASERG) e segundo a metodologia proposta por Embrapa (2017), foi determinada a densidade do solo, teor de água e porosidade total (Tabela 6).

3.2 PLANO EXPERIMENTAL E ESTATÍSTICO

O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados, formados por 6 tratamentos em um esquema fatorial 2x3 (2 mecanismos e 3 velocidades). Foram utilizadas quatro repetições para cada tratamento, que corresponde às 24 unidades experimentais de 3,0 metros de largura por 20,0 metros de comprimento, totalizando 60,0 m² cada. A Tabela 3 representa o detalhamento dos tratamentos executados.

Portanto, o experimento consistiu na interação entre dois fatores, sendo o protótipo desenvolvido e a haste escarificadora (testemunha) como Fator I, e três diferentes velocidades de deslocamento como Fator II. A profundidade de operação regulada foi de 0,25 m para ambas as ferramentas, entretanto, podendo variar de acordo com a capacidade de penetração no solo de cada ferramenta.

Tabela 3 – Detalhamento dos tratamentos executados nos experimentos de campo.

Tratamentos	Mecanismos	Velocidade (m s ⁻¹)		
T1	Protótipo	1,30 (4,68 km h ⁻¹)		
T2	Protótipo	1,60 (5,76 km h ⁻¹)		
T3	Protótipo	1,90 (6,84 km h ⁻¹)	4	24
T4	Haste	1,30 (4,68 km h ⁻¹)	Repetições	Unidades Experimentais
T5	Haste	1,60 (5,76 km h ⁻¹)		
T6	Haste	1,90 (6,84 km h ⁻¹)		

3.3 CONCEITOS DE FÍSICA DO SOLO

3.3.1 Resistência à penetração

Conforme já mencionado, no que tange a causas e consequências da resistência à penetração do solo, o instrumento utilizado para aferir o nível de resistência é o penetrômetro ou penetrógrafo. Esse instrumento tem como componente uma haste de metal que, em sua extremidade, possui um cone padrão (BAESSO et al., 2020). A Norma ASABE S313.3 (2006) define este cone circular de aço inoxidável com ângulo de 30 graus. No entanto, Serafin et al. (2008) afirma que os penetrômetros utilizados para a determinação desta variável possuem diferentes diâmetros e ângulos de cone.

A Norma ASABE S313.3 (2006) define ainda, que o Índice de Cone é um índice de resistência do solo, ou seja, é a força necessária para pressionar este cone através do solo, expresso em quilo pascais. Com base na regra em que a pressão está relacionada às variáveis força e área, Molin, Dias & Carbonera (2012) também afirmam que, por meio da relação entre

a resistência e a penetração que o solo exerce sobre a pressão desse cone, é obtido o Índice de Cone (MPa). Tal classificação quantifica o grau de resistência à penetração que o solo emprega aos sistemas radiculares das culturas.

Segundo Vaz et al., (2002) esses instrumentos podem ser divididos em duas categorias: os estáticos que, por meio de sistemas elétricos, hidráulicos ou ainda manuais, realizam a penetração com velocidade constante; e os dinâmicos em que a penetração é executada por impactos de um componente metálico.

Moraes et al. (2012) cita que a resistência do solo à penetração é um significativo indicador de compactação, entretanto é extremamente influenciada pelo teor de água no solo. Collares et al. (2006) salienta que o aumento da umidade do solo resulta na redução da aeração e resistência a penetração. Segundo Moraes et al. (2014) esta variável é uma propriedade importante para avaliar a qualidade física dos solos, de maneira que indica a ocorrência de problemas relacionados à compactação, no entanto, o efeito do teor de água impede a real identificação do estado do solo. Os autores citam ainda que tal indicativo pode resultar em recomendações, intervenções e práticas de manejo errôneas, que por vezes resultam em custos desnecessários e riscos ambientais.

3.3.2 Empolamento do solo

A determinação do perfil empolado do solo é obtida a partir da variável área mobilizada e área elevada, ou seja, a relação direta entre área de solo que se elevou com a introdução do implemento agrícola e a área de solo que foi mobilizada subsuperficial pelo deslocamento do implemento, tendo como principal referência o relevo natural do solo (LASKOSKI et al., 2017).

A determinação das áreas mobilizada e elevada pode ser determinada por meio de gráficos com a utilização de técnicas planimétricas ou programas computacionais (CARVALHO FILHO et al., 2007). Desse modo, o perfil empolado do solo pode ser representado percentualmente a partir da equação 1.

$$EpS = \frac{Ae}{Am} \times 100 \quad (1)$$

Sendo que,

EpS – empolamento do solo (%);

Ae – área de solo elevada (m^2);

Am – área de solo mobilizada (m^2);

3.3.3 Teor de água

O teor de umidade representa o percentual de água presente no solo, podendo ser determinado *in situ* ou por amostragem para determinação em laboratório.

De acordo com a NBR 6457/2016, na determinação do teor de umidade do solo, é utilizado o método da estufa. Para determinar o percentual de água presente no solo, é utilizada a razão entre a massa de água contida no solo que evaporou em estufa a uma temperatura variando entre 105°C e 110°C e a massa de grãos de solo seco em estufa. A Equação 2 representa a maneira como obter o teor de umidade presente no solo.

$$W = \left(\frac{W_w - W_s}{W_s} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Sendo que,

W – teor de umidade ($kg \cdot kg^{-1}$);

W_w – Massa da amostra úmida (kg);

W_s – Massa da amostra seca a 105 °C ao atingir peso constante (kg);

3.3.4 Porosidade total

Segundo a Embrapa (2017), a porosidade total do solo é uma parcela do volume total em um determinado volume de solo que pode ser ocupado por água ou ar.

A porosidade total é o montante dos macro e microporos, ou seja, é a relação direta entre o volume de vazios e o volume total da amostra de solo, como pode ser observado na Equação 3.

$$Pt = \left(\frac{(MCSat - MCS) - (MSat - MS)}{V_t} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Sendo que,

P_t – porosidade total do solo (%);

$MCSat$ – massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga saturado (g);

MCS – massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga seco a 105 °C (g);

$MSat$ – massa do conjunto cilindro-tecido-liga saturado (g);

MS – massa do conjunto cilindro-tecido-liga seco a 105 °C (g);

V_t – volume total da amostra (cm³);

3.3.5 Densidade

A densidade do solo é definida como a relação entre a massa de sólidos secos do solo e o volume total (Equação 4). O método usual é o método do anel volumétrico, que compreende a coleta de uma amostra de volume conhecido por meio de anéis volumétricos introduzidos ao solo, e a determinação da massa dessa amostra depois de extraída a umidade até peso constante em estufa a 105°C (VIANA, 2008).

$$D_s = \frac{Ma}{V_c} \quad (4)$$

Sendo que,

D_s – densidade do solo (g cm⁻³);

Ma – massa de amostra de solo seco até peso constante a 105 °C (g);

V_c – volume do cilindro (cm³);

3.4 CONCEITOS DE ANÁLISE DE DESEMPENHO

3.4.1 Força na barra de tração

A força na barra de tração é estabelecida como o montante de força necessária para puxar um determinado implemento ou ferramenta. Além disso, o tipo de solo e o manejo antecedente são fatores preponderantes que afetam na exigência de energia de tração (FRANCETTO et al., 2016; BELLÉ et al., 2014). A barra de tração é o meio de exploração de potência do trator destinado ao fornecimento de força, habitualmente utilizado para a tração de máquinas e equipamentos que requerem ser deslocados ao longo da área de trabalho (MASIERO, LANÇAS & MONTEIRO, 2011).

A força de resistência ao rolamento é obtida a partir da média da força exigida para tracionar durante todo o percurso da parcela experimental, sendo que a estrutura porta ferramentas, juntamente com a ferramenta suspensa, ou seja, a ferramenta não estando em contato com o solo. Todavia, a força de tração instantânea é determinada pela média de força total demandada pela ferramenta em operação (BELLÉ, 2013).

Desse modo, a força horizontal média na barra de tração é determinada de acordo com a Equação 5, utilizando os dados da força de tração instantânea e da resistência ao rolamento.

$$FMBT = Fti - Rrol \quad (5)$$

Sendo que,

FMBT – força média na barra de tração (kN);

FBT - força de tração instantânea (kN);

Rrol – resistência média ao rolamento (kN);

3.4.2 Potência média na barra de tração

Segundo Gabriel Filho et al. (2004) na escolha do trator agrícola para operações em campo, um dos quesitos mais importantes é o potencial em desenvolver o esforço para tracionar implementos e máquinas agrícolas. Os autores citam ainda que a barra de tração é uma das três e a mais importante forma e utilizar a potência gerada pelo motor. Antunes Júnior et al. (2016) também afirmam que os tratores são conhecidos por ser a principal fonte de potência para a execução de atividades mecanizadas, especialmente nas áreas voltadas a agricultura. Eles reiteram que a barra de tração é o meio pela qual o trator libera potência para tracionar máquinas e implementos agrícolas, função similar exercida pelo engate de três pontos.

A demanda de potência gerada na barra de tração pode ser determinada por meio da relação entre a força média na barra de tração e a velocidade, conforme pode ser observado na equação 6.

$$PMBT = Fmbt \times V \quad (6)$$

Sendo que,

PMBT – potência média na barra de tração (kW);

Fmbt - força média na barra de tração (kN);

V – Velocidade de deslocamento (m s^{-1});

3.4.3 Resistência específica operacional

Segundo Becker et al. (2019) e Bellé (2013), a resistência específica operacional é um dos principais aspectos a serem observados no desempenho de elementos descompactadore; e para a sua determinação, é necessária a relação de duas variáveis, a demanda de força média exigida na barra de tração e a área de solo mobilizado, conforme pode ser observado na Equação 7.

$$ROp = \frac{FMBT}{ASM} \quad (7)$$

Sendo que,

ROp – resistência específica operacional (kN m^{-2});

$FMBT$ – força média na barra de tração (kN);

ASM – área de solo mobilizada (m^2);

3.4.4 Consumo horário de combustível

Um dos custos mais elevados em atividades voltados à agricultura é o consumo de combustível do trator agrícola. Os fatores mais influentes nesse consumo são a condição do conjunto trator-implemento, tipo de solo, profundidade de trabalho, operações agrícolas anteriores na área, dentre outros (MONTANHA et al., 2011).

O consumo horário de combustível comumente pode ser apresentado tanto como unidade de volume pelo tempo (L h^{-1}), ou ainda na forma de unidade massa pelo tempo (g h^{-1}) (LOPES et al., 2003). E pode ser determinado a partir da Equação 8.

$$Chc = Pul \cdot 1,8 \quad (8)$$

Sendo que,

Chc – consumo horário de combustível (L h^{-1});

Pul – média de pulsos no fluxômetro;

3.4.5 Patinagem dos rodados motrizes

Segundo Granja (2018), a patinagem é o termo utilizado para caracterizar perda de atrito entre superfície do solo e do pneu. É devido a essa área de contato entre pneu e solo que ocorrem as maiores perdas de transmissão de potência, tal situação ocorre em qualquer circunstância prática gerada pela patinagem, ou seja, perda de tração (ANTUNES JUNIOR et al., 2016).

Gabriel filho et al. (2004) afirmam que a interação entre o rodado e o solo são aspectos preponderantes para a eficiência do trator agrícola, no que se refere a esforço tratório. Além disso, o fenômeno patinagem envolve um complexo conjunto de fatores como característica do rodado, transferência de peso do trator, tipo de solo, umidade, estado de compactação e tipo de cobertura vegetal.

Tais fatores associados poderão provocar uma patinagem excessiva ou reduzida dos rodados, de modo que existe um nível ideal de patinagem para o correto desempenho operacional da máquina agrícola (GRANJA, 2018). A determinação do percentual de patinagem pode ser obtido por meio da Equação 12.

Velocidade de deslocamento

$$V = \frac{(Pr \times Freq)}{n} \quad (9)$$

Sendo que,

V – velocidade de deslocamento ($m \ s^{-1}$);

Pr – perímetro da roda (m);

$Freq$ – frequência de aquisição de dados pelo *datalogger* (Hz);

n – número de dentes da engrenagem;

Patinamento

$$P = \frac{Vr - Vo}{Vr} \times 100 \quad (10)$$

Sendo que,

P – patinamento (%);

Vr – velocidade de deslocamento com carga ($m \ s^{-1}$);

Vo – velocidade de deslocamento sem carga ($m \ s^{-1}$);

O patinamento dos rodados motrizes de acordo com Alonso (2016) pode ser determinado de acordo com o tempo, ou seja, determinação a partir do tempo que o trator leva para percorrer a unidade experimental, antes e após a acoplagem do implemento. Com a diferença de tempos, têm-se a patinagem do trator, como pode ser observado na Equação 13.

$$P = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \times 100 \quad (11)$$

Em que,

P – Patinamento (%);

t_0 – Tempo para percorrer a unidade experimental com carga;

t_1 – Tempo para percorrer a unidade experimental sem carga;

3.5 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.5.1 Trator

Como fonte móvel de energia, foi utilizado no experimento um trator agrícola de pneus (Figura 15), na qual a Estrutura Porta Ferramentas Móvel (EPFM) foi acoplada.

Figura 15 – Conjunto trator e EPFM.



Na sequência, a Tabela 4 apresenta as especificações da máquina agrícola pertencente à Universidade Federal de Santa Maria, que possui tração traseira e foi fabricada no ano de 1986. Os pneus traseiros, durante o experimento, estavam em estado de novos, com lastragem líquida de aproximadamente 50% e com pressão interna de 172 kPa (25 lib pol⁻²).

Tabela 4 – Especificações do trator

Detalhamento	Especificação
Marca	Massey Ferguson
Modelo	275
Potência	53 kW
Marca do motor	Perkins
Cilindros	4 (aspirado)
Tração	4x2
Velocidade 1	3ª marcha – 1500 rpm
Velocidade 2	4ª marcha – 1500 rpm
Velocidade 3	5ª marcha – 1500 rpm
Pneu dianteiro	Goodyear 7.50-16
Pneu traseiro	Firestone 18.4-30

3.5.2 Estrutura Porta-Ferramentas Móvel (EPFM)

A Estrutura Porta-Ferramentas Móvel (Figura 16) foi desenvolvida por Gassen (2011) e mede aproximadamente 2,50 metros de comprimento transversal, e comprimento longitudinal próximo a 4,50 metros, incluídos o cabeçalho, o chassi e os pneus.

A EPFM foi desenvolvida no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas – LASERG para facilitar o acoplamento de ferramentas e mecanismos. Além disso, possui dois cilindros-pistões hidráulicos de dupla ação os quais permitem a suspensão das ferramentas em análises para manobras ou ainda para regulagem de profundidade durante as operações.

Figura 16 – Estrutura Porta Ferramentas Móvel desenvolvida por Gassen (2011).

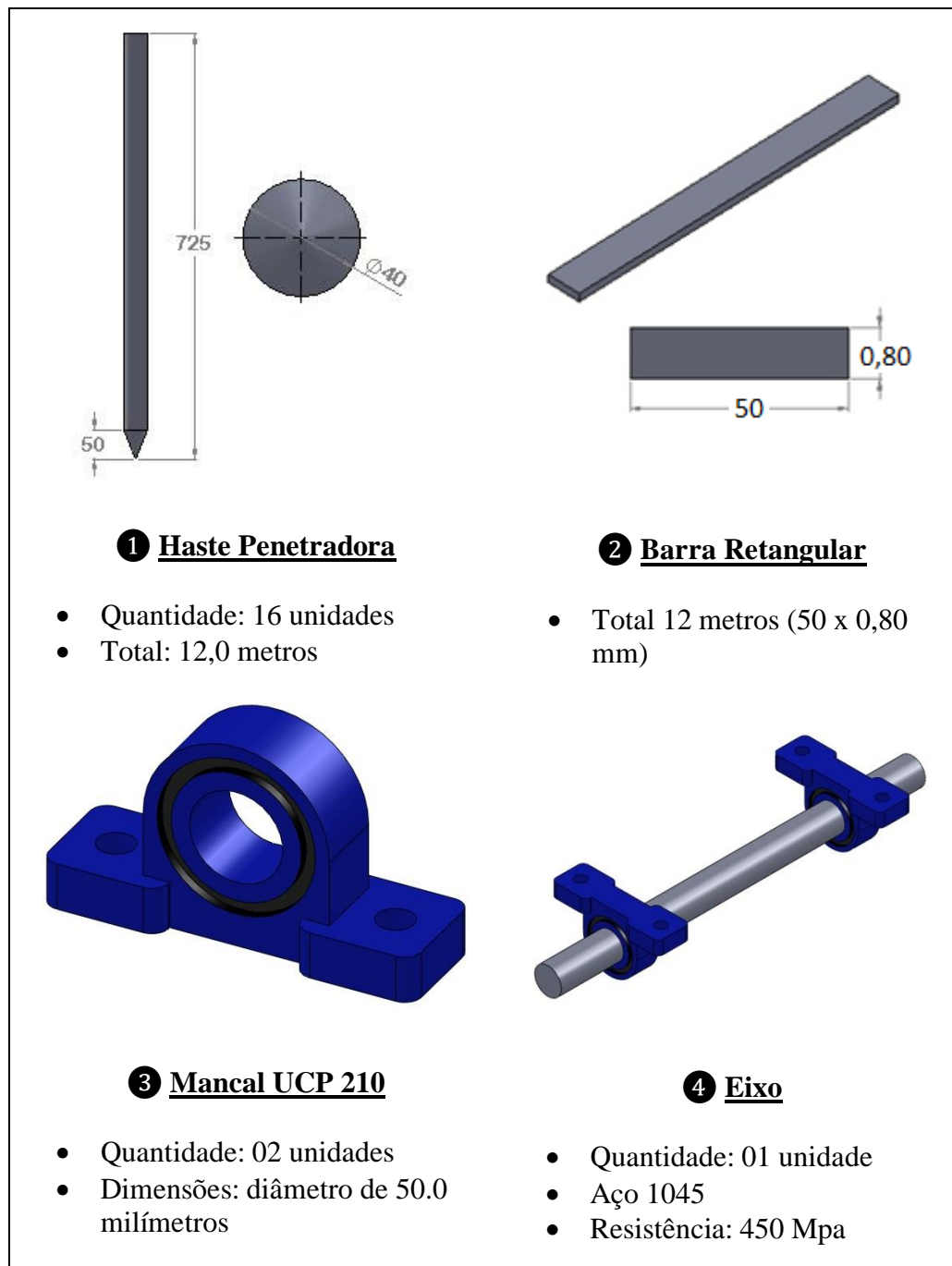


3.5.3 Elementos descompactadores

Projeto

O projeto desenvolvido é composto por barras de aço SAE 1045 com diâmetro de 40 milímetros e barra chata de aço SAE 1020 5/16x1.7/8". O projeto também possui um eixo de aço SAE 1045 com diâmetro de 50 milímetros sustentado por dois mancais UCP 210. Os materiais componentes podem ser observados na Figura 17.

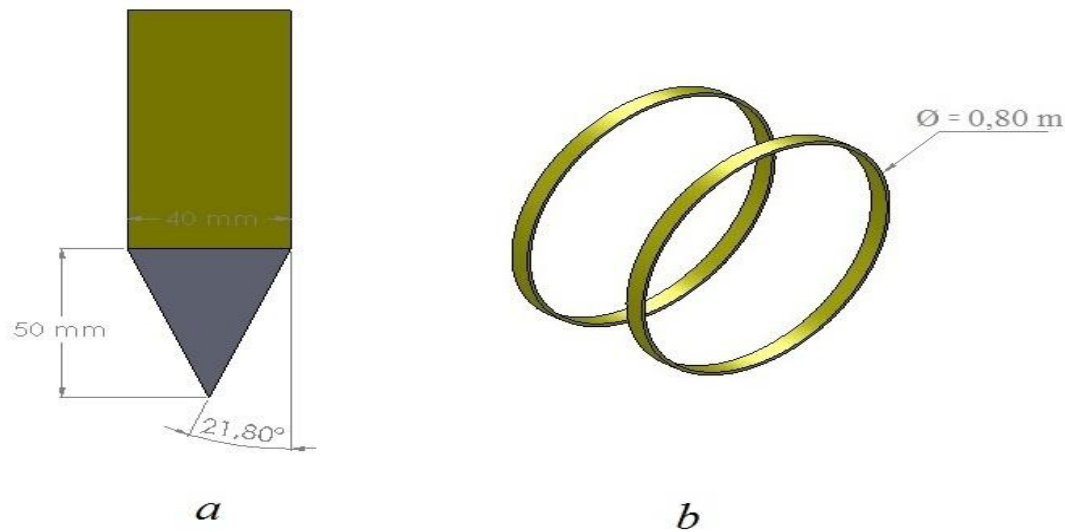
Figura 17 – Materiais que compõe o projeto.



As barras de aço SAE 1045 foram seccionadas em 16 unidades com comprimentos de 0,725 m (sendo denominadas, no projeto, como hastes); e, em uma das extremidades, foram torneadas, formando uma ponta semelhante à ponta de um lápis (Figura 18 a), sendo que o ângulo de torneamento foi equivalente a 21,8°.

Parte das barras chatas de aço 5/16 x 1.7/8 foi dividida em duas secções de 2,52 m de comprimento a fim de formar dois círculos (anéis) de 0,80 m de diâmetro (Figura 18 b).

Figura 18 – Torneamento realizado na extremidade da barra aço cilíndrico (a); Conformação de duas seções de barra chata de aço em um círculo (b).

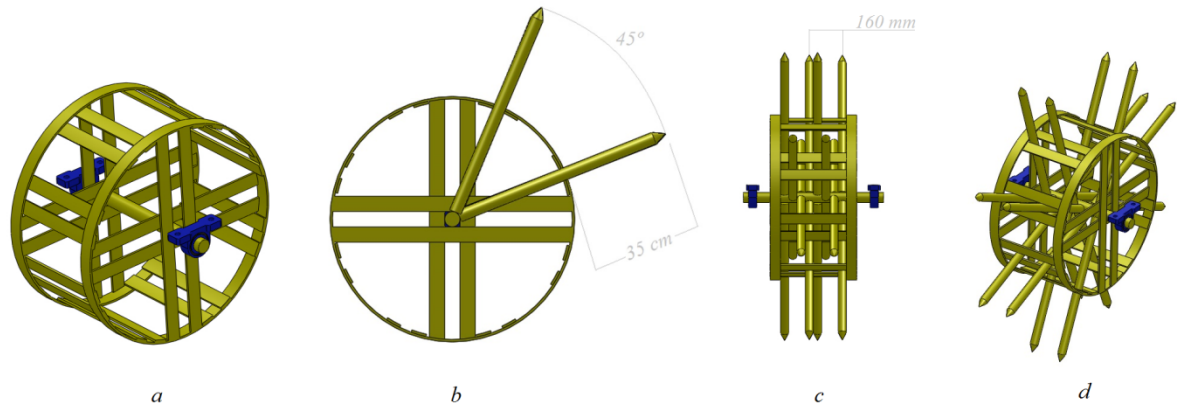


Posteriormente, foram seccionadas 16 unidades da barra chata de aço SAE 1020 5/16 x 1.7/8 com 0,42 m de comprimento e 8 unidades com comprimento de 0,80 m. As 16 unidades foram soldadas de maneira a unir os anéis e dar suporte às hastes, formando um cilindro, enquanto as outras 8 unidades foram soldadas junto aos anéis e ao eixo de sustentação (Figura 19 a).

As hastes foram espaçadas em ângulos de 45° (Figura 19 b) e dispostas em duplas no cilindro com distâncias, entre si, de 160,0 mm (Figura 19 c). Todas as extremidades não usinadas das hastes foram fixadas por meio de solda ao eixo e às chapas a partir de 35 centímetros da extremidade torneada, formando uma espécie de treliça no interior do cilindro (Figura 19 d).

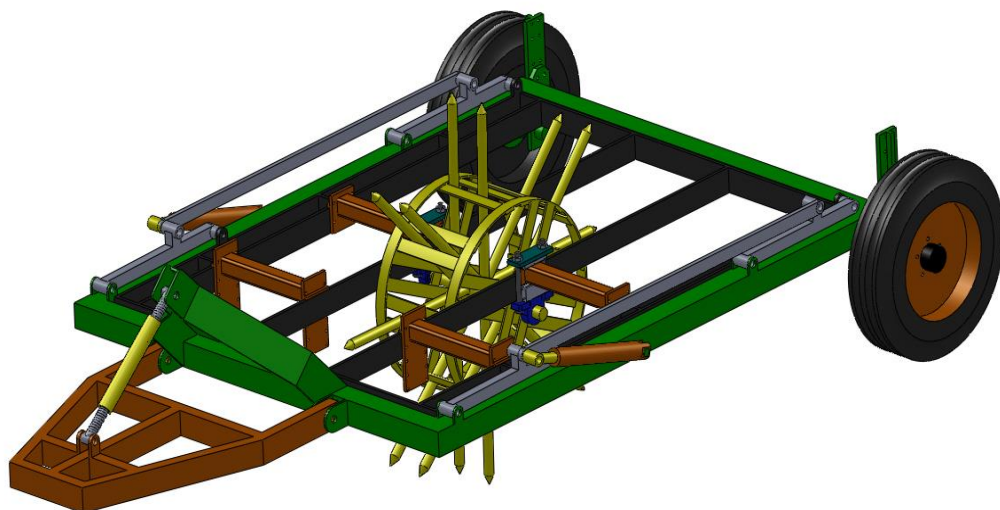
Os eletrodos básicos utilizados no processo de soldagem e confecção do projeto foram: 2,5 milímetros para as chapas de aço 1020 e 3,25 milímetros para as barras de aço 1045, com amperagem de 60 e 80 (A) respectivamente.

Figura 19 – Composição do cilindro (a); arranjo e ordenamento de 45° entre hastes (b); espaçamento entre duplas de hastes (c); estrutura final do projeto (d).



O projeto foi fixado com a utilização dos mancais à Estrutura Porta-Ferramentas Móvel (Figura 20) por meio de parafusos de aço sextavado. Os mancais fixos à EPFM permitem a movimentação do projeto de acordo com o deslocamento do trator agrícola, sobretudo a regulação do seu nível de aprofundamento durante as operações.

Figura 20 – Projeto fixado à EPFM



Haste Escarificadora

Como testemunha no estudo, foi utilizado um elemento descompactador comercial de formato parabólico da fabricante Stara modelo 2560 (Figura 21). O motivo da escolha deu-se

pela disponibilidade da haste, por já ter sido objeto de estudo em outros trabalhos e acima de tudo, preconizar uma comparação justa entre os elementos.

Quanto às características geométricas da haste configura-se em 0,048 m de largura, profundidade máxima de trabalho de 0,68 m e ângulo de ataque de 30°. Composta ainda por uma ponteira sem asa com largura de aproximadamente 0,072 m.

Figura 21 – Haste de escarificador utilizado como comparativo no estudo.



3.5.4 Instrumentação

As variáveis de desempenho estão diretamente associadas com a interação entre máquina-solo, sendo que tal relação é dependente da geometria das ferramentas, condições do solo e regulagens de operação, como profundidade de trabalho e velocidade de deslocamento (FRANCETTO et al., 2019). Desta maneira, na Tabela 5 é possível observar a instrumentação utilizada no experimento e as respectivas variáveis mensuradas pelos mesmos. Todos os equipamentos e instrumentos são pertencentes ao Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas - LASERG.

Tabela 5 – Instrumentos utilizados e as variáveis extraídas.

Instrumento	Aquisição das Variáveis
Fluxômetro	Consumo de combustível
Célula de carga	Esforço tratório
Sensor indutivo	Patinamento
Datalogger	Armazenamento de dados
Penetrômetro	Resistência à penetração Área elevada
Perfilômetro de hastes	Área de solo mobilizada Relevo original do solo

3.5.5 Consumo horário de combustível

O consumo horário de combustível foi obtido a partir de um fluxômetro da marca Oval M-III modelo LSF 41 (Figura 22 *a*). No interior desse instrumento, há duas engrenagens (Figura 22 *b*) que, ao girarem com o movimento do fluido combustível, geram pulso elétrico (Pul) que, por sua vez, é convertido e armazenado no *datalogger*.

Figura 22 – Fluxômetro utilizado para determinar o consumo de combustível (*a*); engrenagens no interior do fluxômetro que geram pulsos elétricos (*b*).

*a**b*

A cada volta gerada pelas engrenagens, 1,0 mililitro é conduzido à bomba injetora. Com a Equação 8 é possível obter, de forma direta, o consumo horário de combustível.

A utilização do valor 1,8 na Equação 8 deu-se devido à taxa de aquisição de um pulso a cada dois segundos, como pode ser observado na Figura 23.

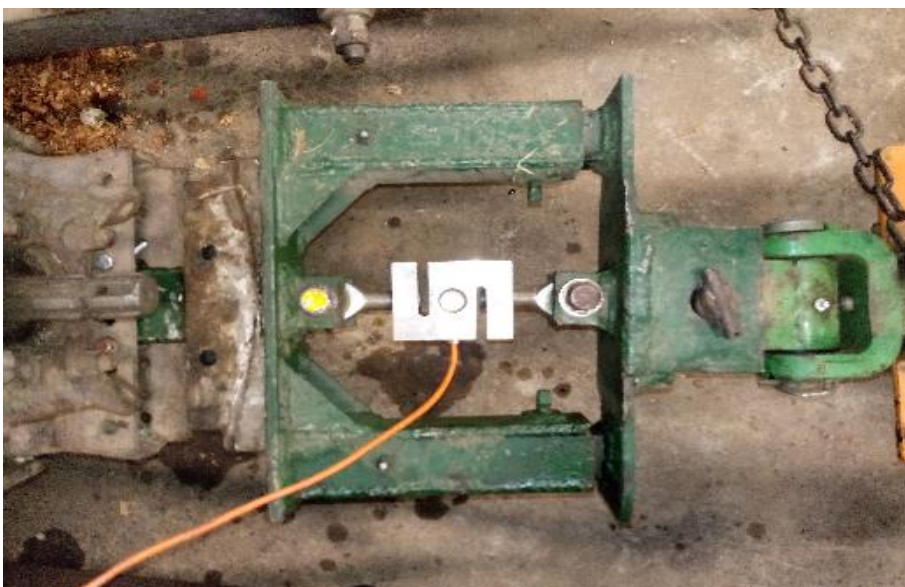
Figura 23 – Definição de valor utilizado na equação do consumo horário de combustível.

Datalogger	→	1 pulso = 1 mililitro
Taxa de aquisição	→	$\frac{1 \text{ pulso}}{2 \text{ segundos}} = \frac{1 \text{ mililitro}}{2 \text{ segundos}} \times 60 \text{ segundos}$
Volume/Tempo (mililitros/minutos)	→	$30 \frac{\text{mililitro}}{\text{minuto}} \times 60 \text{ minutos (1 hora)}$
Volume/Tempo (mililitros/hora)	→	$1800 \frac{\text{mililitros}}{\text{hora}}$
Volume/Tempo (litros/hora)	→	1,8 (1 h^{-1})

3.5.6 Esforço tratório

A determinação do esforço tratório exigido pelos mecanismos descompactadores foi obtida a partir de uma célula de carga tipo “S” (Figura 24), marca Berman, com capacidade para medir até 5.000 kgf. A célula de carga, também chamada de transdutor, é acoplada a um suporte localizado entre a barra de tração do trator agrícola e o cabeçalho da Estrutura Porta-Ferramentas Móvel.

Figura 24 – Instrumento célula de carga do tipo “S” utilizada no experimento.



A força demandada para tracionar o implemento em operação, ou seja, órgãos ativos do implemento em contato com o solo foi denominado de força de tração instantânea (F_{ti}). Enquanto que a força exigida para tracionar o implemento suspenso, isto é, os órgãos ativos sem contato com o solo, é denominada resistência ao rolamento (R_{rol}).

Esses fatores foram mensurados pela utilização da célula de carga que, conforme a força de tração exigida pelo implemento, em operação ou suspenso, gerou pulsos elétricos em milivolts (mV) e foram convertidos e armazenados no *datalogger*.

Com os dados extraídos do *datalogger*, foi realizada uma média para a força de tração instantânea e para a resistência ao rolamento no percurso dentro de cada unidade experimental (20,0 metros lineares). A partir disso, para obter a força média na barra de tração, foi subtraída a média da resistência ao rolamento da força de tração instantânea, conforme pode ser visto na Equação 5.

Além disso, por meio da determinação da força média na barra de tração, também foi possível determinar a potência demandada na barra de tração pelo conjunto ferramenta e estrutura porta-ferramentas móvel, conforme a equação 6.

3.5.7 Patinamento

O patinamento das rodas motrizes foi determinado com base em dois fatores, velocidade de deslocamento sem carga (tracionando a ferramenta sem estar em contato com o solo) e a velocidade de deslocamento com carga (ferramenta em contato com o solo).

A mensuração da velocidade de deslocamento foi apresentada por meio da combinação da roda dentada acoplada à roda motriz e sensor de posicionamento, de acordo com a Figura 25. Conforme o deslocamento do trator, a roda dentada gira juntamente com os rodados motrizes e geram pulsos elétricos captados pelo sensor que se encontra fixo à máquina agrícola, mostrando a frequência de rotação que instantaneamente são armazenados pelo *datalogger*. Desse modo, a partir dos dados de rotação armazenados e com base nas Equações 9 e 10, respectivamente, foram determinados a velocidade de deslocamento e o patinamentos dos rodados motrizes.

Figura 25 – Esquemática com o sensor e a roda dentada para mensuração de rotação dos rodados motriz.



3.5.8 Armazenamento de dados

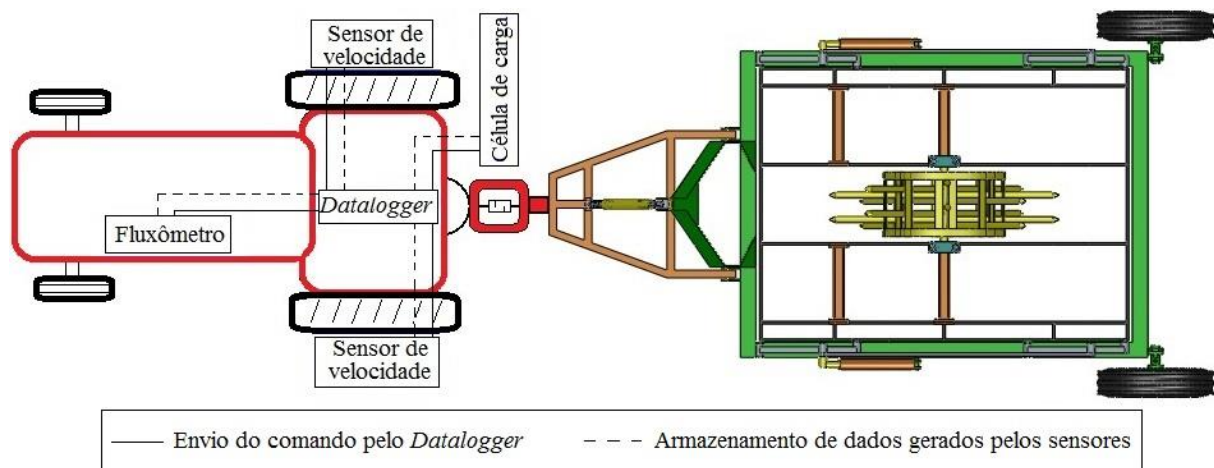
Para armazenagem de dados foi utilizado um *datalogger* da marca Campbell Scientific, modelo CR1000, conforme a Figura 26.

Figura 26 – Dispositivo de armazenamento de dados.



O dispositivo é um sistema eletrônico que interage com os sensores, ou seja, recebe informações precisas geradas pelos sensores, sobretudo armazena, em seu sistema, os dados recebidos e que foram gerados pelos instrumentos fluxômetro, célula de carga e sensor de rotação nas rodas motrizes (Figura 27).

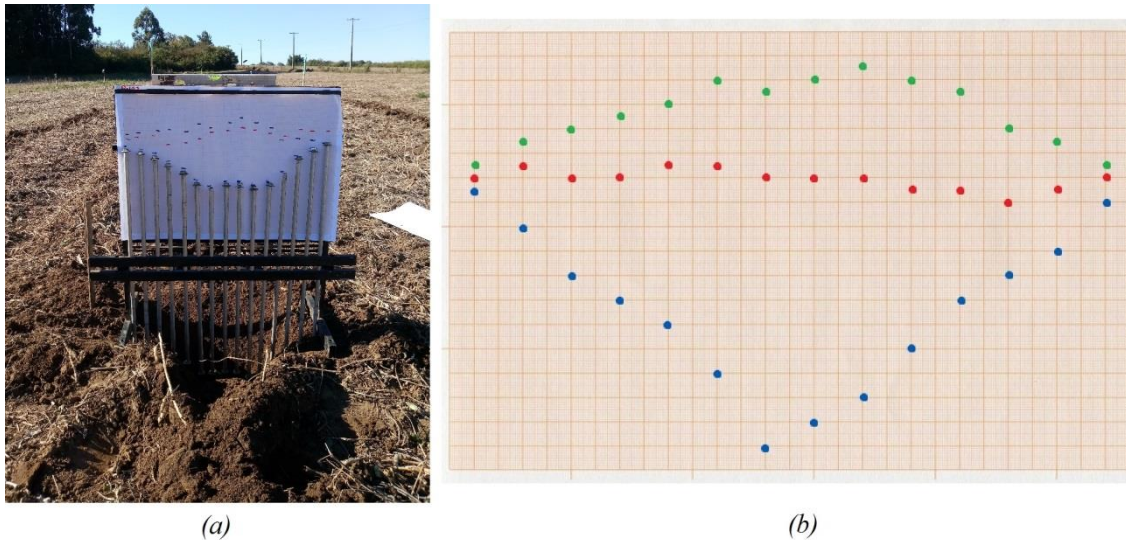
Figura 27 – Esquemática do *datalogger* e sensores no trator (vista superior).



3.5.9 Empolamento do solo

Para determinar as variáveis quanto ao perfil natural do solo, perfil elevado e área mobilizada, foi utilizado o instrumento denominado de perfilômetro (Figura 28 a), composto por 15 varetas com espaçamento entre si de 0,040 m e profundidade máxima de 0,350 m, o equipamento tem capacidade de mensurar uma área aproximada de até 0,21 m² (0,60 x 0,35 m).

Figura 28 – Perfilômetro. Exemplo de utilização no campo (a); Exemplo de marcação em folha de papel milimetrado (b).



Foi fixada ao instrumento uma folha A2 de papel milimetrado para a determinação das três variáveis, ou seja, as três variáveis foram assinaladas em uma única folha para cada repetição (Figura 28 b). Na sequência, foram adotados os seguintes procedimentos para a obtenção das variáveis em cada unidade experimental:

- previamente à introdução da máquina agrícola e da ferramenta, o instrumento foi posto na unidade experimental, e foram demarcados na folha os pontos de cada extremidade das varetas, que representam o perfil natural do solo;
- após a passagem do trator agrícola com a estrutura e a ferramenta em operação, foi realizado o mesmo procedimento, determinando o perfil elevado do solo;
- para a determinação da mobilização de solo, foi removido, manualmente, todo o solo que foi mobilizado pela ferramenta na mesma seção transversal, e o mesmo procedimento foi repetido;
- por fim, as 24 folhas, que correspondem às unidades experimentais com as quatro repetições, foram digitalizadas via câmera digital e plotadas no *software Autodesk AutoCad®* a fim de mensurar precisamente as áreas de elevação e mobilizada.

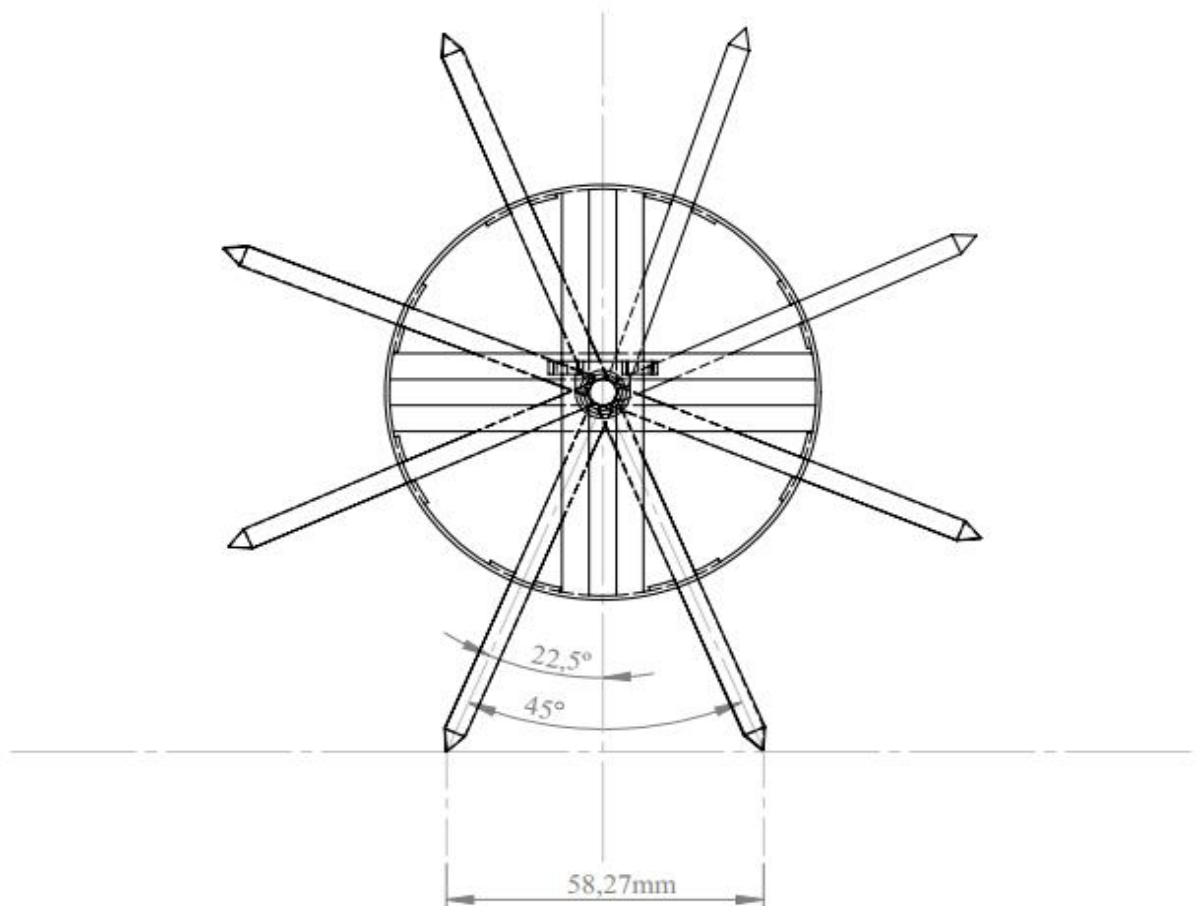
A partir dos dados obtidos com a utilização do *software*, foi possível determinar o empolamento do solo, que representa as alterações que ele recebeu pela ação da ferramenta comparada ao seu estado natural. Dessa forma, conforme a Equação 1, o empolamento do solo pode ser obtido a partir da relação entre a área de solo elevada e a área de solo mobilizada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PARÂMETROS DE PROJETO

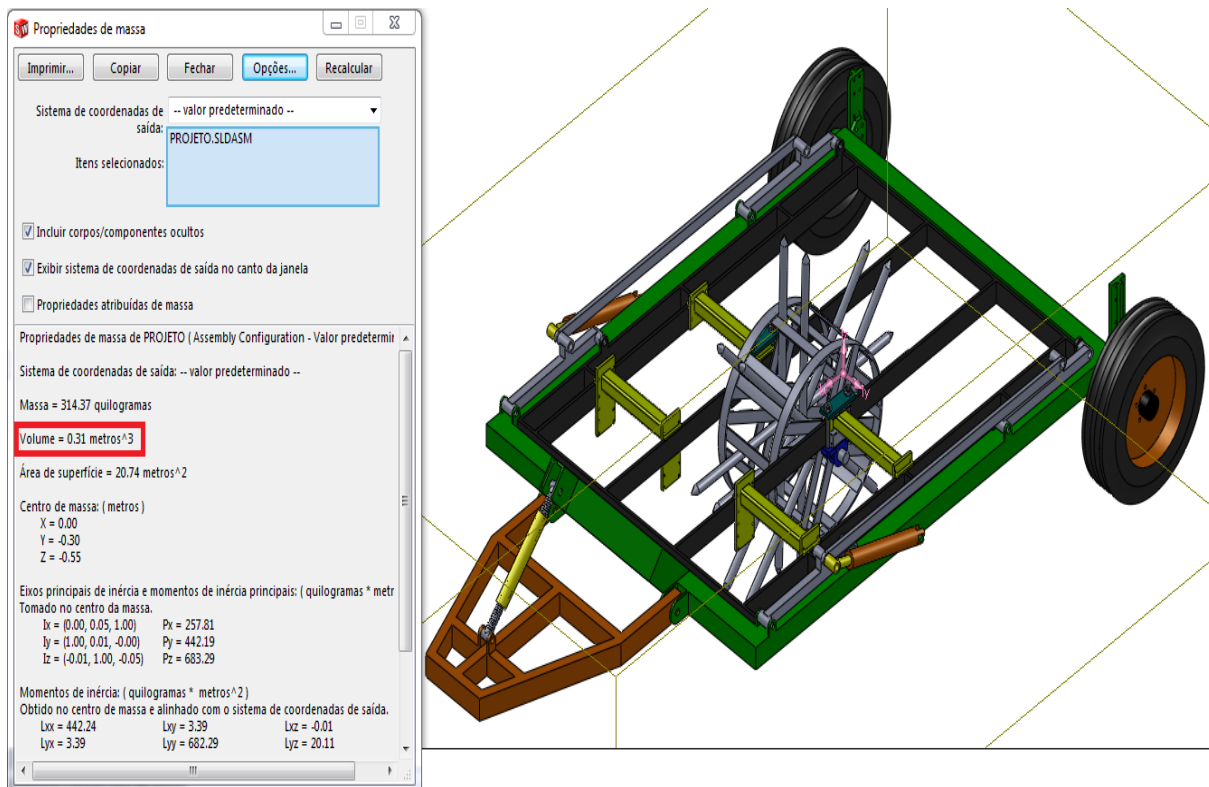
A Figura 29 mostra os ângulos entre as hastes do protótipo e o espaçamento entre as suas extremidades.

Figura 29 - Mecanismo desenvolvido para a mobilização do solo.



Conforme a Figura 30, foi determinado por meio do *software Solidworks* um volume aproximado de $0,3144 \text{ m}^3$ (protótipo + EPFM), tal massa de $314,37 \text{ kg}$ é gerada pelo fato de considerar a densidade do material como $0,001 \text{ g mm}^{-3}$.

Figura 30 - Estrutura porta ferramenta móvel (EPFM) e projeto de mecanismo desenvolvido.



Observando as propriedades físicas do ferro fundido, a sua densidade é aproximadamente 7400 kg m^{-3} , logo:

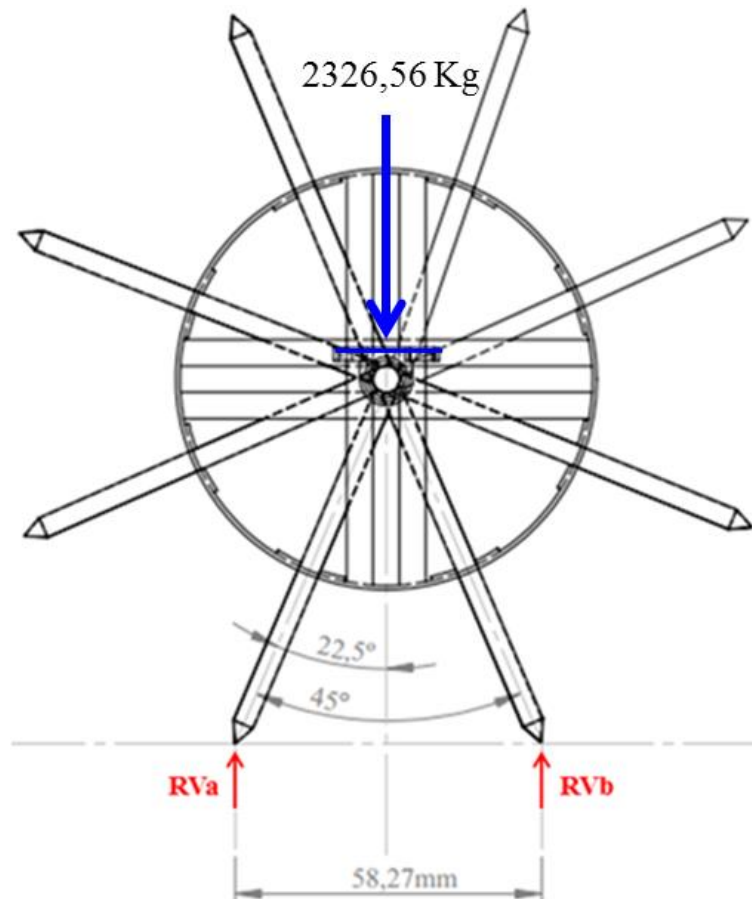
$$\text{Volume do EPFM} + \text{Projeto} = 0,3144 \text{ m}^3$$

$$\text{Massa Total} = 0,3144 \text{ m}^3 \times 7400 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\text{Massa Total} = 2326,56 \text{ kg}$$

A Figura 31 representa a peso estático de 2326,56 kg gerado pela estrutura porta-ferramentas móvel e pelo próprio protótipo agindo sobre o eixo, bem como a reação gerada nas extremidades de suas hastes.

Figura 31 – Peso exercido sobre eixo do protótipo



*Considerando o mecanismo estático:

$$RVa + RVb = 2326,56 \text{ kg}$$

$$RVa = 2326,56 \text{ kg} - RVb \quad (1)$$

$$\sum Fy = 0$$

$$RVa \times \text{sen}(22,5^\circ) \times (-2326,56) + RVb \times (-\text{sen}(22,5^\circ)) \times (-2326,56) = 0$$

$$RVa \times (-890,33) + RVb \times (890,33) = 0 \quad (2)$$

Substituindo (1) em (2):

$$(2326,56 - RVb) \times (-890,33) + RVb \times (890,33) = 0$$

$$RVb \times 890,33 - (2,071 \times 10^6) + RVb \times 890,33 = 0$$

$$RVb = \frac{2,071 \times 10^6}{1780,66}$$

$$RVb = 1163,28 \text{ kg} \quad (3)$$

Cálculo do momento de inércia no ponto A (RVa).

$$\sum Ma = 0$$

$$\frac{0,5827m}{2} \times (-2326,56) + RVb \times 0,5827m = 0$$

$$RVb = \frac{677,84 \text{ kg m}^{-1}}{0,5827m} \longrightarrow \mathbf{RVb = 1.163,28 \text{ kg}}$$

Substituindo ③ em ①:

$$RVa = 2326,56 - RVb$$

$$RVa = 2326,56 - 1.163,28$$

$$\mathbf{RVa = 1163,28 \text{ kg}}$$

Considerando que cada reação possui duas hastes em contato com o solo, logo:

$$\text{Massa por Haste} = \frac{1163,28}{2 \text{ hastes}} \qquad \mathbf{Massa por Haste = 581,64 \text{ kg}}$$

Tendo em vista um Fator de Segurança de 2.5:

$$\text{Massa Total por Haste} = 581,64 \text{ kg} \times 2.5$$

$$\mathbf{Massa Total por Haste = 1454,1 \text{ kg}}$$

Levando em conta um dos fundamentos da Física, em que a força é igual à multiplicação da massa e aceleração. Logo, tem-se uma massa sujeita a aceleração da gravidade (tendo como base valores arredondados da gravidade na superfície da terra de $9,81 \text{ m s}^{-2}$).

Transformando em Newtons para determinar a força exercida sobre cada haste e facilitar a aplicação no software.

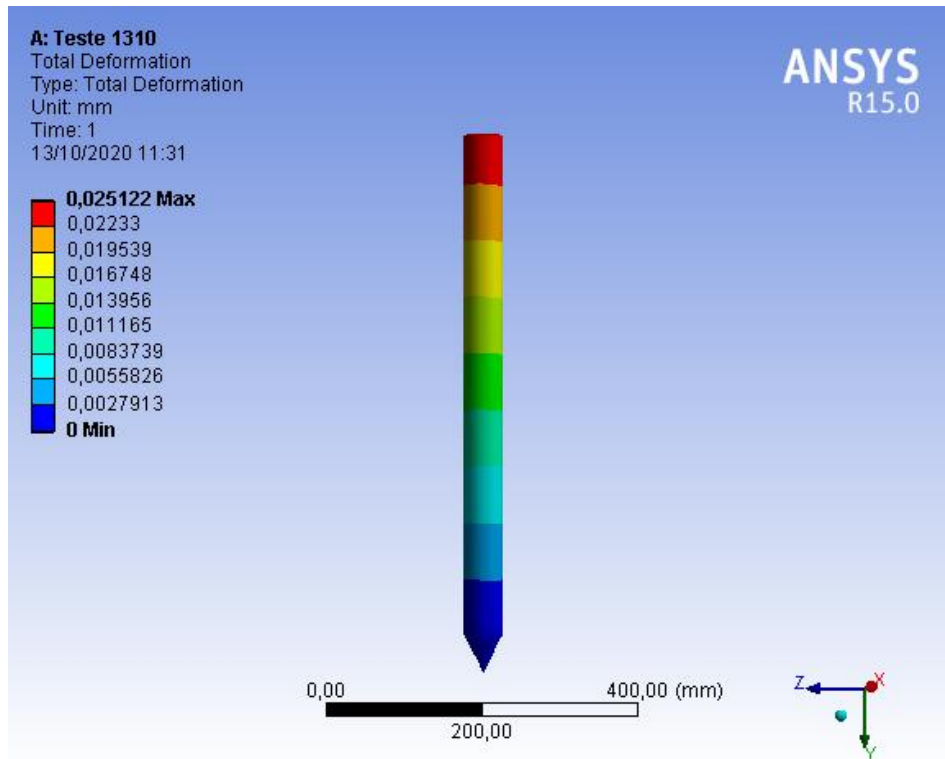
$$\text{Força Total por Hastes} = 1454,1 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m s}^{-2}$$

$$\mathbf{Força Total por Hastes = 14.264,72 \text{ kg m s}^{-2}}$$

$$\mathbf{Força Total por Hastes = 14.264,72 \text{ N}}$$

A partir dos dados obtidos em cálculos, ou seja, a força exercida sobre cada haste com um fator de segurança de 2.50, a haste do projeto foi submetida à análise dos métodos finitos para a obtenção da deformação total, conforme a Figura 32.

Figura 32 - Deformação total em milímetros da haste penetradora



O resultado do comportamento da deformação era esperado, sendo que o elemento haste sofreu um aumento da deformação conforme a distância da carga, ou seja, quanto mais próximo do engaste, maior o nível de deformação. O ponto de fixação entre haste-eixo é o local onde ocorreu a deformação máxima de 0,025 mm, uma deformação quase que desprezível, entretanto, indica demanda de maiores cuidados no que tange a pontos de soldagens ou ainda pontos de reforços quando aprimorado em projetos futuros. Segundo Alonço (2004), as descrições de informações são importantes e facilitam um desenvolvimento sistemático, na qual implicações futuras são previsíveis.

4.2 CARACTERÍSTICAS DO SOLO E MATÉRIA SECA

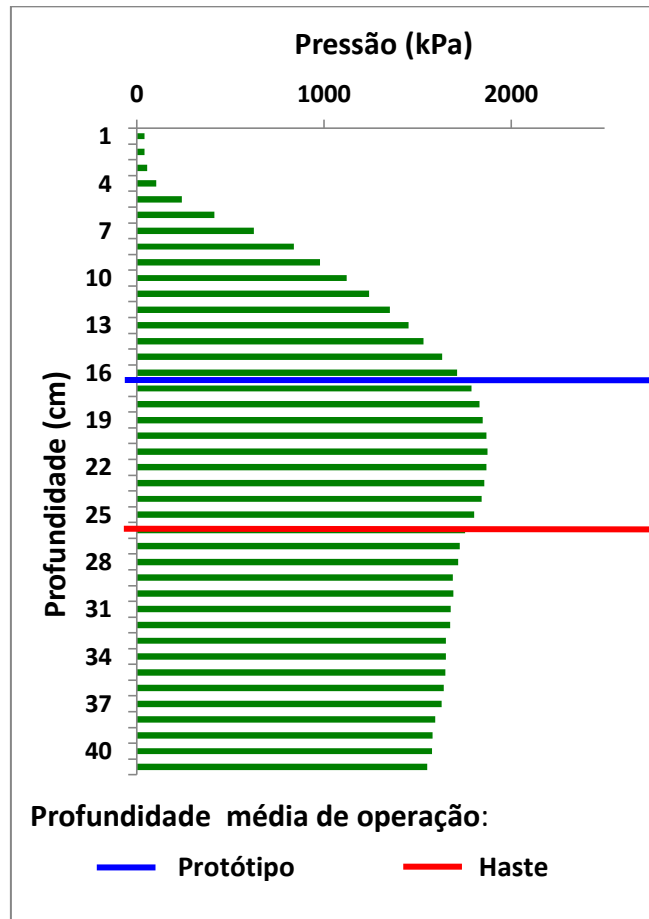
Quanto à presença de matéria seca sobre a superfície de solo, foi constatado um peso médio de 5800 kg ha⁻¹. Para o teor de água presente no solo ocorreu uma grande variabilidade, os valores máximos encontrados foram para o tratamento 3 na repetição 2 (44,78%) e tratamento 4 repetição 1 (41,18%); para os valores mínimos foram no tratamento 2 repetição 1 (16,67%) e tratamento 5 repetição 4 (18,46%). Os valores máximos, médios e mínimos das variáveis do solo estão expressos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores determinados das variáveis do solo.

Características	Unidade	Valor		
		Mínimo	Médio	Máximo
Densidade do solo	g cm ⁻³	2,00	2,15	2,24
Porosidade	m ³ m ⁻³	34,39	40,85	47,18
Teor de água	kg kg ⁻¹	16,67	25,58	44,78
Índice de Cone	kPa	41,23	1.375	3.024
Profundidade do IC	cm	1,00	-	11,00
Argila	%	-	17	-
Silte	%	-	40	-
Areia	%	-	43	-

A Figura 33 representa a média do Índice de Cone em função da profundidade da área utilizada no experimento e a profundidade média que cada mecanismo operou. Apesar de não ocorrer médias superiores a 2,0 MPa, ao menos duas das cinco amostragens por tratamento superaram este nível, localizado na profundidade, variando entre 0,13 e 0,26 m. Segundo a literatura, acima desse índice, ocorre um fator limitante ao desenvolvimento das raízes da cultura. As médias de cada unidade experimental podem ser observadas no Apêndice A.

Figura 33 – Médias de Índice de Cone em função da profundidade.



4.3 ANÁLISE DA VARIÂNCIA

A análise da variância revelou significância a 5% de probabilidade para a interação ferramenta x velocidade, por meio das variáveis força de tração (F_t), potência média na barra de tração (PMBT), consumo horário de combustível (Ch) e patinamento (%). Efeitos significativos para as variáveis, área de solo mobilizada (A_m), área de solo elevada (A_e), profundidade de sulco (P), largura de sulco (L), consumo específico de combustível (C_e), consumo específico operacional (CEOp) e resistência específica operacional (REOp) foram verificados para o fator ferramenta (Apêndice C). Para o empolamento do solo não foi verificada diferença significativa em nenhum tratamento (Tabela 7).

As respostas das variáveis em relação às interações demonstram que o tipo de ferramenta influencia no esforço tratório e na demanda energética. De acordo com Bertolotto et al. (2006), além da característica física do implemento, diversos fatores influenciam no desempenho energético e operacional de sistemas agrícolas motomecanizados, sendo que,

entre os mais significativos, foram destacadas as características inerentes ao solo e à velocidade de operação.

Granja (2018), ao analisar quatro conjuntos mecanizados: trator-grade, trator-escarificador, trator-semeadora e trator-sulcador, observou que o fator velocidade apresentou uma grande influência sobre a variável consumo de combustível para os conjuntos trator-grade, trator-sulcador e trator-semeadora, exceto para o conjunto trator-escarificador que não foi significativo. Além disso, Furini (2018) avaliou o desempenho operacional de cinco hastes e ponteiros na descompactação do solo e constatou que, com o aumento da velocidade, apenas dois dos cinco modelos de hastes apresentaram influência significativa na demanda energética. Bellé (2013) comparou o comportamento de um elemento descompactador experimental e de dois comerciais para a escarificação em sistema de plantio direto. O autor concluiu que o elemento experimental obteve um melhor desempenho, ao que chamou de principais variáveis, quando comparado aos elementos comerciais que foram: força média na barra de tração, potência média na barra de tração e consumo horário de combustível.

Segundo Portella (1983), ao analisar as relações solo-implemento, foi constatado que as variações geométricas das ferramentas estão relacionadas a outros fatores externos, tais como: velocidade de deslocamento, condições do solo e profundidade de trabalho, ou seja, a variação da geometria dos sistemas solo-ferramenta resultam em diferentes necessidades de esforço e tração e em diferentes reações do solo. O fato é que a configuração física do mecanismo agrícola interfere diretamente no esforço tratório e na demanda energética (SANTOS, ALONÇO & BAUMHARDT, 2011).

Tabela 7 – Resumo da análise de variância para as variáveis referentes às ferramentas haste e protótipo com as velocidades (1,30, 1,60 e 1,90 m s⁻¹).

QUADRADOS MÉDIOS												
F.V.	GL	Ft (kN)	Pbt (kW)	Ch (l h ⁻¹)	Pa (%)	Am (m ²)	Ae (m ²)	Em (%)	P (m)	L (m)	ReOp (kN m ⁻²)	Ft.Esp (kN m ⁻¹)
Ferramentas (A)	1	170,37*	453,24*	0,736 ^{ns}	328,78*	0,0055*	1,2x10⁻⁴*	116,14 ^{ns}	0,054*	0,013*	10535,4*	1003,63*
Velocidades (D)	2	0,444 ^{ns}	36,86*	0,806*	0,946*	4,1x10 ⁻⁵ ^{ns}	4,7x10 ⁻⁵ ^{ns}	111,30 ^{ns}	4,9x10 ⁻⁴ ^{ns}	0,003 ^{ns}	96,34 ^{ns}	12,91 ^{ns}
A x D	2	1,703*	19,18*	1,533*	4,209*	1,1x10 ⁻⁴ ^{ns}	7,5x10 ⁻⁵ ^{ns}	171,58 ^{ns}	3,9x10 ⁻⁴ ^{ns}	0,004 ^{ns}	526,57 ^{ns}	40,11 ^{ns}
Repetição	3	0,818	2,436	0,349	4,7x10 ⁻⁴	1,4x10 ⁻⁴	1,3x10 ⁻⁵	51,00	4,9x10 ⁻⁴	0,002	255,69	5,19
CV (%)		10,20	11,02	28,78	10,90	20,08	30,82	44,71	11,02	9,55	25,51	15,99
Erro		0,365	1,10	0,214	5,8x10 ⁻⁴	1,8x10 ⁻⁴	2,1x10 ⁻⁵	110,23	5,4x10 ⁻⁴	0,002	468,08	18,28

* e ^{ns}, significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

FV – Fator de Variação; **Ft** – Força média na barra de tração; **Pbt** – Potência média na marra de tração; **Ch** – Consumo horário de combustível; **Pa** - Patinamento; **Am** – Área de solo mobilizada; **Ae** – Área de solo elevada; **Em** – Empolamento do solo; **P** – Profundidade do sulco; **L** – Largura do sulco; **ReOp** – Resistência específica Operacional; **Ft.Esp** – Força de tração específica.

4.4 FORÇA DE TRAÇÃO

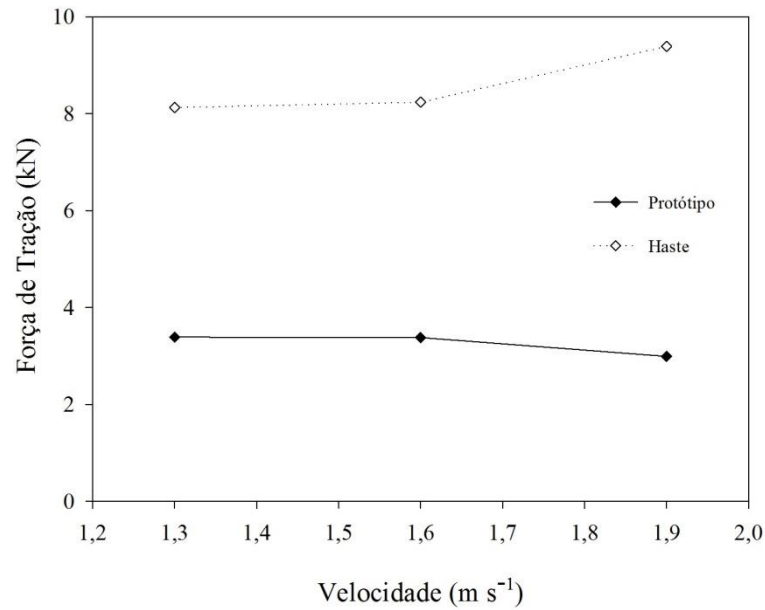
Previamente a discussão das variáveis é importante enfatizar que de acordo com a Figura 11, a profundidade média de operação pelo protótipo e pela haste foi diferente. Além disso, a Tabela 2 mostra a gigantesca variabilidade do teor de água nas unidades experimentais, ocorrendo uma diferença entre o teor de água máximo e a mínimo encontrado de 28,11%. Tais diagnósticos tem influência direta sobre as variáveis, principalmente no que diz respeito à demanda energética e esforço tratório.

Deste modo, para a variável força de tração a utilização da ferramenta protótipo apresentou melhor desempenho quando comparada à haste, diferindo estatisticamente. O emprego de diferentes velocidades operacionais não alterou a resposta para as ferramentas haste e protótipo.

O fator velocidade não foi significativo para a variável força de tração. Entretanto, com o aumento da velocidade de deslocamento, houve uma tendência no aumento da demanda de tração por parte da haste, enquanto que o protótipo comportou-se de maneira inversa, ou seja, com o incremento da velocidade reduziu o requerimento de tração. Sendo assim, o resultado é condizente com o que afirmam diversos autores (PALMA, 2013; CONTE et al., 2008; MACHADO & CHANG, 1996; SOUZA, 1989; LANÇAS, 1988), tendo em vista que tal efeito está relacionado à geometria e ao princípio de funcionamento da ferramenta, responsável direta na alteração da demanda energética e no desempenho.

A Figura 34 ilustra o comportamento da demanda de força de tração em função do aumento da velocidade de deslocamento para as duas ferramentas: protótipo e hastes.

Figura 34 – Tendência da demanda de força de tração em função da velocidade.



A função matemática obtida na Tabela 8 descreve a demanda de força de tração do protótipo e haste em função da velocidade.

Em que,

y = Força de tração (kN);

x = Velocidade (m s⁻¹);

Tabela 8 – Função matemática que descreve a demanda de força de tração para cada mecanismo.

Ferramenta	Função matemática	R ²
Protótipo	$y = -2,1111x^2 + 6,0889x - 0,9578$	0,99
Haste	$y = 5,7778x^2 - 16,389x + 19,671$	0,99

O protótipo apresentou uma redução na demanda de tração de aproximadamente - 11,8% ao elevar o nível da velocidade de 1,30 m s⁻¹ para 1,90 m s⁻¹. A haste comercial com comportamento antípoda ao protótipo, elevou o nível de requerimento de tração em 15,50% ao aumentar a velocidade de deslocamento de 1,30 m s⁻¹ para 1,90 m s⁻¹.

A exigência média de tração da haste foi aproximadamente 164,30% superior ao que foi solicitado pelo protótipo. A haste requereu em média 8,59 kN, enquanto que o protótipo

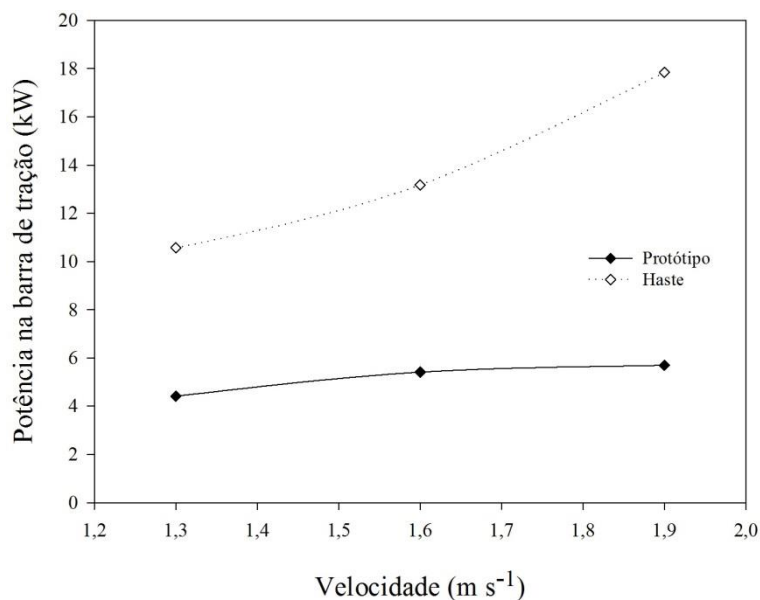
demandou apenas 3,25 kN. O comportamento da demanda de tração pela haste está condizente com dados obtidos pela literatura (GASSEN et al., 2014; ROSA et al., 2008; MACHADO et al., 1996). Quanto ao protótipo, não foi encontrado mecanismo semelhante no mercado ou em periódicos, entretanto, a exigência de tração foi semelhante aos dados obtidos na literatura, a partir do estudo de hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras (FRANCETTO, 2016; TRENTIN, 2015; SILVEIRA et al., 2013; SILVA, 2013).

4.5 POTÊNCIA NA BARRA DE TRAÇÃO

A potência na barra de tração é uma relação direta entre velocidade de deslocamento e força de tração. Deste modo, foi verificado que a haste comercial apresentou maior demanda em relação ao protótipo nas três velocidades estudadas. À medida que aumentou a velocidade de operação, houve um aumento no requerimento de potência para as duas ferramentas analisadas, no entanto, foram constatados efeitos significativos apenas para a ferramenta haste.

O comportamento do requerimento de potência na barra de tração em função da velocidade de deslocamento para as duas ferramentas, haste e protótipo, pode ser observado na Figura 35.

Figura 35 – Tendência da demanda de potência na barra de tração em função da velocidade.



A função matemática obtida na Tabela 9 descreve a tendência de demanda de potência na barra de tração em função da velocidade por parte do protótipo e da haste.

Em que,

y = Potência na barra de tração (kW);

x = Velocidade (m s^{-1});

Tabela 9 – Função matemática que descreve a demanda de potência na barra de tração para cada mecanismo.

Ferramenta	Função matemática	R ²
Protótipo	$y = -4x^2 + 14,933x - 8,2433$	0,99
Haste	$y = 11,389x^2 - 24,328x + 22,949$	0,97

O protótipo demandou em média 5,17 kW de potência na barra, enquanto que a haste requisitou 13,86 kW. Uma diferença de 168% a mais na demanda de potência. A maior diferença, em valores absolutos, no requerimento de potência entre o protótipo e a haste ocorreu na máxima velocidade ($1,90 \text{ m s}^{-1}$), com a qual houve uma demanda a mais, por parte da haste, de 213,50% em relação ao protótipo.

Como citado anteriormente, para a haste houve diferença significativa na demanda de potência ao elevar a velocidade de deslocamento. O percentual na exigência de potência, ao aumentar a velocidade de 1,30 para $1,60 \text{ m s}^{-1}$, foi um aumento de apenas 24,70%, enquanto que a elevação da velocidade de $1,60 \text{ m s}^{-1}$ gerou um aumento de 35,4%.

Os resultados obtidos no estudo para a demanda de potência pela haste estão harmônicos com os encontrados na literatura. Diferentes pesquisadores, em seus estudos (LOPES et al., 2019; SANTOS et al., 2016; SANTOS, 2010 a; BIANCHINI, 1999; MACHADO et al., 1996), encontraram valores próximos e até semelhantes.

É importante salientar que tal resultado obtido está estreitamente relacionado à profundidade de operação em cada nível de velocidade. Haja vista, na mínima velocidade estudada ($1,30 \text{ m s}^{-1}$) o protótipo operou em profundidade média de 0,166 m enquanto que a haste operou a 0,275 m; na velocidade intermediária ($1,60 \text{ m s}^{-1}$) o protótipo manteve a profundidade de trabalho próximo a 0,164 m enquanto que a haste penetrou em média 0,246 m; já na velocidade máxima ($1,90 \text{ m s}^{-1}$), o protótipo atuou a 0,163 m e a haste a 0,258 m.

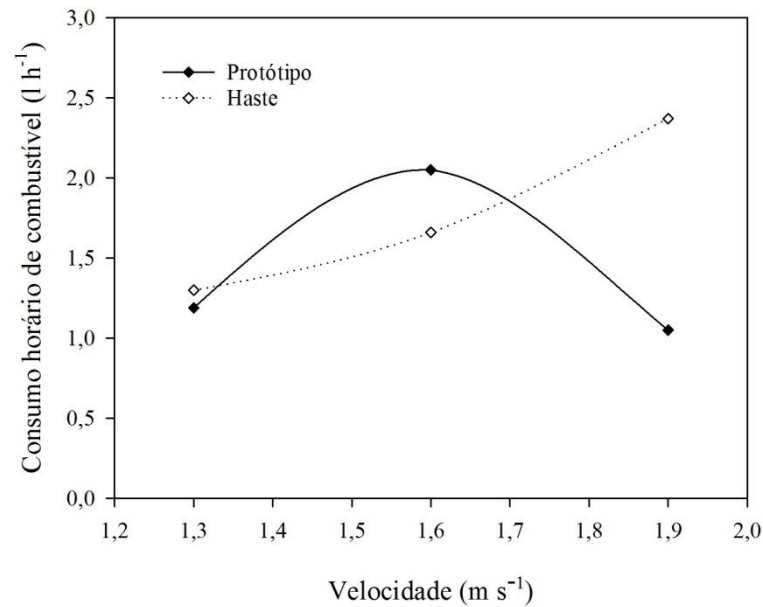
Santos, Alonço e Baumhardt (2011) citam que há inúmeros aspectos que interferem nas operações de escarificação e subsolagem nos solos agrícolas, dentre os fatores que são destacados é a profundidade de operação. Os autores afirmam ainda, que tal variável influencia outros fatores como: força de tração, potência na barra e consumo horário de combustível. Seki (2010) avaliou a demanda energética de escarificadores e subsoladores em diferentes profundidades em áreas de plantio direto e cultivo mínimo. O autor concluiu que a demanda energética foi proporcional às profundidades de trabalho das hastes. Ele cita ainda, que quando maior a profundidade de operação maior é a demanda de energia. Para Portella (1983) a demanda de força de tração de um implemento é em função das condições de trabalho, dentre as variáveis citadas, a profundidade de trabalho. Kichler et al (2007) ao monitorar o desempenho de subsoladores em tempo real para quantificar os requisitos de energia, constataram que houve um aumento na demanda de força de tração (120%) e no consumo horário de combustível (20%) quando foi aumentado a profundidade de operação de 0,229 m para 0,355 m.

4.6 CONSUMO HORÁRIO DE COMBUSTÍVEL

Foi observado que o consumo horário de combustível apresentou diferença significativa, tanto para a haste quanto para o protótipo ao alterar a velocidade de deslocamento. Ao elevar o nível de velocidade a haste aumentou a demanda de consumo horário, entretanto, o protótipo comportou-se de maneira inconstante.

A Figura 36 mostra a representação gráfica do consumo de combustível do trator agrícola em função da velocidade de deslocamento para tracionar a haste e o protótipo.

Figura 36 – Tendência do consumo horário de combustível em função da velocidade.



Na Tabela 10, está exposta a função matemática obtida que descreve a tendência do consumo horário de combustível em função da velocidade por parte do protótipo e da haste.

Em que,

y = Consumo horário de combustível (l h⁻¹);

x = Velocidade (m s⁻¹);

Tabela 10 – Função matemática que descreve a demanda de combustível por hora para cada mecanismo.

Ferramenta	Função matemática	R ²
Protótipo	$y = -10,333x^2 + 32,833x - 24,03$	0,96
Haste	$y = 1,9444x^2 - 4,4389x + 3,7844$	0,98

A utilização da haste proporcionou o aumento no consumo de combustível conforme foi elevado o nível de velocidade. O protótipo, por sua vez, requereu um consumo na primeira velocidade (1,30 m s⁻¹) próximo daquele obtido com a utilização da haste, entretanto, nas demais velocidades se comportou de maneira variável, ou seja, a menor demanda de combustível foi na máxima velocidade (1,90 m s⁻¹), enquanto que o maior consumo ocorreu na velocidade intermediária (1,60 m s⁻¹).

Na máxima velocidade, a disparidade média do consumo horário de combustível entre as ferramentas foi de $1,32 \text{ l h}^{-1}$ (125,7%), com a maior demanda por parte da haste. Enquanto que na velocidade média o consumo foi inverso, o protótipo demandou $0,39 \text{ l h}^{-1}$ (23,50%) a mais que a ferramenta haste. Já na primeira velocidade a diferença foi mínima, apenas 1,0%.

No que tange ao consumo de combustível por parte da haste, os dados estão de acordo com os obtidos na literatura. Ao avaliarem o desempenho de um conjunto trator-escarificador em dois teores de água no solo e duas profundidades de trabalho, Compagnon et al. (2013) encontraram uma demanda média de combustível por haste em torno de $1,43$ a $1,50 \text{ l h}^{-1}$, para ambas profundidades (0,20 e 0,30 m) e ambos teores de água (26,2% e 21,9). Santos Filho (2019), em sua pesquisa, analisou o desempenho energético de um trator agrícola em operação de escarificação em função da velocidade e dos desgastes dos pneus. O autor constatou que, para o consumo de combustível, não houve interação entre as variáveis e observou valores próximos a $2,20 \text{ l h}^{-1}$. Fiorese et al. (2019) estudaram o desempenho de um trator agrícola com o implemento escarificador no preparo do solo, as avaliações foram realizadas em duas marchas de trabalho compatíveis com a operação, as velocidades foram de $1,25$ e $1,67 \text{ m s}^{-1}$ e profundidade média regulada de 0,30 m. Os autores encontraram um consumo médio de combustível por haste de $1,88$ e $2,35 \text{ l h}^{-1}$. Já Machado et al. (2015) determinaram o gasto energético de um subsolador com velocidade de operação de $1,38 \text{ m s}^{-1}$ e em diferentes profundidades, eles constataram um consumo médio de combustível em torno de $2,6 \text{ l h}^{-1}$, a uma profundidade média de operação de 0,15 m.

Para o protótipo, a hipótese atribuída à drástica redução no consumo de combustível na máxima velocidade é que, de acordo com o princípio de funcionamento da ferramenta em um grau maior de giro, os solavancos bruscos diminuem, tornando uma movimentação mais estável.

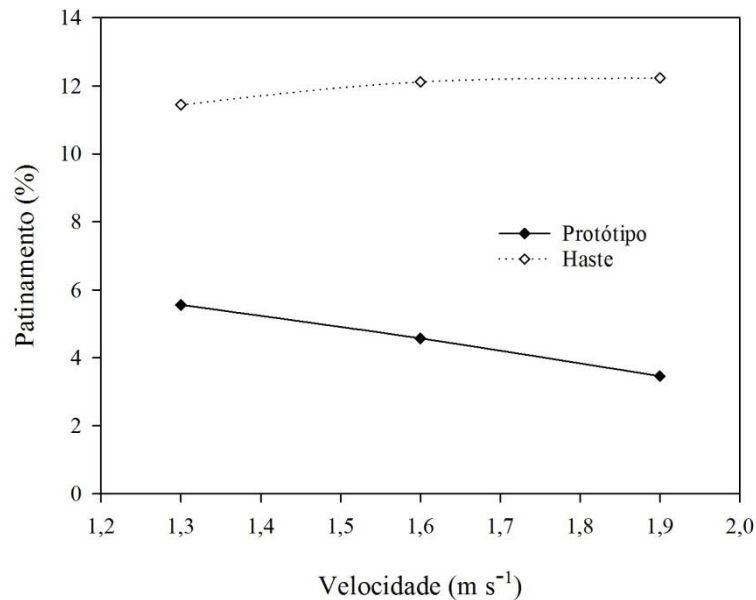
4.7 PATINAMENTO

A variável patinamento diferiu-se estatisticamente entre as ferramentas, como pode ser observado na. Foi constatado que para o protótipo obteve-se um percentual de patinamentos nos rodados motrizes do trator menor em relação quando se trabalhou com a haste.

À medida que se elevou o nível de velocidade, tracionando o protótipo, o patinamentos dos rodados motrizes do trator tendeu a reduzir. No entanto, para a haste o comportamento foi inverso, conforme o incremento da velocidade de deslocamento aumentou-se o nível de patinamento.

O comportamento da variável patinamento em função da velocidade de deslocamento para as duas ferramentas haste e protótipo, pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 – Tendência do patinamento dos rodados motrizes em função da velocidade.



Na Tabela 11, está exposta a função matemática obtida que descreve a tendência do patinamento dos rodados motrizes em função da velocidade gerada ao tracionar o protótipo e a haste.

Em que,

y = Patinamento dos rodados motrizes (%);

x = Velocidade (m s⁻¹);

Tabela 11 – Função matemática que descreve o percentual de patinamento para cada mecanismo.

Ferramenta	Função matemática	R ²
Protótipo	$y = -0,6667x^2 - 1,3667x + 8,4833$	0,98
Haste	$y = -3x^2 + 10,833x + 2,4467$	0,99

A diferença da variável patinamento entre as ferramentas, quando comparada na mesma velocidade, foi de 100% superior quando da utilização da haste na primeira velocidade

(1,30 m s⁻¹), elevando-se para 162% na velocidade média (1,60 m s⁻¹) até atingir um valor na casa de 253% maior na velocidade máxima (1,90 m s⁻¹). Quanto ao protótipo, este proporcionou uma redução no patinamentos das rodas motrizes do trator ao elevar a velocidade de 1,30 para 1,60 m s⁻¹ (-17,8%) e de 1,60 para 1,90 m s⁻¹ (-24,3%). Enquanto que quando da utilização da ocorreu uma pequena elevação do patinamento das rodas motrizes do trator em detrimento do aumento da velocidade, acréscimo de 6,0% e 1,0%, respectivamente, não se mostrando significativamente diferente.

Segundo a norma EP496.2 (ASABE, 2000), o patinamento das rodas motrizes, ou ainda chamado de redução de deslocamento é considerada perda de potência. Entretanto, essa mesma Norma estabelece faixas de patinamentos ideais, ou seja, percentual de patinamento aceitável da roda para cada condição de superfície, na qual a máquina desempenha a máxima eficiência de tração. Valores entre 4 e 8% para superfícies de concreto, 8 a 10% para solos firmes (não mobilizados), 11 a 13% para solos preparados para o cultivo e 14 a 16% para areias. A Norma CODE 2 (2021) ratifica tais níveis ao estipular um limite máximo de 15% de patinamento dos rodados motrizes do trator agrícola durante os ensaios.

De acordo com as Normas citadas, a haste proporcionou médias aceitáveis de patinamentos, resultados próximos aos que foram encontrados por Masiero, Lanças & Monteiro (2011) que avaliaram o rendimento de tratores agrícolas em diferentes condições de superfície. Os autores encontraram valores em média de 7,6% para superfície de concreto, 11,9% para solo firme, 14,6% para solo com cobertura vegetal e 16,2% para solo mobilizado.

O protótipo gerou um patinamento dos rodados motrizes do trator muito abaixo dos níveis pré-estabelecidos em Norma, visto que apresentou em média 4,50%, condição encontrada na faixa de valores para patinamentos em superfícies de concreto. Silveira (2018) analisou a eficiência energética de um trator agrícola em pista de concreto em função do desgaste dos pneus, o autor constatou níveis de patinamento dos rodados motrizes em média de 4,40% para as diferentes velocidades e média de 5,88% para os pneus novos. Ele destacou ainda que o patinamento aumentou ao elevar os níveis de velocidade, fato inverso do que ocorreu com o protótipo. Fiorese et al., (2015), ao realizar uma análise do torque nos rodados motrizes de um trator agrícola submetido a ensaios de tração em pista de concreto, observou que, ao aplicar uma força de tração de 16 kN, o trator apresentou médias de patinamentos de 4,30%, estando de acordo com as normatizações.

4.8 VARIÁVEIS COM EFEITOS SIGNIFICATIVOS PARA FERRAMENTA

Na tabela 12, está apresentado o desdobramento do fator de variação ferramenta, sendo que a velocidade de deslocamento não apresentou significância. Desse modo, consta na tabela os valores médios para as três velocidades.

Tabela 12 – Variáveis com efeitos significativos para ferramenta.

Variáveis	Ferramenta	
	Protótipo	Haste
Área mobilizada (m ²)	0,0532 b	0,0837 a
Área elevada (m ²)	0,0127 b	0,0172 a
Profundidade de sulco (m)	0,165 b	0,259 a
Largura de sulco (m)	0,500 b	0,546 a
Res. Esp. Operacional (kN m ⁻²)	63,86 b	105,76 a
Tração específica (kN m ⁻¹)	20,27 b	33,21 a

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Segundo Becker et al. (2019) a forma mais correta de determinar o desempenho de ferramentas em operação de mobilização do solo, é quantificar a demanda de energia e comparar aos efeitos gerados pelos mecanismos ativos da ferramenta no solo.

Deste modo, em se tratando de um implemento destinado à mobilização do solo, embora o protótipo tenha demandado um menor consumo energético, isto é, resistência específica operacional 39,6% menor quando comparado a haste, esta executou uma mobilização de solo 36,4% maior. Portanto, ficou evidenciado que o protótipo requer aperfeiçoamento no que tange à área de solo mobilizada para ampliar o seu desempenho. A haste, quando comparada ao protótipo, apresentou um incremento na resistência específica operacional de 41,9 kN m⁻² (65,6%), entretanto mobilizou o solo em média 0,030 m² a mais que o mecanismo protótipo.

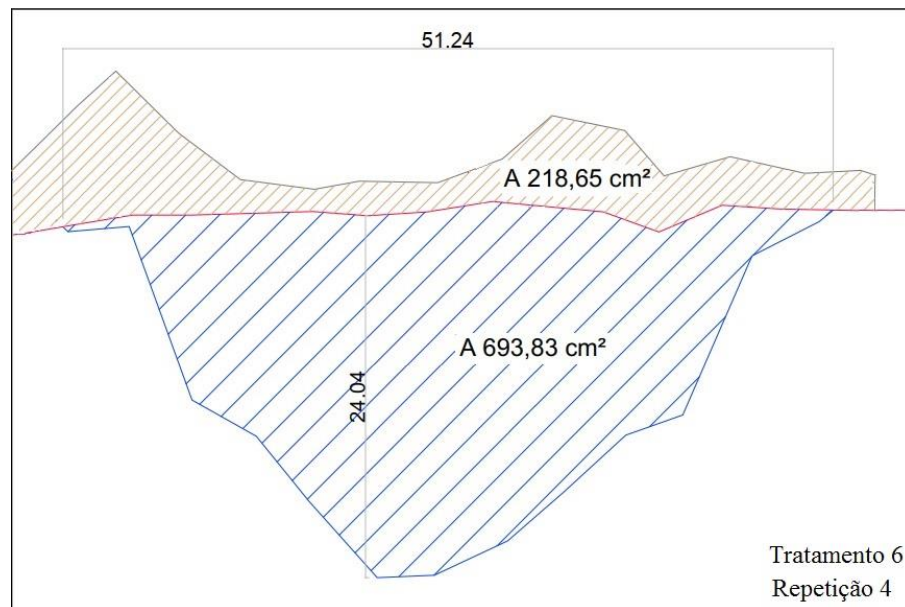
Tal efeito está associado a três variáveis que influenciaram diretamente na resistência específica operacional: a significativa diferença de profundidade que cada ferramenta operou; a heterogeneidade da área experimental, no que diz respeito ao teor de água; e a expressiva diferença nos índices médios de resistência à penetração. Apesar da gigantesca variabilidade da umidade do solo encontrada e esta influenciar de modo direto na resistência à penetração (ASSIS et al., 2009), a haste por sua vez, operou em camadas de maiores índices de cone

quando comparado ao protótipo. Quanto à profundidade de trabalho, Gamero (2008) avaliou o desempenho operacional de um subsolador de hastes em função desta (0,25 e 0,35 m), e observou um incremento no requerimento de força e potência na barra de tração ao aumentar a profundidade de operação. Sasaki (2000) ao estudar o desempenho operacional de hastes subsoladoras em solos com diferentes tores água, constatou que houve um incremento de 70% na variável resistência específica operacional ao operar em solo com maior umidade. Deste modo, embora o protótipo tenha demandado uma menor resistência específica operacional, este operou em condições mais favoráveis para tal desempenho, quando comparado à haste.

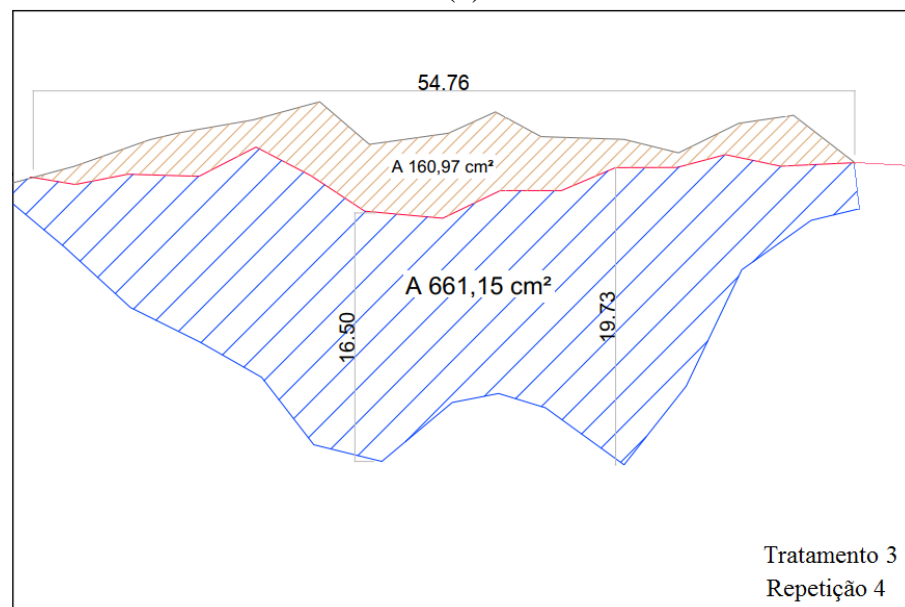
Apesar da velocidade de deslocamento não influenciar significativamente a variável resistência específica, a ferramenta haste apresentou um incremento de valores, enquanto que para o protótipo, ocorreu o efeito inverso. Os valores médios da variável para a haste estão em conformidade com os encontrados na literatura. Os dados obtidos por Bellé et al., (2014) que observaram a demanda energética e a mobilização do solo com o uso de escarificadores em sistemas de semeadura direta, encontraram valores próximos a $103,3 \text{ kN m}^{-2}$, corroboram com os dados encontrados no estudo. Entretanto, Sasaki, Gonçalves & Bentivenha (2005) estudaram o comportamento de dois tipos de hastes subsoladoras, parabólica e reta-inclinada, operando em profundidade média de 0,35 metros. Os autores constataram uma resistência específica por haste em torno de 43 kN m^{-2} . Já Fernandes & Gamero (2010) avaliaram o desempenho de um escarificador operando a 0,156 m na implantação da cultura do girassol, os autores encontraram valores de resistência específica operacional em torno de $13,63 \text{ kN m}^{-2}$ por haste. Lopes (2018), ao analisar o desempenho operacional e energético do conjunto trator-escarificador nas profundidades de 0,20 e 0,30 m, encontrou valores de resistência específica por haste de 8,20 e $10,0 \text{ kN m}^{-2}$, respectivamente. Tais resultados estão bem abaixo dos apresentados por ambos os mecanismos estudados.

A ferramenta haste apresentou maiores níveis de profundidade de sulco, penetrando aproximadamente em média 57% a mais que o protótipo. Tal resultado se da em razão da sua geometria (parabólica) conforme descrito na Figura 3, ou seja, a curvatura da ferramenta favorece o aprofundamento constante no solo. Esta questão é mencionada por Silva et al. (2015) como uma das vantagens desses implementos, a facilidade de penetração no solo. Entretanto, a hipótese atribuída ao protótipo pela baixa penetração é a falta de lastragem no seu eixo principal associado à configuração física e dinâmica (sistema rotativo). A Figura 38 mostra o perfil gerado pelos mecanismos.

Figura 38 – Perfil do solo. Haste escarificadora (a) e protótipo (b).



(a)



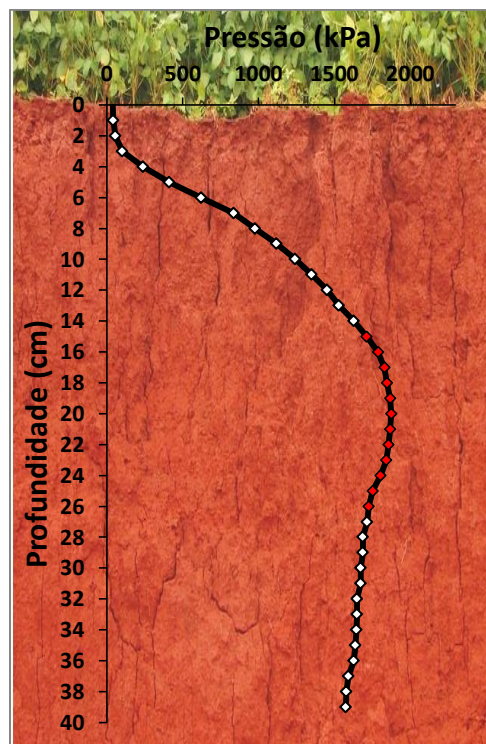
(b)

Além disso, a profundidade de penetração interferiu nas demais variáveis, haja vista, a haste operou em profundidades médias de quase 0,01 m a mais que o protótipo. Considerando a gigantesca variabilidade do teor de água encontrado na área experimental, como citado anteriormente, o excesso de água atua com um lubrificante nestas condições. Santos, Alonço & Baumhardt (2011) citam que o teor de água exerce grande influência no processo de escarificação e subsolagem. Entretanto Machado et al. (1996) estudaram o trabalho desenvolvido por escarificador em planossolo, operando em três velocidades (0,72, 1,0 e 1,33 m s^{-1}), dois níveis de teor de água (7,2 e 12,0%) e profundidade média de 0,20 m. Os autores

concluíram que o teor de água no solo não influenciou significativamente as variáveis esforço de tração, potência na barra de tração, área transversal de solo mobilizado e resistência específica operacional.

No entanto, é importante salientar que a haste operou em zonas de maiores índices de resistência à penetração, profundidade variando entre 0,15 a 0,26 m (Figura 39). Enquanto que o protótipo operou em camadas mais superficiais, não tão adensadas.

Figura 39 – Zona de atuação da haste em que o protótipo não alcançou. Médias de Índice de Cone em função da profundidade.



Quanto à variável largura de sulco, a ferramenta haste apresentou valores em média de 0,046 m (9,2%) a mais quando comparado ao protótipo, diferindo significativamente. Pelo fato da haste ter trabalhado em maiores profundidades, proporcionou a formação de sulcos mais largos, além disso, interferindo diretamente na área de solo mobilizada.

No que tange à área de solo elevada, o protótipo mostrou melhores resultados, elevando 26,2% menos solo quando comparado à haste escarificadora. É um resultado satisfatório, de modo que segundo Macedo, Monteiro & Santos (2016) os implementos escarificadores e subsoladores foram desenvolvidos a fim de permitir a permanência de restos vegetais na superfície. Ou seja, o protótipo apresentou melhores resultados no que diz respeito

à área de solo elevada quando comparado à ferramenta desenvolvida para sistemas conservacionistas. Díaz et al. (2017) cita que ao reduzir a área de solo elevada após as operações, permite o aumento de teor de matéria orgânica, que melhora a disponibilidade de nutrientes e aumenta a atividade biológica. A área de solo elevada, área de solo mobilizada, profundidade e largura de sulco de cada unidade experimental pode ser observada no Apêndice B.

A variável tração específica é a relação direta entre força de tração e profundidade de sulco, tal relação à torna como uma das variáveis de maior importância no que diz respeito a parâmetros de desempenho, juntamente com a resistência específica operacional determinada a partir da relação de força de tração e área de solo mobilizada (FRANCETTO, 2017). O mesmo autor cita ainda, que ao analisar a demanda de tração entre ferramentas que realizam a mesma função, mas que operam em diferentes profundidades, se faz necessário determinar a força de tração específica, na qual permitirá uma comparação mais justa e verídica sobre o desempenho energético realizado pelas ferramentas.

A haste apresentou maior média de força de tração específica (63,84%) em relação ao protótipo. O efeito da velocidade não foi significativo para a variável, no entanto, à medida que se elevou a velocidade de deslocamento houve um incremento por parte da haste. Efeito inverso apresentado pelo protótipo, ou seja, à medida que se elevou o nível de velocidade ocorreu uma redução na variável. A maior diferença entre as ferramentas sucedeu na máxima velocidade ($1,90 \text{ m s}^{-1}$), em torno de 91,74% a mais por parte da haste.

É importante salientar que, embora o fator velocidade também não tenha sido significativo para a variável profundidade, deve-se consideradas as zonas de atuação das ferramentas, isto é, a haste atuou nos maiores índices de resistência à penetração. Além disso, a desproporcionalidade do teor de água na área alcançou uma diferença de 168% entre a máxima e a mínima.

Quanto ao protótipo, obteve-se valores de tração específica semelhante aos de Bianchini et al. (1999) que avaliaram o comportamento operacional de um escarificador de haste parabólica em diferentes profundidades (0,35, 0,275, 0,225, 0,175 e 0,125 m) na velocidade de $1,60 \text{ m s}^{-1}$ em um Latossolo. Os valores encontrados pelos pesquisadores foi em torno de $21,56 \text{ kN m}^{-1}$ na profundidade de trabalho de 0,35m, no entanto, tais valores foram reduzindo à medida que a profundidade foi reduzida. Fernandes, Orlando & Camilo (2003) avaliaram o desempenho da haste de um subsolador na profundidade de 0,60 m e velocidade de deslocamento de $1,36 \text{ m s}^{-1}$, os autores encontraram valores em torno de $22,85 \text{ kN m}^{-1}$. Gabriel Filho et al. (2004) estudou o desempenho de um conjunto trator-escarificador

operando na profundidade de 0,30 m com diferentes tipos de cobertura vegetal. Os tipos de coberturas e a força de tração específica obtida pelos pesquisadores foram: aveia ($19,59 \text{ kN m}^{-1}$), ervilhaca ($18,91 \text{ kN m}^{-1}$), Nabo ($19,46 \text{ kN m}^{-1}$), nabo+aveia ($18,63 \text{ kN m}^{-1}$) e sem cobertura ($16,67 \text{ kN m}^{-1}$).

Fernandes et al. (2012) encontrou valores parecidos aos requeridos pela haste quando estudaram a demanda energética de um protótipo de subsolador em diferentes profundidades (0,15, 0,30, 0,45 e 0,60 m) e duas velocidades ($0,75$ e $1,36 \text{ m s}^{-1}$). O esforço de tração específico máximo encontrado pelos autores foi em torno de 35 kN m^{-1} na máxima velocidade e profundidade de 0,15 m. Santos (2010 b) em seu estudo analisou o comportamento da cultura de melancia em diferentes sistemas de preparo do solo, o estudo consistiu na análise do conjunto trator escarificador com diversas hastes (1, 2, 3, 4 e 5) na profundidade de 0,25 m. A autora constatou valores de tração específica de $63,4 \text{ kN m}^{-1}$ (1 haste), $34,56 \text{ kN m}^{-1}$ (2 hastes), $31,06 \text{ kN m}^{-1}$ (3 hastes), $22,10 \text{ kN m}^{-1}$ (4 hastes) e $20,58 \text{ kN m}^{-1}$ (5 hastes).

No entanto Compagnon (2012) quando avaliou o desempenho de um escarificador em duas profundidades e dois teores de água no solo (26,2 e 21,9%), encontrou valores bem menores, cerca de $12,42$ e $9,66 \text{ kN m}^{-1}$ na profundidade de 0,20 m e $11,57$ e $8,80 \text{ kN m}^{-1}$ em 0,30 m, respectivamente. Fiorese et al. (2019) também encontraram valores menores quando estudaram o desempenho de escarificador e subsolador nas profundidades de 0,30 e 0,40 m em duas velocidades de deslocamento ($1,25$ e $1,67 \text{ m s}^{-1}$), respectivamente. Os autores determinaram a força de tração específica para o escarificador de $12,71$ e $13,60 \text{ kN m}^{-1}$ na primeira velocidade e em torno de $18,75$ e $19,05 \text{ kN m}^{-1}$ na segunda velocidade. Coelho (2011) avaliou a demanda energética de conjuntos mecanizados em diferentes sistemas de preparo do solo (convencional, mínimo e plantio direto). Os valores máximos e mínimos de tração específica encontrados pelo autor com a utilização do escarificador a 0,30 m de profundidade, foram $18,0 \text{ kN m}^{-1}$ e $13,3 \text{ kN m}^{-1}$, respectivamente.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do protótipo mostrou-se no âmbito construtivo satisfatório, desempenhou a função para a qual foi projetada em diferentes velocidades, sem apresentar avarias. Validando-o com grande potencialidade de utilização, após otimização, e promissor método de descompactação.

A geometria do protótipo com um eixo central e o movimento giratório das hastes penetrando ao solo de acordo com a velocidade de deslocamento do trator, favoreceu a redução da demanda de força de tração e da potência na barra de tração. Entretanto, o consumo horário de combustível comportou-se de maneira instável. Deste modo, não se confirmando a hipótese I.

A penetração das hastes do protótipo não proporcionaram maiores níveis de profundidade e largura de sulco, o que retratou em uma menor área de solo mobilizada quando comparado à haste escarificadora. Assim sendo, não se confirmou a hipótese II

Apesar do protótipo mobilizar uma menor área de solo que a haste, este estabeleceu uma resistência específica operacional menor. Entretanto, as condições de operação o favoreceram a tal resultado. Haja vista, o nível de profundidade de operação foi menor, camadas com médias de menores índices de resistência à penetração e a gigantesca variabilidade do teor de água no solo. Posto isto, não se confirmando a hipótese III.

O protótipo apresentou menor média de força de tração específica, confirmando-se a hipótese IV. No entanto, é importante enfatizar que fatores externos influenciaram diretamente esta variável, como as hastes do protótipo que operaram em camadas mais superficiais e menos adensadas quando comparado à haste escarificadora, inclusive a heterogeneidade da área experimental no que diz respeito ao teor de umidade.

As variáveis resistência específica operacional e força de tração específica foram menores por parte do protótipo, confirmando-se a hipótese V. Entretanto, sofreram interferências de condições externas e às proporcionaram a esta redução, não estabelecendo claramente um desempenho melhor.

Após as operações o protótipo elevou em média menor área de solo quando comparado à haste escarificadora, evidenciando maior aptidão para manejos conservacionistas, sendo confirmada a hipótese VI.

6 REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M. & REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo Franco-arenoso sob plantio direto. **Ciência do Solo**. v.28, n.3, p.519-531, 2004.

ALONÇO, A. dos S. **Metodologia de projeto para a concepção de máquinas agrícolas seguras**. Tese (Doutorado). Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

ALONSO, D. J. C. **Influência da lastragem e pressão de inflação do pneu de um trator agrícola no seu desempenho operacional trabalhando em solo na capacidade de campo**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2016.

ALVES, R. de G. **Resistência a penetração de raízes, densidade relativa e produtividade em Latossolo Bruno submetido a sistemas de preparo na integração lavoura-pecuária**. Dissertação (Mestrado). Ciência do Solo. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Agricultural machinery management**. ASAE EP496.2 DEC99. in: ASAE standers 2000: standers engineering data. St. Joseph. 2000. p.343-349.

ANTUNES JUNIOR, E. de J.; REIS, E. F. dos.; ALVES, B. G. X.; OLIVEIRA, D. G. d. Influência da cobertura vegetal na área de contato e patinamentos de trator submetido a diferentes forças de tração. **Espacios**. v.38, n.19, p.1-8, 2017.

ARAÚJO, A. G. de. **Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Elétrica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T. & COSTA, A. C. S. Efeito da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho Distrófico após treze anos de semeadura direta. **Ciência do Solo**. v.28, n.3, p.495-504, 2004.

ARTUZO, F. D.; JANDREY, W. F.; CASARIN, F.; MACHADO, J. A. D. Tomada de decisão a partir da análise econômica de viabilidade: estudo de caso no dimensionamento de máquinas agrícolas. **Custos e Agronegócios Online**. v.11, n.3, p.183-205, nov. 2015.

ASSIS, R. L. de.; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação de resistência do solo à penetração em diferentes solos com variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**. v.29, n.4, p.558-568, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457/2016 – Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

AUDEH, S. J. S.; LIMA, A. C. R.; CARDOSO, I. M.; CASALINHO, H. D.; JUCKSCH, I. J. Qualidade do solo: uma revisão etnopedológica em propriedades agrícolas familiares produtores de fumo orgânico. **Revista Brasileira de Agroecologia**, [S.I.]. v.6, n. 3, p. 34-48, 2011.

BAESSO, M. M.; MENEZES, T. A. V.; MODOLO, A. J.; ROSA, R. G.; ZUIN, L. F. S.; Comparação entre três penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração em um latossolo vermelho eutroférico. **BIOENG.** v.14, n.2, p.101-110, 2020.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas.** CD-ROM. Piracicaba, 2004. 322p.

BARRETO, C. de A. **Agricultura e meio ambiente: percepções e práticas de sojicultores em Rio Verde – GO.** Dissertação (Mestrado). Ciência Ambiental. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

BARROS, L. R. **Escarificação e gessagem na descompactação do solo sob sistema de plantio direto.** Dissertação (Mestrado). Agronomia. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2017.

BARROS, T. D. & JARDINE, J. G. **Nabo-forrageiro.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Brasília. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Documento online. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vn002wx5eo0sawqe38tspejq.html>>. Acesso: julho de 2020.

BARUFFI, S. S. **Análise histórica do custo de produção da Soja: O fator semente na construção do resultado.** Dissertação (Mestrado). Ciência e Tecnologia de Sementes, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2015.

BECKER, R. S.; ALONÇO, A. dos S.; FRANCETTO, T. R.; CARPES, D. P.; POSSEBOM, G. Resistência específica operacional de discos para corte de resíduos culturais em semeadura direta. **Energia na Agricultura.** v.34, n.1, p.10-17, mar. 2019.

BELLÉ, M. P.; ALONÇO, A. dos S.; FRANCETTO, T. R.; ROSSATO, F. P.; FRANCK, C. J.; CARPES, D. P. Demanda energética e mobilização do solo com o uso de escarificadores em sistemas de semeadura direta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande, v.18, n.5, p.551-558, 2014.

BELLÉ, M. P. **Desempenho de elementos descompactadores para escarificação em sistema de semeadura direta.** Dissertação (Mestrado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A. de.; SOUZA, F. R. de. Compactação em um latossolo vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Rev. Bras. Ciência do Solo.** v.34, n.3, jun. 2010.

BEULTER, A. N. & CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** v.39, n.6, p.581-588, jun. 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. da C.; SILVA, A. P. da.; Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 30 n. 5, p. 787-794, 2006.

BIANCHINI, A.; SABINO, M. H. C.; BORGES, P. H. M.; SGUAREZZI, J. J. Comportamento operacional de um escarificador de hastes parabólicas em solo de cerrado. **Agriambi**. v.3, n.3, p.395-401, 1999.

BORTOLOTTO, V. C.; PINHEIRO NETO, R.; BORTOLOTTO, M. C. Demanda energética de uma semeadora-adubadora para soja sob diferentes velocidades de deslocamento e cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**. v.26, n.1, p.122-130, 2006.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Início da colheita de milho confirma recorde de 250,5 milhões de t na produção total de grãos**. Documento online. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3446-inicio-da-colheita-de-milho-confirma-recorde-de-250-5-milhoes-de-t-na-producao-total-de-graos>>. Acesso: junho de 2020.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Produção de grãos tem previsão de aumento de 5,7%, chegando a 271,7 milhões de toneladas**. Documento online. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3989-producao-de-graos-tem-previsao-de-aumento-de-5-7-chegando-a-271-7-milhoes-de-toneladas>>. Acesso: junho de 2021.

BRASIL, IBGE. **Censo Agro**, 2017. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/estabelecimentos.html>. Acesso: abril de 2020.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Proporção de biodiesel ao diesel. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/mistura-de-biodiesel-ao-diesel-passa-a-ser-de-13-a-partir-de-hoje-1-3>

BUAINAIN, A. M.; ALVES, E.; SILVEIRA, J. M. da; NAVARRO, Z. **O mundo rural no Brasil do século 21: a formação de um novo padrão agrário e agrícola**. Brasília, DF: Embrapa, 1182p, 2014.

CAMARA, R. K. & KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Ciência do Solo**. v.29, n.5, p.789-796, 2005.

CARVALHO FILHO, A.; CENTURION, J. F.; SILVA, R. P. da.; FURLANI, C. E. A.; CARVALHO, L. C. C. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. **Engenharia Agrícola**. v.27, n.1, p.229-237, 2007.

COELHO, H. **Demanda energética de conjuntos mecanizados em diferentes sistemas de manejo do solo para a cultura do milho**. Tese (Doutorado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2011.

COLLARES, G. L.; REINERT, J. D.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Ciência do Solo**. v.32, n.3, p.933-942, 2008.

COMPAGNON, A. M. **Desempenho de trator agrícola em duas profundidades de escarificação e dois teores de água no solo**. Dissertação (Mestrado). Agronomia. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. Jaboticabal, 2012.

COMPAGNON, A. M.; FURLANI, C. E. A.; OSHIRO, K. A.; SILVA, R. P. da.; CASSIA, M. T. Desempenho de um conjunto trator-escarificador em dois teores de água do solo e duas profundidades de trabalho. **Engenharia na Agricultura**. v.21, n.1. p.52-58. 2013.

COMPAGNONI, L. **Descompactação do solo e adubação adicional na produtividade de sementes de soja**. Dissertação (Mestrado). Ciência e Tecnologia de Sementes. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2013.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Boletim da safra agrícola. Documento online. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/gaos/boletim-da-safra-de-gaos>>. Acesso: março de 2020.

CONTE, O. LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; MAZURANA, M.; DEBIASI, H. Resistência mecânica do solo e força de tração em hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras em sistema de integração lavoura-pecuária. **Engenharia Agrícola**. v.28, n.4, p.730-739, 2008.

CRUZ, J. C.; ALVARENGA, R. C.; VIANA, J. H. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. de; SANTANA, D. P.. **Sistema de Plantio Direto de Milho**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Brasília. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Documento online. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_72_59200523355.html>. Acesso: maio de 2020.

CUBILLA, M.; REINERT, D. J.; AITA, C.; REICHERT, J. M.; Plantas de cobertura do solo: uma alternative para aliviar a compactação em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**. v.71, n.3, p.29-32, 2002.

CUNHA, J. P. A. R. da; CASCÃO, V. N.; REIS, E. F. dos; oil compaction induced by tractor traffic in different soil managements. **Acta Sci. Agron**. v.31, n.3, p. 371-375, 2009.

CURI, N.; LARACH, J.O.I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A.C. & FONTES, L. E. F. **Vocabulário da ciência do solo**. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p

DÍAZ, M. C.; SUÁREZ, M. H.; PITA, M. Á. F.; PEDRAZA, L. G. Diseño de um nuevo apero para la labranza conservacionista de los suelos cañeros. **Ingeniería Agrícola**. v.8, n.1, p.47-53, 2018.

DOMINGUEZ, N. Y. C. **Evaluación del uso del rodillo aireador para la rehabilitacion de tierras de pastoreo y el contenido de carbono em zonas semiáridas del noroeste de México**. Tese (Mestrado). Ciências em Sistemas Ambientais. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, 2008.

DRESCHER, M. S.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E.; GUBIANI, P. I.; FAGNELLO, A.; DRESCHER, G. L. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas em Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesq. Agropec. Bras.** v.51, n.2, p.159-168, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, 2017. 577p.

ERENO, L. H. Z. **Estudo comparativo entre a utilização real e a determinação pelo planejamento da mecanização agrícola em empresas rurais de soja e arroz**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2008.

FELDENS, L. **O homem, a agricultura e a história**. Editora Univates, 1ª ed. Lajeado, 2018.

FERNANDES, H. C.; SILVEIRA, J. C. M. da.; RINALDI, P. C. N. Avaliação do custo energético de diferentes operações agrícolas mecanizadas. **Ciência e Agrotecnologia**. v.32, n.5, p.1582-1587, out. 2008.

FERNANDES, J. C. & GAMERO, C. A. Avaliação do desempenho das máquinas agrícolas na implantação da cultura do girassol. **Energia na Agricultura**. v.25, n.2, p.74-87, 2010.

FERNANDES, H. C.; ORLANDO, R. C.; LEITE, D. M.; COSTA, M. M.; FURTADO JÚNIOR, M. R. Demanda energética de um subsolador adaptado para deposição de material poroso em drenos livres. **Engenharia na Agricultura**. v.20, n.3. p.219-226, 2012.

FERRREIRA, M. C. D. **Compactação do solo por tráfego de máquinas de colheita em um plantio florestal de Eucalyptus Saligna**. Dissertação (Mestrado). Agronomia. Escola Superior de Agricultura de Precisão Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

FESSEL, V. A. G. **Qualidade, desempenho operacional de plantios, manual e mecanizado, de Eucalyptus grandis, implantados como cultivo mínimo do solo**. Dissertação (Mestrado). Ciências em Recursos Florestais. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2003.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num latossolo roxo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v.24, n.3, p. 487-493. 2000.

FIGIORESE, D. A.; SANDI, J.; MARASCA, I.; MORELLI-FERREIRA, F.; SPADIM, E. R. LANÇAS, K.; Torque nos rodados motrizes de um trator agrícola submetido a ensaios de tração. **Agriambi**. v.19, n.9, p.903-909, 2015.

FIGIORESE, D. A.; MACHADO, T. M.; ZANDONADI, R. S.; ARAÚJO, R. F. A.; RICARDO, G. F. da S.; SCHIMITT, J. da S. Desempenho de um trator agrícola em operações de preparo do solo no estado de Mato Grosso. **Nativa**. v.7, n.3, p.288-295, 2019.

FRANCETTO, T. R. **Comportamento operacional de elementos sulcadores de fertilizantes em função da distancia dos mesmos para o mecanismo de corte**. Tese (Doutorado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2017.

FRANCETTO, T. R.; ALONÇO, A. dos S.; CARPES, D. P.; MACHADO, O. D. da C. BECKER, R. S. BRANDELEIRO, C. Specific demands to traction of cutting discs and furrow openers for tche no-tillage system. **Australian Journal of Crop Science (Online)**. v.10, n.7, p.1040-1046. Jul. 2016.

FRANCZISKOWSKI, M. A. **Efeito da escarificação mecânica e biológica nas propriedades físicas de um Latossolo e produtividade da soja em sucessão**. Dissertação (Mestrado). Agronomia. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Marechal Cândido Rondon, 2018.

FRANÇA NETO, J. de B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A.; Pádua, G. P. de.; LORINI, I.; HENNING, F. A. **Tecnologia da produção de sementes de soja de alta qualidade**. Londrina, Embrapa Soja, 2016.

FREDDI, O. da S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura de milho. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v.31, n.4, p. 627-636. 2007.

FURINI, L. A. **Desempenho operacional de hastes e ponteiras na descompactação de solo**. Dissertação (Mestrado). Projetos e Processos de Fabricação. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2018.

GABRIEL FILHO, A.; SILVA, S. de L.; MODOLO, A. J.; SILVEIRA, J. C. M. da; Desempenho de um trator operando em solo com diferentes tipos de cobertura vegetal. **Engenharia Agrícola**. v.24, n.3, p.781-789, dez. 2004.

GABRIEL FILHO, A.; PESSOA, A. C. dos S.; STROHHAECKER, L. HELMICH, J. J. Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. **Ciência Rural**. v.30, n.6, p.953-957, mar. 2000.

GAMERO, A. C. **Desempenho operacional de um subsolador de hastes com curvatura lateral (“Pasaplow”), em função de diferentes velocidades de deslocamento e profundidades de trabalho**. Dissertação (Mestrado). Agronomia. Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp. Botucatu, 2008.

GASSEN, J. R. F.; ALONÇO, A. dos S. BAUMHARDT, U. B.; BELLÉ, M. P.; BONOTTO, G. J. Resistência específica à tração na operação de escarificação do solo em camadas de forma simultânea. **Rev. Bras. de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 18, n.1, p.116-124, set. 2014.

GASSEN, J. R. F. **Avaliação de ferramenta para escarificação do solo em camadas de forma simultânea**. Tese (Doutorado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2011.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J. & REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v.28, n.3, p.477-484, jun. 2004.

GILLES, L.; COGO, N. P.; BIASSANI, C. A.; BAGATINI, T. PORTELA, J. C. Perdas de água, solo, matéria orgânica e nutriente por erosão hídrica na cultura do milho implantada em área de campo nativo, influenciadas por métodos de preparo do solo e tipos de adubação. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v.33, n.5, p.1427-1440, out. 2009.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. de G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v.38, n.4, p.1234-1244. 2014.

GONZALES-de-SOTO, M.; EMMI, L.; GARCIA, I.; GONZALES-de-SANTOS, P. Reducing fuel consumption in weed and pest control using robotic tractors. **Elsevier**. v.114, p.96-113, 2015.

GRANJA, G. P. **Demanda energética de diferentes conjuntos mecanizados para implantação de modelos de recuperação de áreas degradadas**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Vale do São Francisco. Juazeiro, 2018.

GUBIANE, P. I. & REINERT, D. J. Desafios para recomendar descompactação do solo. **Plantio Direto**. v.1, p.15-23, 2019.

HOLTZ, R. D. & KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733p.

IKEDA, Implementos LTDA. **Aeromix – AMX/AMX ADB**. Manual operacional. 1ª edição. Setembro, 2009.

KAMIYANA, A. **Agricultura sustentável**. São Paulo: SMA, 2011.

KEES, G. **Using subsoiling to reduce soil compaction**. United States Department of Agriculture. USDA Forest Service Technology and Development Program Missoula, MT 5E52F74 Soil Tilt Restorer. 2008.

KICHLER, C. M.; FULTON, J. P.; RAPER, R. L.; ZECH, W. C.; McDONALD, T. P.; BRODBECK, C. J. Spatially monitoring tractor performance to evaluate energy requirements of variable depth tillage and implement selection. **ASABE**. ASABE Annual International Meeting. Minneapolis, Paper number: 071028. 2007.

KLEIN, V. A. & BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em área sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**. v.25, n.3, p.395-398, 1995.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.26, n. 4, p. 857-867, 2002.

KLEIN C.; KLEIN, V. A. Influência do manejo do solo na infiltração. **REMOA**, Santa Maria. v.13, n.5, dez. 2014.

KOCHHANN, R. A. DENARDIN, J. E. BERTON, A. L. **Compactação e descompactação de solos**. Embrapa Trigo. Passo Fundo, 2000. 20p.

KUNZ, M.; GONÇALVES, A. D. M. de A.; REICHERT, J. M.; GUIMARÃES, R. M. L.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F. Compactação do solo na integração Soja-pecuária de leite em latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.37, n.6, p.1609-1708, 2013.

LANÇAS, K. P. **Subsolador: desempenho em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e número de hastes**. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 1988.

LANZANOVA, M. E. **Atributos físicos do solo em sistemas de culturas sob plantio direto na integração lavoura-pecuária**. Dissertação (Mestrado). Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2005.

LASKOSKI, M.; PEREIRA, T. E.; KMIĘCIK, L. L.; BUENO, L. de S. R.; JASPER, S. P. Desenvolvimento, construção e validação do perfilômetro a laser. **REVENG.** v.25, n.02, p.132-138, 2017.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada.** 2004. 70f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O. da; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.36, n.1, p.33-44. jan. 2012.

LOPES, A.; LANÇAS, K. P.; FURLANI, C. E. A.; NAGAOKA, A. K.; CASTRO NETO, P.; GROTTA, D. C. C. Consumo de combustível de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem, e da velocidade de trabalho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v.7, n.2, p.382-386, 2003.

LOPES, J. E. L. **Desempenho operacional e energético de um trator 4x2 TDA no preparo do solo em ambiente semiárido em função da carga dinâmica, pneus e superfície de rolamento.** Tese (Doutorado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.

LOPES, J. E. L.; CHIODEROLI, C. A.; MONTEIRO, L. de A.; SANTOS, M. A. M. dos.; VAN CLEEF, E. H. C. B.; NASCIMENTO, E. M. S. Operational and energy performance of the tractor-scarifier assembly: tires, ballasting and soil cover. **Agriambi.** v.23, n.10, p.800-804, 2019.

MACEDO, D. X. S.; MONTEIRO, L. A. & SANTOS, V. C. **Compactação, escarificador e subsolador.** Novas Edições Acadêmicas. 57p. Ceará, 2016.

MACHADO, A. L. T. & CHANG, C. Influência da geometria no desempenho de ponteiros aladas de escarificadores. **Ver. Bras. de Agrociência.** v.2, n.1, p.11-16, 1996.

MACHADO, R. L. T.; MACHADO, A. L. T.; TURATTI, A. L.; REIS, A. V. dos.; ALONÇO, A. dos S. Avaliação do desempenho de escarificador em planossolo. **Revista Brasileira de Agrociência.** v.2, n.3, p.151-154, 1996.

MACHADO, T. M.; LANÇAS, K. P.; FIORESE, D. A.; FERNANDES, B. B.; TESTA, J. V. P. Estimativa de gasto energético da operação de subsolagem em profundidades variáveis. **Agriambi.** Campina Grande, v.19, n.11, p.1121-1125, 2015.

MAGALHÃES, M. P. Território cultural e a transformação da floresta em artefato social. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goledi. Ciências Humanas.** v.8, n.2, p.381-400, ago. 2013.

MAHER, L. A.; RICHTER, T.; JANES, M. STOCK, J. T. The Epipalaeolithic faragers in Azraq project: prehistoric landscape change in the Azraq basin, eastern Jordan. **CBRL Bulletin.** Council for British Research in the Levant. v.6, 2011.

MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M. da; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos; SÁ, M. A. C. de; VILELA, L.; BECQUER, T.; Soil physical quality under crop–livestock management systems in a Cerrado Oxisol. **Pesq. Agropec. Bras.** v.42, n.6, p.873-882, jun. 2007.

MARCHÃO, R.L.; VILELA, L.; PALUDO, A.L.; GUIMARÃES JUNIOR, R. **Impacto do pisoteio animal na compactação do solo sob integração lavoura-pecuária no Oeste Baiano.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009. 6p. (Embrapa Cerrados. Comunicado técnico, 163).

MARCHETTI, I. **Sistema automatizado para avaliação do consumo de biodiesel em tratores agrícolas.** Dissertação (Mestrado). Engenharia Agrícola. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2006.

MASIERO, F. C.; LANÇAS, K. P. & MONTEIRO, L. de A. Determinação do rendimento na barra de tração de tratores agrícolas com tração dianteira auxiliar (4x2 TODA). **Energia na Agricultura.** v.26, n.4, p.55-73, 2011.

MAZOYER, M. & ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea;** [tradução de Cláudia F. Falluh Balduino Ferreira]. – São Paulo: Editora. UNESP. Brasília, 2010.

MAZURANA, M.; FINK, J. R.; SILVEIRA, V. H. da.; LEVIEN, R.; ZULPO, L.; BREZOLIN, D. Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um argissolo vermelho sob tráfego controlado de máquinas. **Rev. Bras. Ciência do Solo.** v.37, n.5, p.1185-1195, out. 2013.

MEDINA-GUILLÉN, R.; SILVA, I. C.; CASTILLÓN, E. E.; RODRIGUEZ, H. G.; VILLALOBOS, J. A. D. Estructura y diversidad del matorral desértico rosetófilo rehabilitado con rodillo aireador, Coahuila, México. **Polibotánica.** v.7, n.44, p.95-107, 2017.

MELO V. de F. & LIMA, V. C. **O Solo no Meio Ambiente: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio.** 1ª ed. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Solos e Engenharia Agrícola. 130p. Curitiba, 2007.

MENDONÇA, L. A. R.; VÁSQUEZ, M. A. N.; FEITOSA, J. V.; OLIVEIRA, J. F. de.; FRANCA, R. M. da.; VÁSQUES, E. M. F.; FRISCHKORN, HORST. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.14, n.1, p.89-98, 2009.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. dos S.; CARBONERA, L.; Estudos com penetrometria: novos equipamentos e amostragem correta. **Agriambi**. v.16, n.5, p.584-590, 2012.

MONTANHA, G. K.; GUERRA, S. P. S.; ANDRADA-DE-SANCHEZ, P.; CAMPOS, F. H.; LANÇAS, K. P. Consumo de combustível de um trator agrícola no preparo do solo para a cultura do algodão irrigado em função da pressão de inflação dos pneus. **Revista Energia na Agricultura**. v.26, n.1, p.39-51, 2011.

MONTANHA, G. K. **Avaliação de um escarificador em função dos tipos de hastes e profundidades de trabalho**. Tese (Doutorado). Agronomia. Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP. Botucatu, 2013.

MORETTI, G. & ZUMBACH, L. **Boas práticas agrícolas e certificação socioambiental: a caminho da sustentabilidade**. 2ª ed. The Nature Conservancy (TNC). Bahia, 2012.

NISOLOSO, R. da S.; AMADO, T. J. C.; SHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de Soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.32, n.4, p.1723-1734, 2008.

NUNES, M. R. **Mitigação da compactação do solo em plantio direto**. Dissertação (Mestrado). Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2014.

OCDE - *Organisation de coopération et de développement économiques*. **CODE 2: Standard code for the official testing of agricultural and forestry tractor performance**. 2021. 107p.

ORMOND, A. T. S. **Sistema de semeadura em manejo do solo no desenvolvimento da cultura da soja**. Dissertação. (Mestrado). Engenharia Agrícola. Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas. Universidade federal de Mato Grosso. Rondonópolis, 2013.

PAIVA, A. S. **Disponibilidade hídrica na germinação de sementes e no crescimento de plântulas da leguminosa forrageira *Macrotylomaaxillare* (E. Mey) Verdc. Cv. Java**. 2007. 99 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, 2007.

PALMA, M. A. Z. **Desenvolvimento e avaliação de ponteiras utilizadas em hastes sulcadoras de semeadoras para plantio direto**. Tese (Doutorado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2013.

PORTELLA, J. A. **Um estudo preliminar das forças atuantes em elementos rompedores de semeadeiras diretas comerciais**. Tese (Mestrado). Mestre em Ciências. Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1983.

RACHWAL, M. F. G. Os seis elementos: água, ar, solo, flora, fauna, ser humano. Colombo: Embrapa Florestas. p.207-262. 2003.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. & BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**. v.27, p.29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. & REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v.5, p.49-134, 2007.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; AZEVEDO, A. C. de.; PEDRON, F. de A. **Principais solos da depressão central e companhia do Rio Grande do Sul: guia de excursão**. 2ª ed. Santa Maria: Departamento de Solos – UFSM, 2007.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v.32, n.5, p.1805-1816, out. 2008.

RIBEIRO, A. Í. **Mecanização no preparo de solo em áreas degradadas por mineração na floresta nacional do Jamari (Rondônia-BR)**. Tese (Doutorado). Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de F.; SAMPAIO, F. de M. T. Propriedades físicas dos solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**. v.31, n.4, p.1167-1175, 2007.

RICHART, A.; TAVARES, J.; BRITO, O. R.; LANILLO, R. F.; FERREIRA, R.; Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**. Londrina, v.26, n.3, p. 321-343, 2005.

RIQUETTI, N. B. **Efeito do manejo de solo nos parâmetros agronômicos e energéticos de híbridos de milho transgênico e não transgênico**. Dissertação (Mestrado). Agronomia. Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2011

RODRIGUES, H. E.; ALONÇO, A. dos S.; MENDONÇA, M. T.; POSSOBOM, G.; KNIERIM, L. F.; BOCK, R.; LOPES, T. G.; BECKER, R. S.; JAQUES, L. B. A.; DIAS, V. de O.; FERREIRA, A. M. **Estudo do efeito da compactação do solo relacionado à lastragem líquida e pressão de insuflação, evidenciando a necessidade do controle de tráfego agrícola**. Editora CESPOL, 5ª ed. Não-Me-Toque, 2020.

RODRIGUEZ, Y. M. T.; FERNANDES, H. C.; OLMOS, C. P.; CARNEIRO, J. E. de S. Operational performance of bean seeder-tractor set in tillage systems and speed steps. **Revista Ciências Técnicas Agropecuarias**. Universidad Agraria de La Habana, Cuba. v.27, n.3, 2018.

ROQUE, A. A. de O.; SOUZA, Z. M. de.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. de. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.45, n.7, p.744-750, jun. 2010.

ROSA, D. P. da.; MENTGES, M. I.; VIEIRA, D. A.; VOGELMANN, E. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. **Demanda de esforços requeridos por escarificador em Argissolo Arenoso sob Semeadura Direta Compactado**. In: Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais. Rio de Janeiro, 2008. 195p.

ROSA, D. P.; REICHERT, J. M.; MENTGES, M. I.; BARROS, C. A. P.; REINERT, D. J.; VIEIRA, D. A. Cultivo mínimo: Efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador. **Agriambi**. v.15, n.11, p.1199-1205, 2011.

SÁ, M. A. C. & SANTOS JUNIOR, J. D. G. **Compactação do solo**: consequências para o crescimento vegetal. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005, 26p. Embrapa Cerrados. (Documentos, 136).

SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. **Sistema plantio direto**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa-SPI; Embrapa-CPAO. 248p. 1998.

SALVADOR, N.; BENEZ, S.H.; MION, R. L.; VILIOTTI, C. A. Demanda energética em diferentes sistemas de preparo periódico do solo antes e depois da subsolagem. **Ciência Agronômica**. v.36, n.3, p.378-383. Fortaleza, 2008.

SALVADOR, N.; MION, R. L.; BENEZ, S. H.; VILIOTTI, C. A. Estudo da demanda energética e desagregação do solo em diferentes sequências operacionais de preparo periódico. **Ciência Agronômica**. v.41, n.2, p.231-236, jan. 2010.

SAMBUICHI, R. H. R.; OLIVEIRA, M. A. C. de; SILVA, A. P. da; LUEDEMANN, G. Texto para discussão. **A sustentabilidade ambiental agropecuária brasileira**: impactos, políticas públicas e desafios. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Rio de Janeiro, 2012.

SANCHEZ, E. **Propriedades físicas do solo e produtividade de soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno**. Dissertação (Mestrado). Agronomia. Universidade Estadual do Centro-Oeste. Guarapuava, 2012.

SANEZ, F. J. R.; CANTÚ, J. M. P.; ARMENTA, M. de la P. M.; BARRERAS, G. L. Uso del rodillo aireador en la restauración de pastizales en agua prieta, sonora. **Biotecnia**. v.19, n.3, p.23-28, 2017.

SANTIAGO, A. D. & ROSSETO, R. **Preparo convencional**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Brasília. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Documento online. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_84_22122006154841.html>. Acesso: abril de 2020.

SANTOS FILHO, L. G. dos. **Desempenho energético de um trator 4x2 TODA em operação de escarificação, em função da velocidade e dos desgastes dos pneus**. Dissertação (Mestrado). Engenharia agrícola. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019.

SANTOS, A. J. M.; BÔAS, R. L. V.; BACKES, C. GODOY, L. J. G. de.; BARDIVIESSO, D. M. Mobilização do solo, velocidade de infiltração de água e taxa de cobertura do solo na grama esmeralda, sob manejos mecanizados. **Energia na Agricultura**. v.29, n.3, p.197-204, 2014.

SANTOS, A. J. M.; BÔAS, R. L. V.; MORAES, M. H.; GAMERO, C. A.; OLIVEIRA, M. R. de. **Equipamentos para descompactação superficial do solo: estudo de casos**. Tópicos atuais em gramados II. Botucatu: FEPAF, 2010. 205p.

SANTOS, G. G. **Impacto de sistemas de integração lavoura-pecuária na qualidade física do solo**. 2010. 50 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) - Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2010.

SANTOS, M. da S. **Parâmetros mecânicos de tração em sistemas de cultivo em melancia**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2010.

SANTOS, P. R. A. dos.; MENDONÇA, C. de A.; SANTOS, M. A. M. dos.; NICOLAU, F. E. de A.; AMORIN, M. Q.; REIS, M. A. M. dos.; CHIODEROLI, C. A.; LOUREIRO, D. R. Operating and energetic performance of the assembly tractor-scarifier in diferente liquid ballasting and working depths. **Academic Journals**. v.11, n.1, p.4195-4205, 2016.

SANTOS, M. da S.; ALONÇO, A. dos S. & BAUMHARDT, U. B. Principais fatores que influenciam o desempenho de escarificadores e subsoladores. Uma revisão de literatura. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**. v.5, n.1, p.13-19. 2011.

SANTOS, P. M. dos. **Modelagem do desempenho em tração de conjuntos mecanizados visando ao dimensionamento do trator**. Tese (Doutorado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2010.

SASAKI, C. M.; GONÇALVES, J. L. de M. & BENTIVENHA, S. R. P. Desempenho operacional de hastes subsoladoras em função da ponteira e do tipo do solo. **Scientia Forestalis**. n.67, p.44-52, 2005.

SECCO, D.; REINEERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**. v.39, n.1, p.58-64, fev. 2009.

SEIXAS, F. & OLIVEIRA JUNIOR, E. D. de; Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. **Scientia Forestalis**. n.60, p.73-87, dez. 2001.

SEKI, A. S. **Demanda energética e produtividade da soja e do milho em áreas de plantio direto e cultivo mínimo**. Tese (Doutorado). Agronomia. Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP. Botucatu, 2010.

SEKI, A. S.; SEKI, F. G.; JASPER, S. P.; SILVA, P. R. A.; BENEZ, S. H. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Ciências Agrônômicas**. Fortaleza, v.46, n.3, p.460-468, set. 2015.

SEVERIANO, E. da C.; OLIVEIRA, G. de.; DIAS JUNIOR, M. de S.; CASTRO, M. B. de.; OLIVEIRA, L. F. C. de.; COSTA, K. A. de P. Compactação de solos cultivados com Cana-de-Açúcar: I – modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.30, n.3, p.404-413, jun. 2010.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. Tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Ciência do Solo**. v.27, n.6, p.973-983. 2003.

SILVA, V. R. da; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo á penetração em plantio direto. **Ciência do Solo**. v.34, n.2. p.399-406, abr. 2004.

SILVA, P. M. de O. **Modelagem de escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG**. 2006. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2006.

SILVA, L. L. Fitting infiltration equations to centre-pivot irrigation data in a Mediterranean soil. **Agricultural Water Management**. v.94, p.83-92, dez. 2007.

SILVA, R. C da. **Máquinas e equipamentos agrícolas**. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2014.

SILVA, N. M. L. da. **Compactação em argissolo submetido ao tráfego agrícola no cultivo de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2015.

SILVA, R. P. D.; FURLANI, C. E. A.; TAVARES, T. O.; VOLTARELLI, M. A. **Compactação do solo, escarificação e subsolagem**. Material didático do curso de Zootecnia – UNESP Jaboticabal. Jaboticabal, 10p. 2015.

SILVA, J. G. da. **Preparo do solo e do plantio**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Brasília. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Documento online. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fq6x51xh02wyiv80bhgp5ps6ra6re.html#>>. Acesso: abril de 2020.

SILVA, V. F. A. **Mobilização do solo e desempenho operacional de semeadora-adubadora com dois tipos de hastes sulcadoras em plantio direto de milho**. Dissertação (Mestrado). Agronomia. Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, 2013.

SILVEIRA JUNIOR, S. D. da.; SILVA, A. P. da.; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; Qualidade física de um Latossolo vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Ciência do Solo**. v.36, n.6, p.1854-1867, 2012.

SILVEIRA, J. C. M. da.; FERNANDES, H. C.; MODOLO, A. J.; SILVA, S. de L.; TROGELLO, E. Demanda energética de uma semeadora-adubadora em diferentes velocidades de deslocamento e rotação do motor. **Ciência Agrônômica**. v.44, n.1, p.44-52, 2013.

SILVEIRA, W. M. **Eficiência energética de um trator agrícola 4x2 TODA em pista de concreto em função do desgaste dos pneus e da velocidade de deslocamento**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.

SILVEIRA, J. C. M. da. **Desempenho operacional de um conjunto trator-semeadora em função da velocidade e rotação no eixo motor**. Tese (Doutorado). Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2008.

SOUSA, A.R.; SILVA, A.B.; RESENDE, M. **Influência da pressão exercida por pisoteio de animais na compactação do solo do vale do Pajeú, em Pernambuco**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 12, 1998, Fortaleza, Anais. Fortaleza: SBSC, p:327, 1998.

SOUZA, W. R. de. **Subsolador: influência de parâmetros geométricos na distribuição das forças**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1989.

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

STONE, L. F. & SILVEIRA, P. M. da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesq. Agropec. Bras.** v.34, n.1, p.83-91, jan. 1999.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M., MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.** v.6, n.2, p.207-2012, jun. 2002.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M. & PARKER JUNIOR, J. J. Soil Strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science.** v.102, n.1, p.18-22, jul. 1966.

TEIXEIRA, J. C. Modernização da agricultura no Brasil: Impactos econômicos, sociais e ambientais. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros Seção Três Lagoas.** v.1, n.2, p.21-42, 2005.

TRENTIN, R. G. **Desempenho de sulcadores no desenvolvimento e produtividade da soja em solo submetido a diferentes níveis de compactação.** Tese (Doutorado). Agronomia. Universidade Tecnológica do Paraná. Pato Branco, 2015.

VALICHESKI, R. R.; GROSSKLAUS, F.; STÜMER, S. L. K.; TRAMONTIN, A. L.; BAADE, E. A. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Agriambi.** V.16, n.9, p.969-977, jun. 2012.

VAZ, C. M. P.; PRIMAVESI, O.; PATRIZZI, V. C.; IOSSI, M. de F. Influência da umidade na resistência do solo medida com penetrômetro de impacto. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Comunicado Técnico.** São Carlos, São Paulo, 2002.

VIAN, C. E. F. **Perspectiva de Investimento em Mecânica:** máquinas e implementos agrícolas. Projeto Perspectivas do investimento no Brasil. Instituto de Economia da UFRJ e Instituto de Economia da UNICAMP. Campinas, 2009.

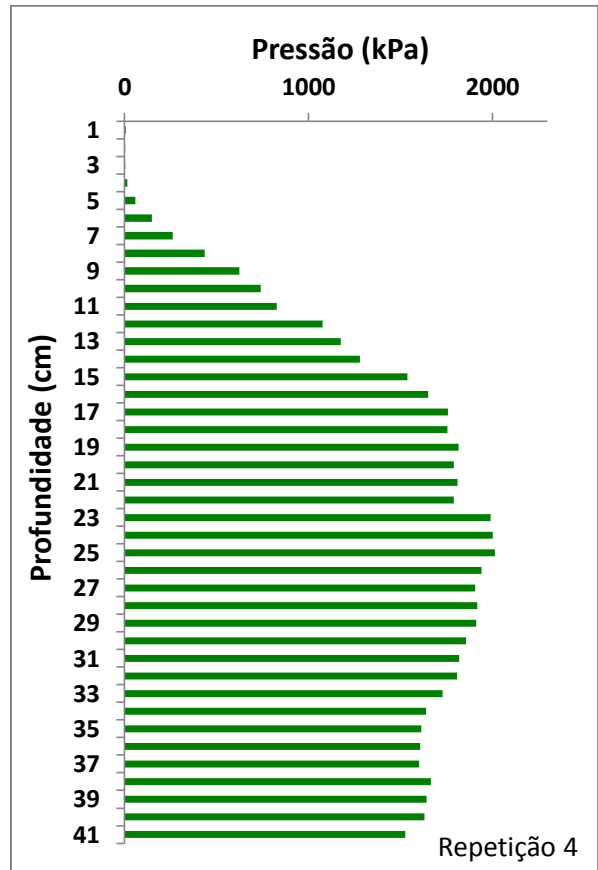
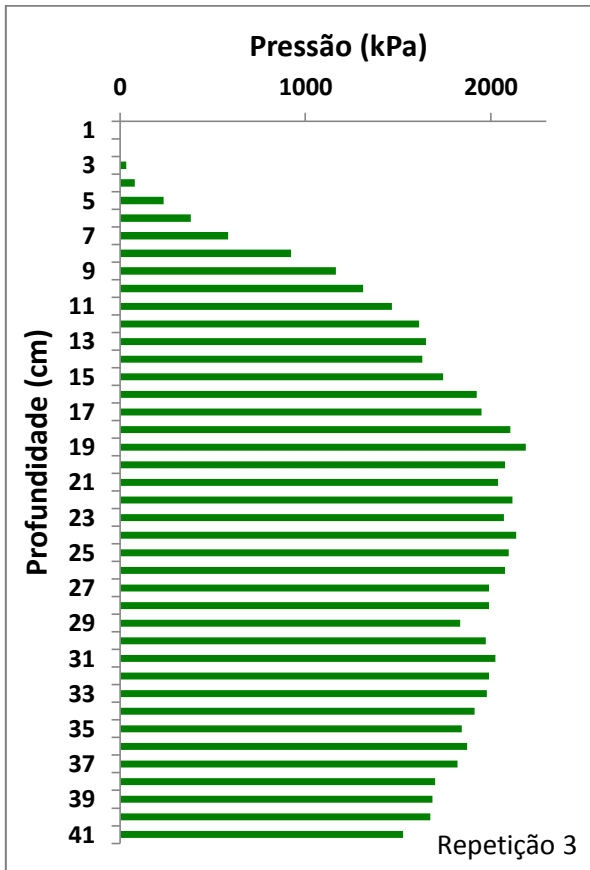
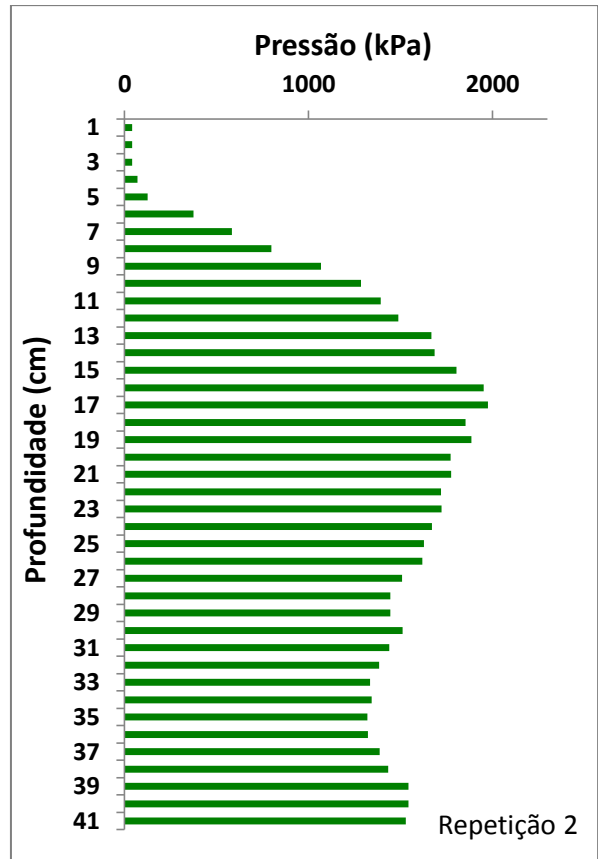
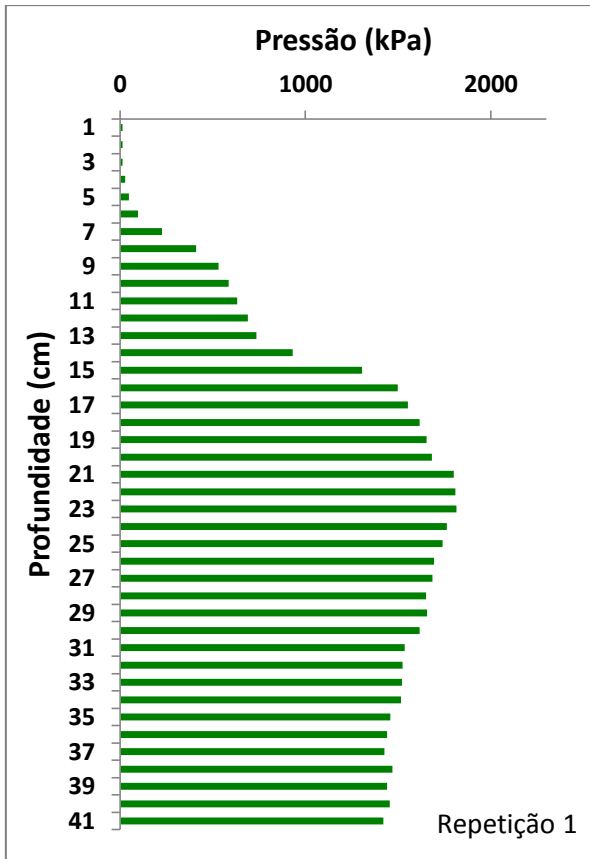
VIANA, J. H. M. Determinação da densidade de solos e de horizontes cascalhentos. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Comunicado Técnico.** Sete Lagoas, Minas Gerais, 2008.

VZZOTTO, V. R.; MARCHEZAN, E.; SEGABINAZZI, T.; Efeito do pisoteio bovino em algumas propriedades físicas do solo de várzea. **Ciência Rural.** v.30, n.6, p.965-969, dez. 2000.

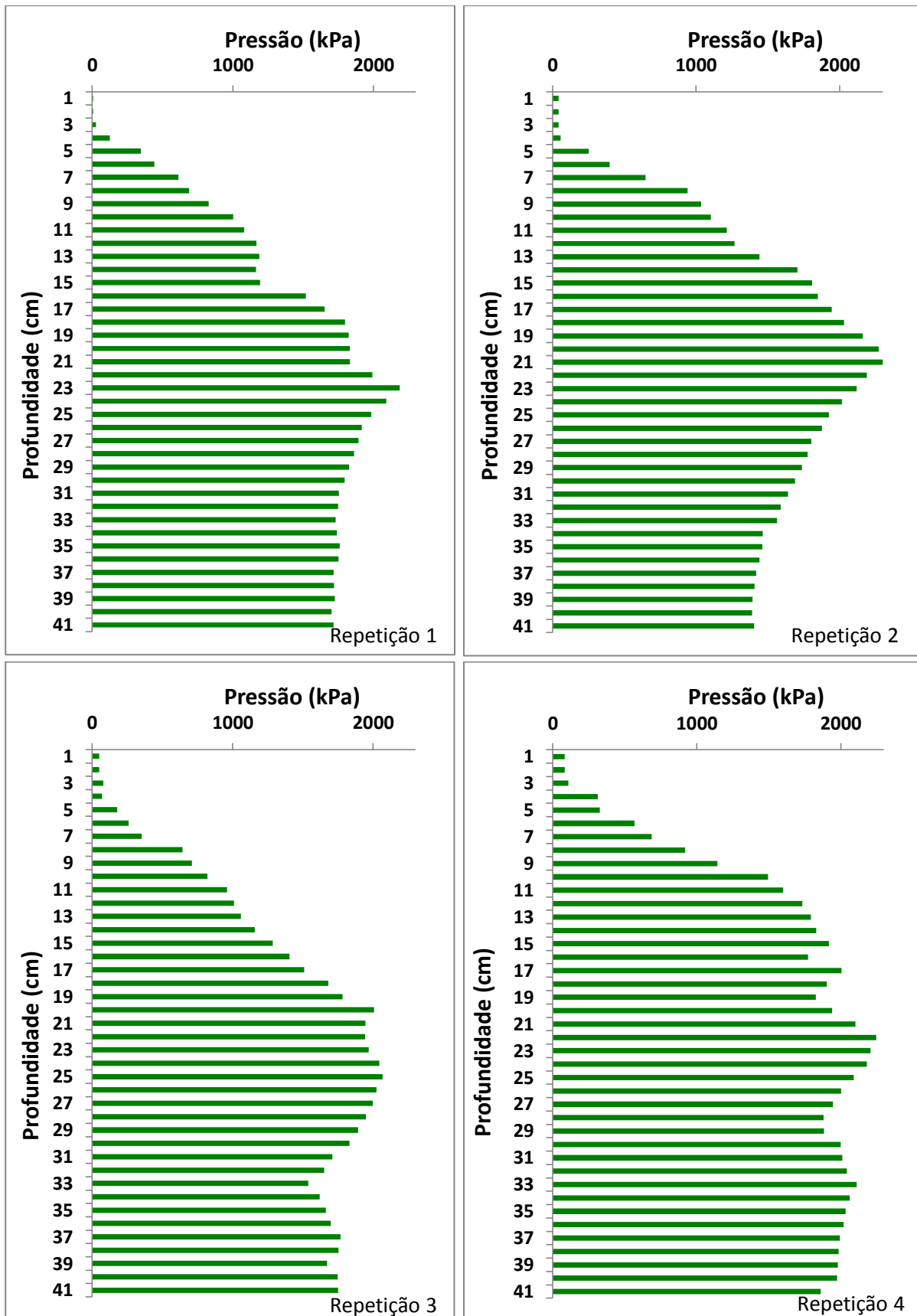
WÜRSCHÉ, W.; DENARDIN, L. E. Conservação e manejo dos solos; I. Planalto Rio-Grandense, considerações gerais. **Circular Técnica.** EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, Passo Fundo, n.02, p.01-20. 1980.

ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da; SANTOS, M. R. dos; Efeito da aplicação sucessiva de precipitações pluviais com diferentes perfis na taxa de infiltração de água no solo. **Ciência do Solo.** v.36, n.2, pag.377-388, abr. 2012.

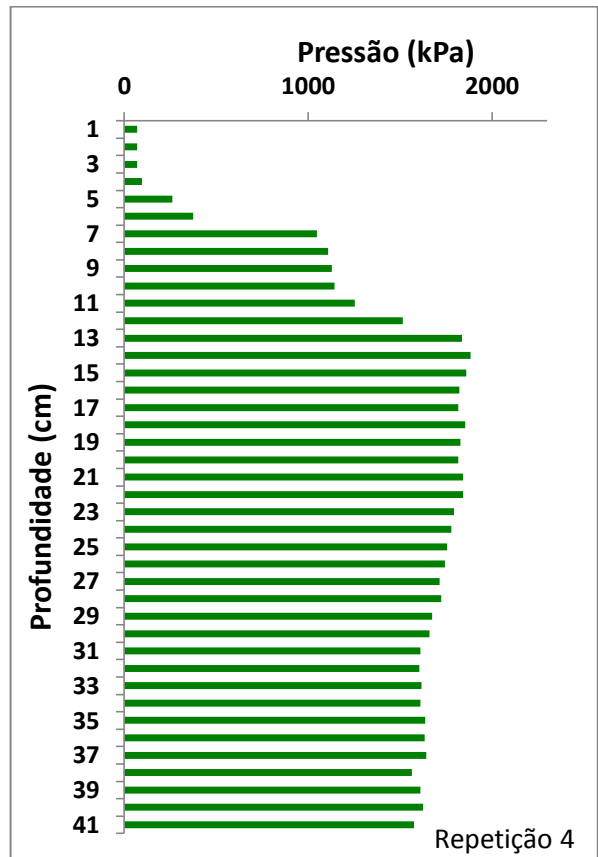
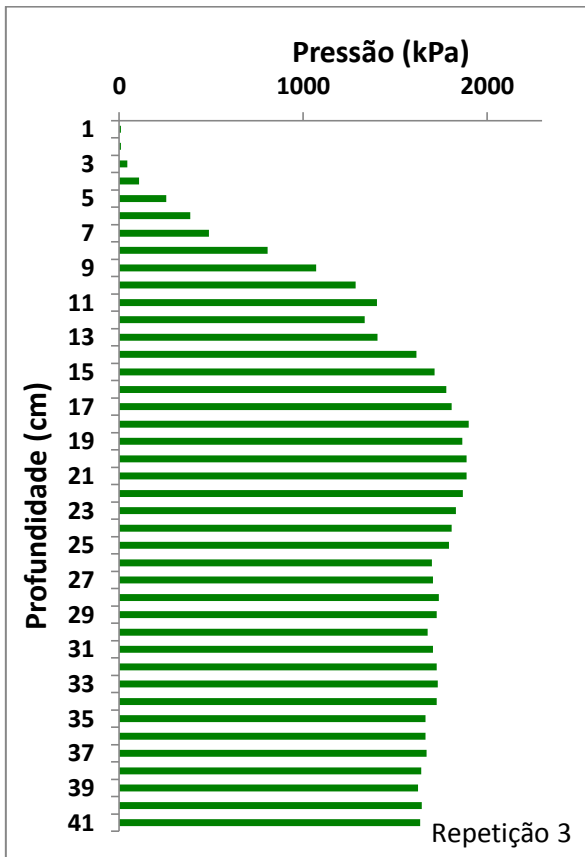
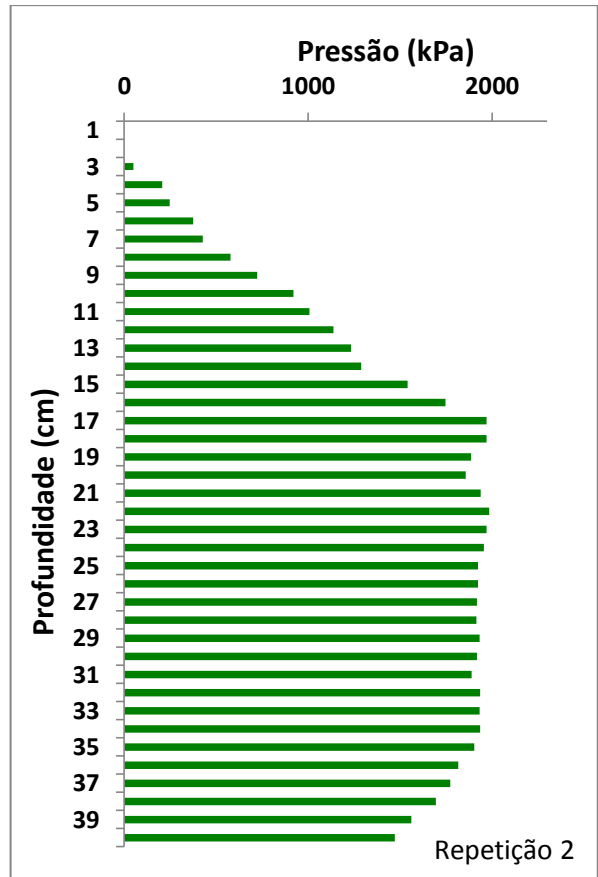
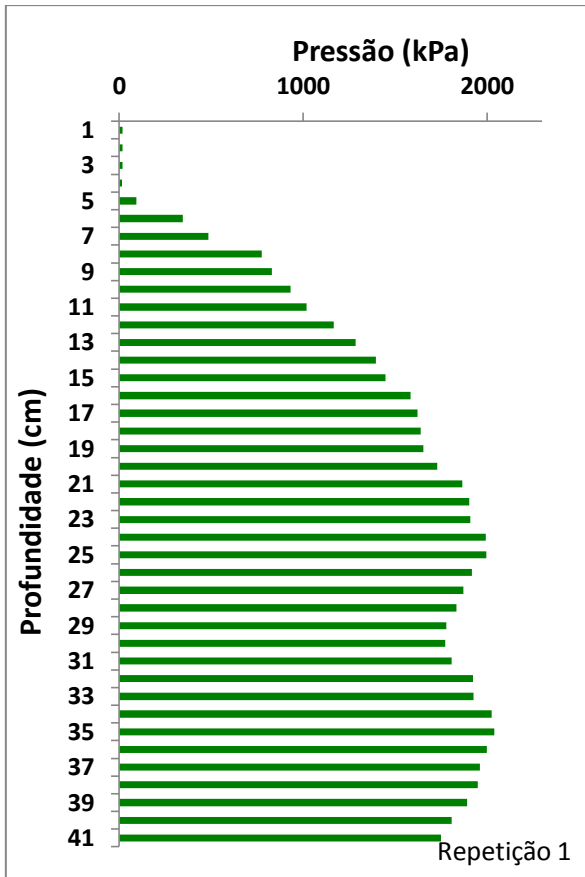
APÊNDICE A – MÉDIA DA RESISTENCIA À PENETRAÇÃO PARA AS UNIDADES EXPERIMENTAIS COM O PROTÓTIPO NA VELOCIDADE 1 (TRATAMENTO 1).



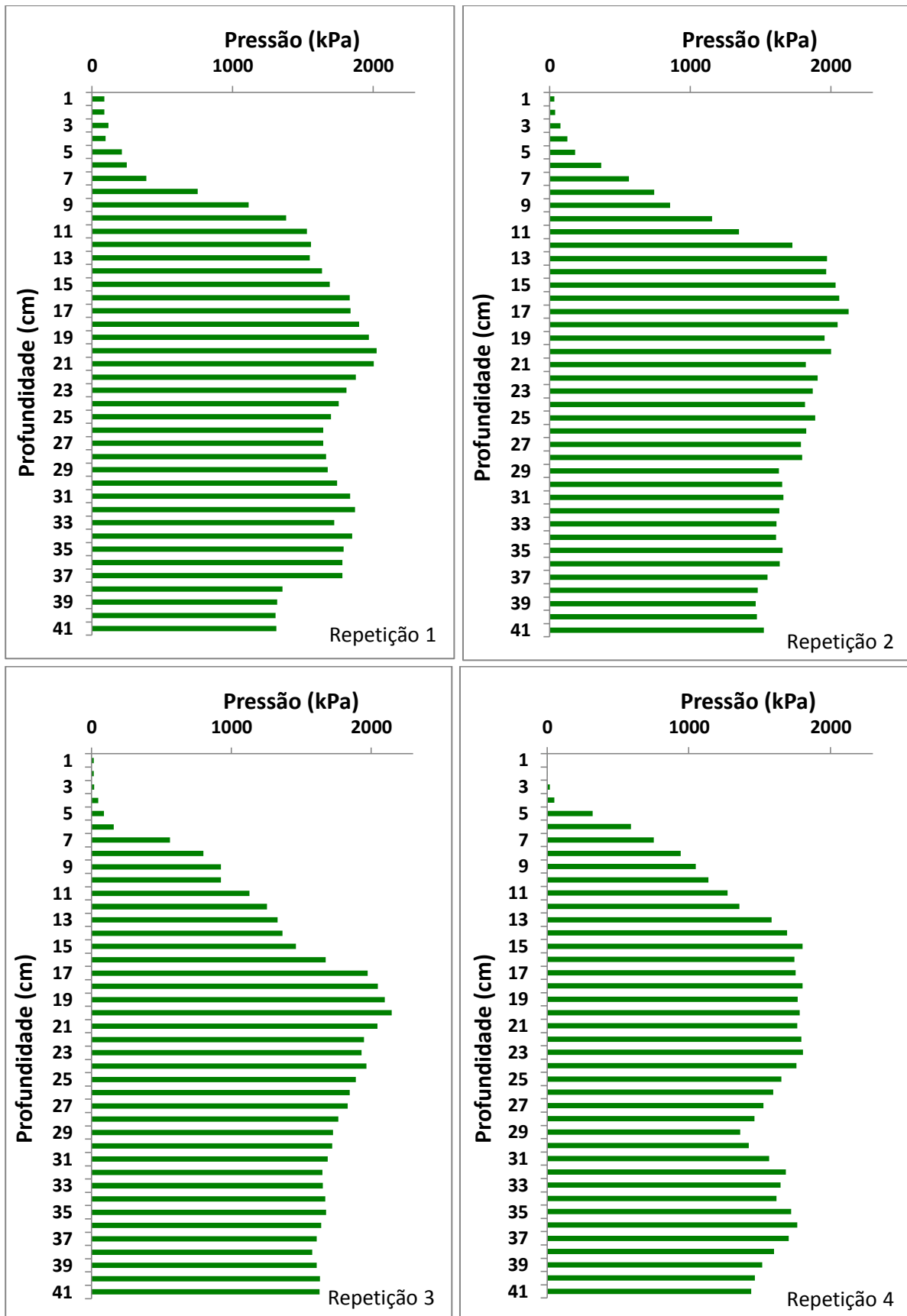
APÊNDICE A – MÉDIA DA RESISTENCIA À PENETRAÇÃO PARA AS UNIDADES EXPERIMENTAIS COM O PROTÓTIPO NA VELOCIDADE 2 (TRATAMENTO 2).



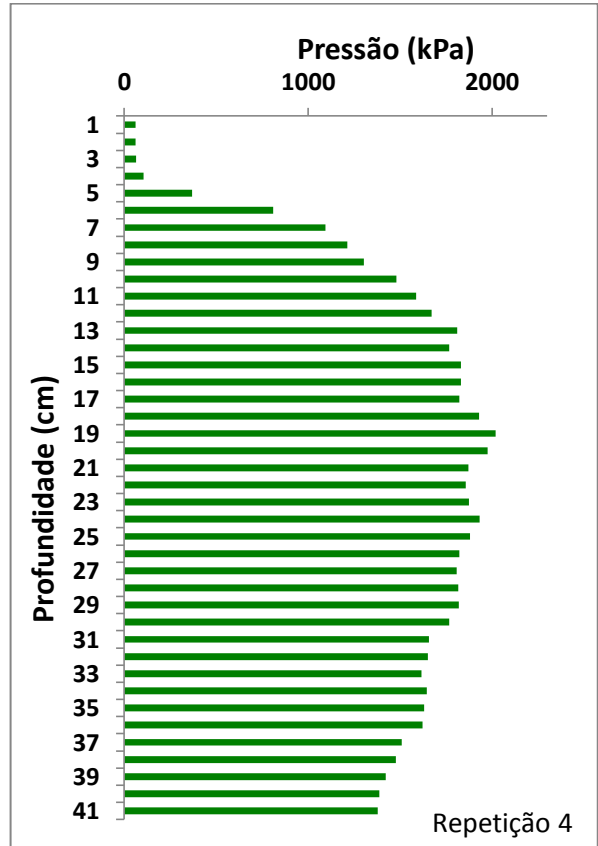
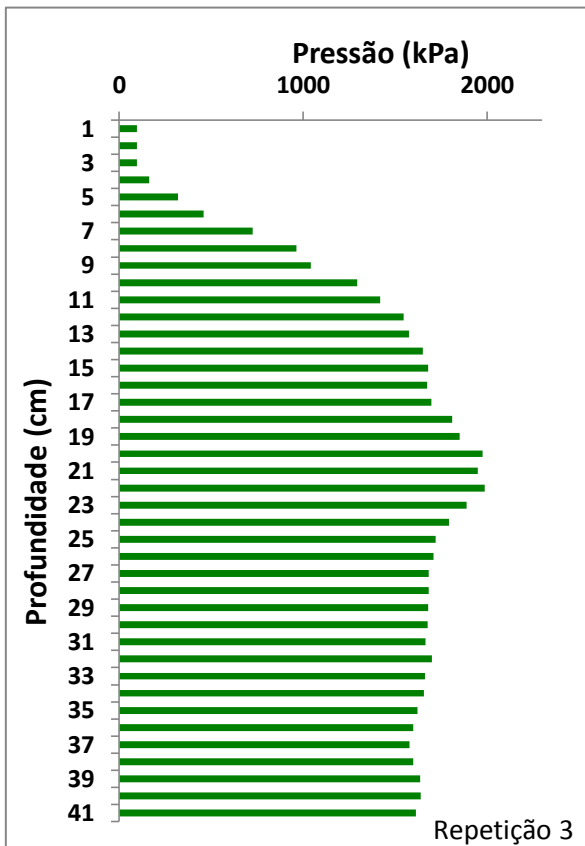
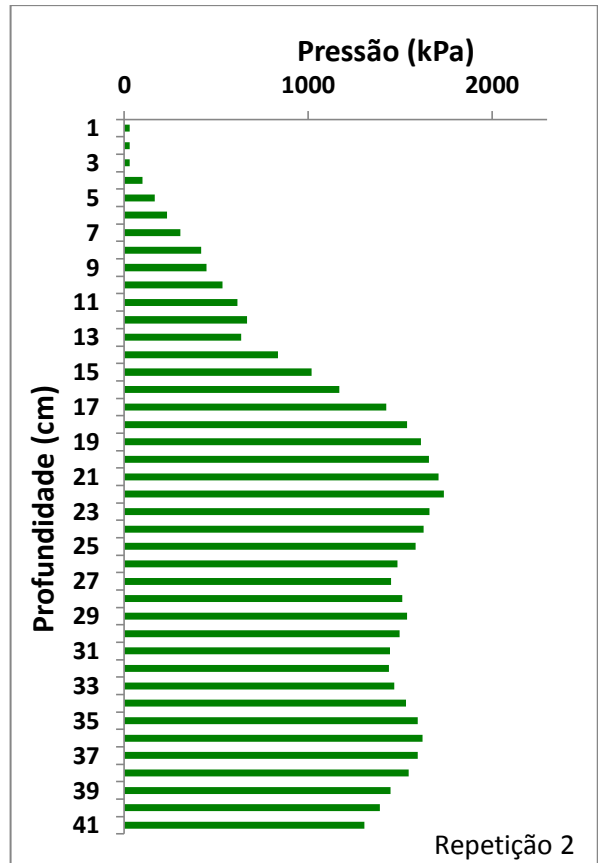
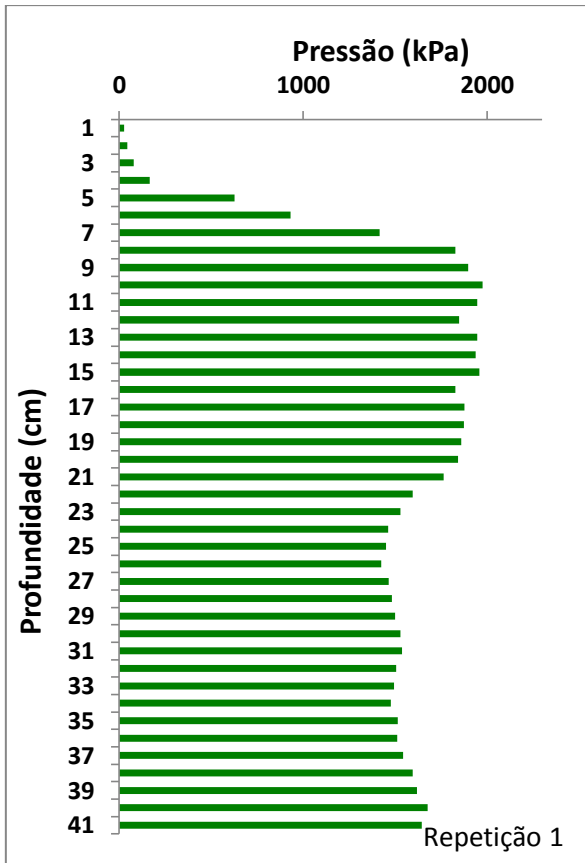
APÊNDICE A – MÉDIA DA RESISTENCIA À PENETRAÇÃO PARA AS UNIDADES EXPERIMENTAIS COM O PROTÓTIPO NA VELOCIDADE 3 (TRATAMENTO 3).



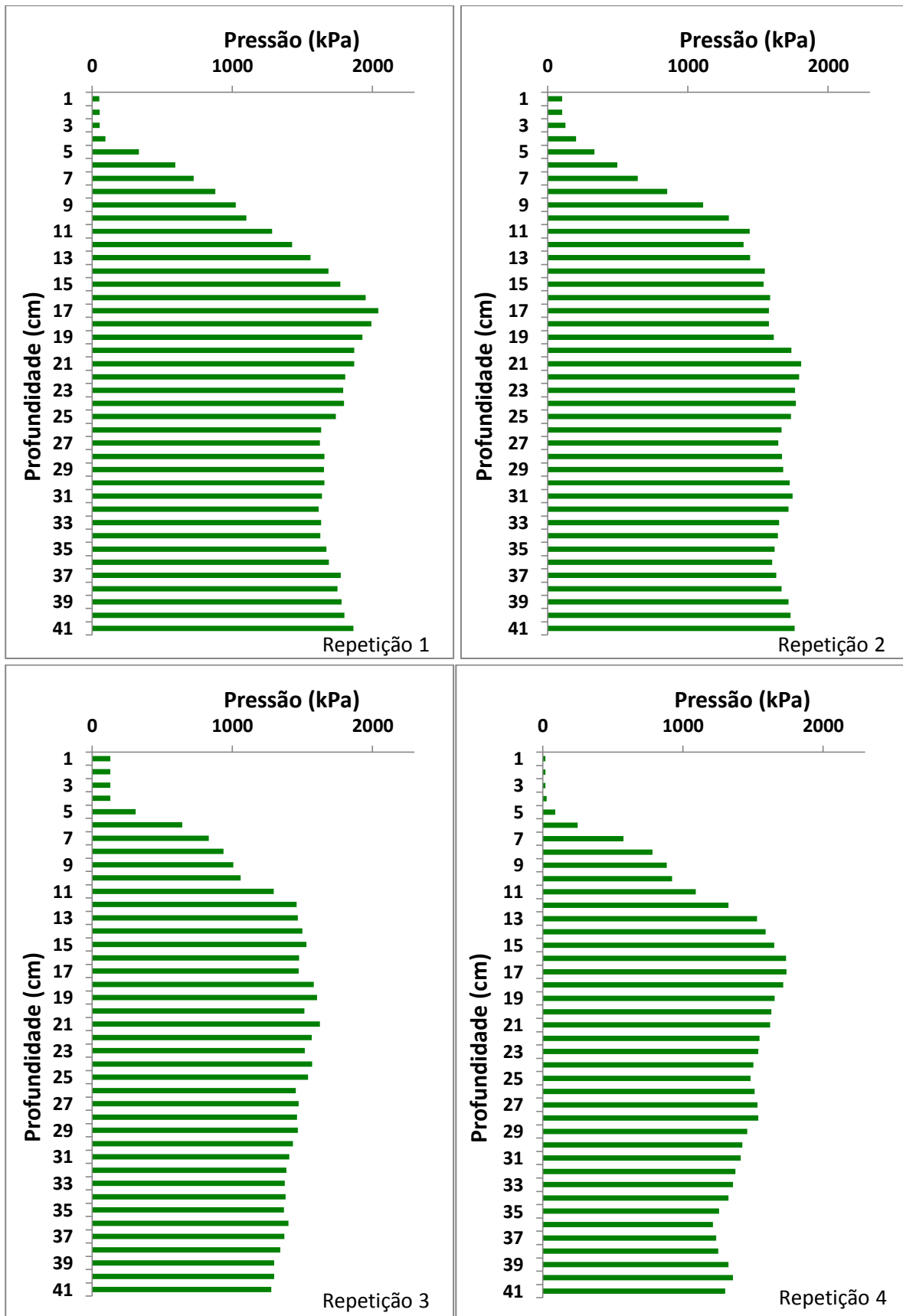
APÊNDICE A – MÉDIA DA RESISTENCIA À PENETRAÇÃO PARA AS UNIDADES EXPERIMENTAIS COM A HASTE NA VELOCIDADE 1 (TRATAMENTO 4).



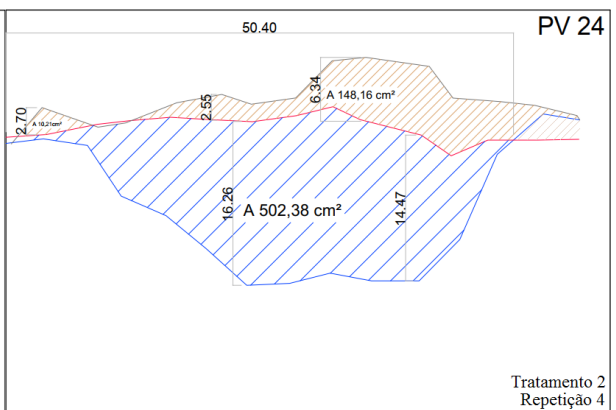
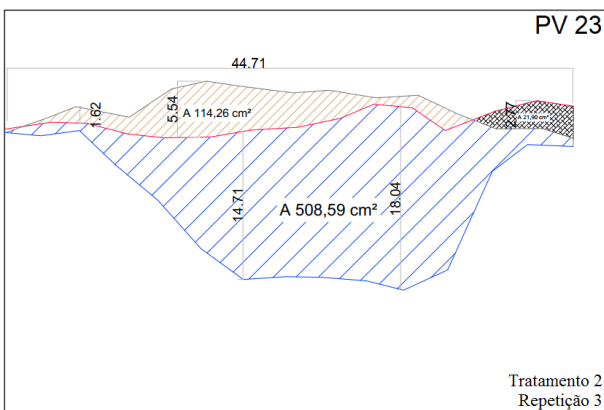
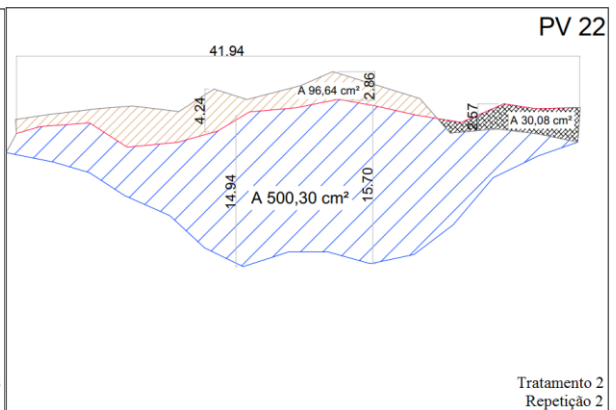
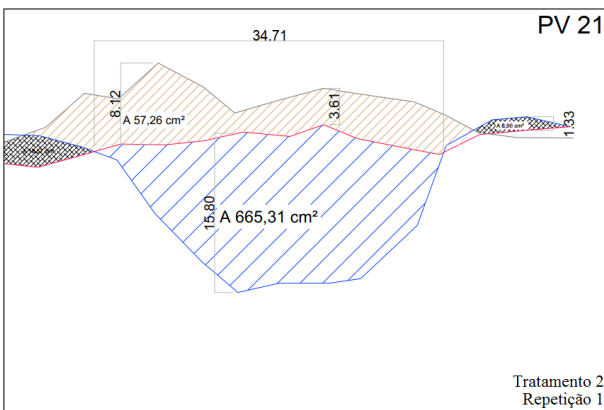
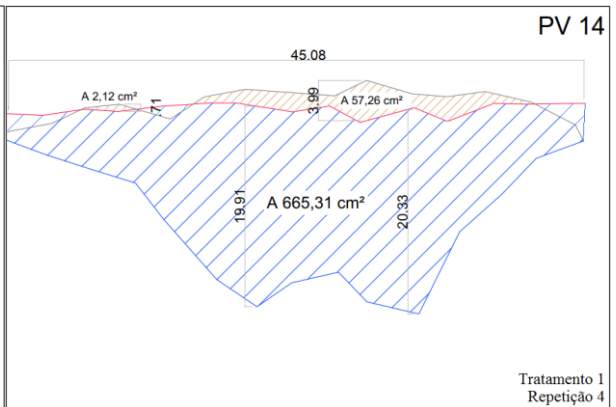
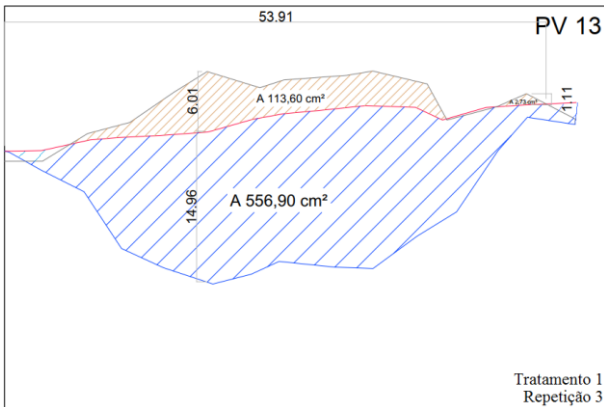
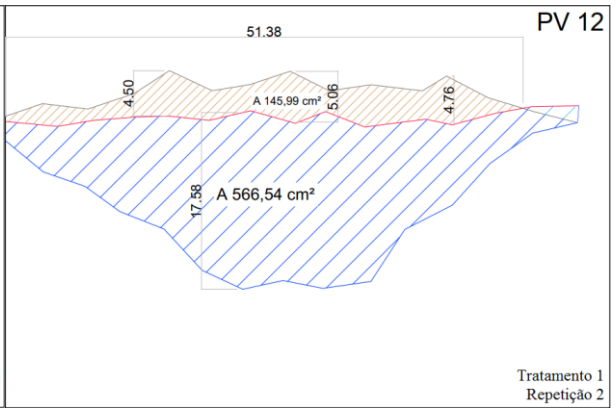
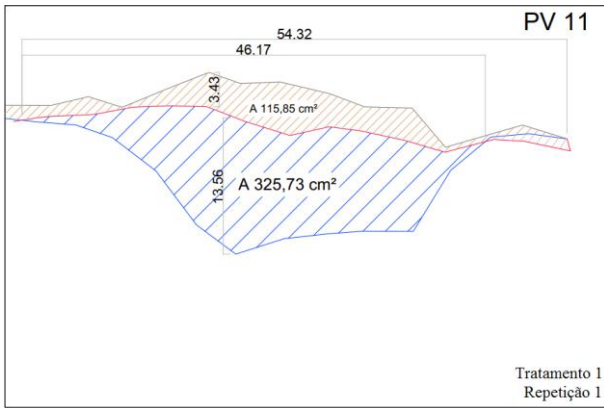
APÊNDICE A – MÉDIA DA RESISTENCIA À PENETRAÇÃO PARA AS UNIDADES EXPERIMENTAIS COM A HASTE NA VELOCIDADE 2 (TRATAMENTO 5).



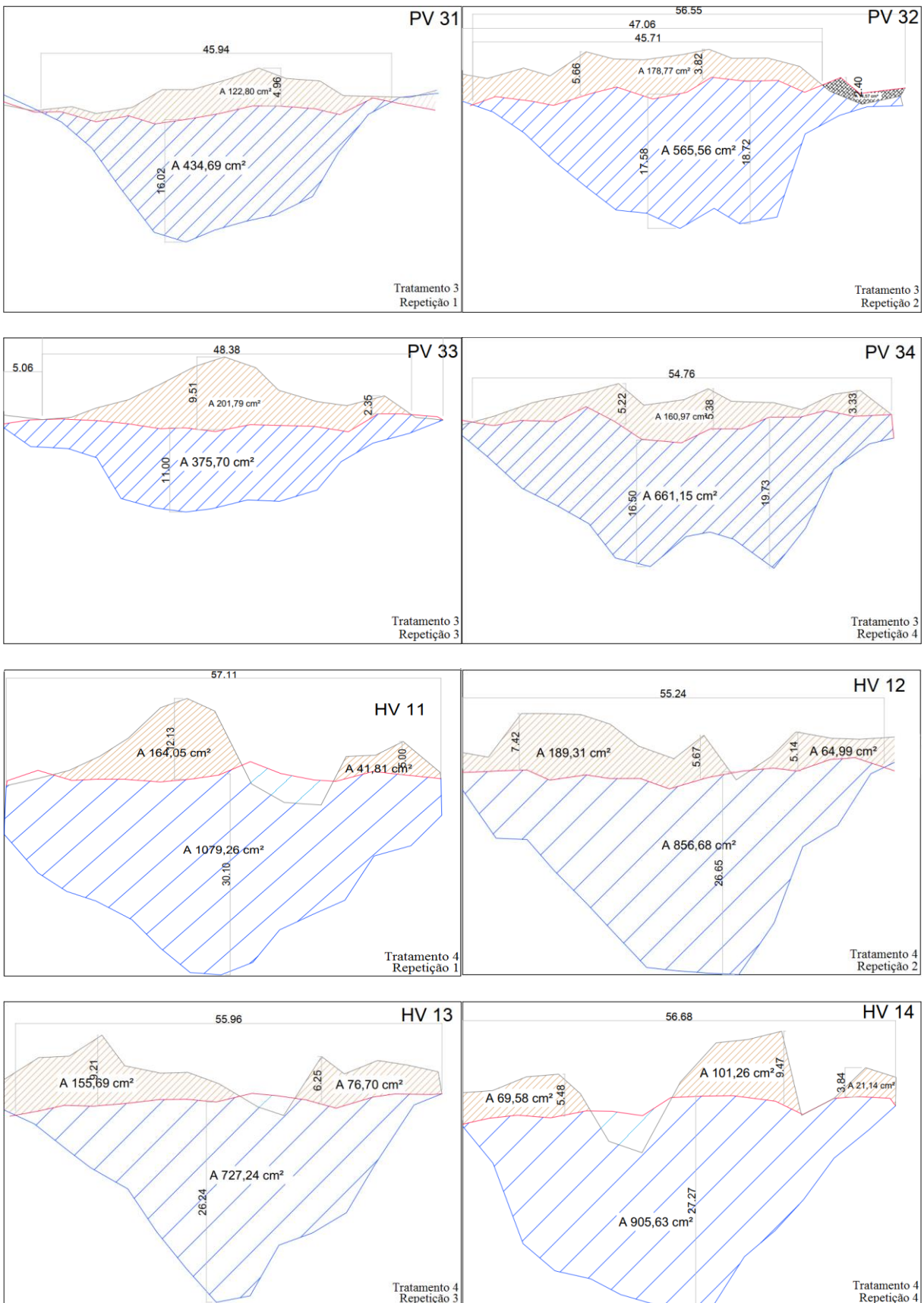
APÊNDICE A – MÉDIA DA RESISTENCIA À PENETRAÇÃO PARA AS UNIDADES EXPERIMENTAIS COM A HASTE NA VELOCIDADE 3 (TRATAMENTO 6).



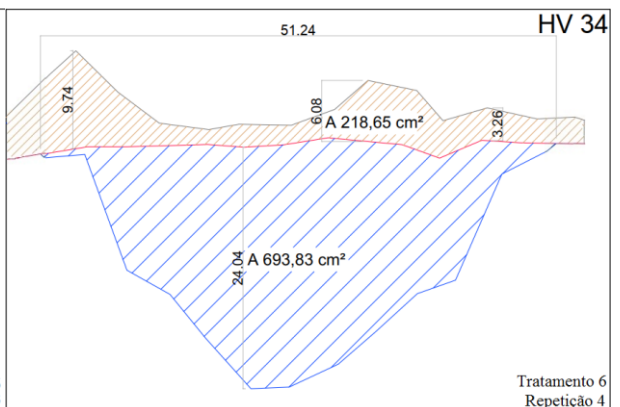
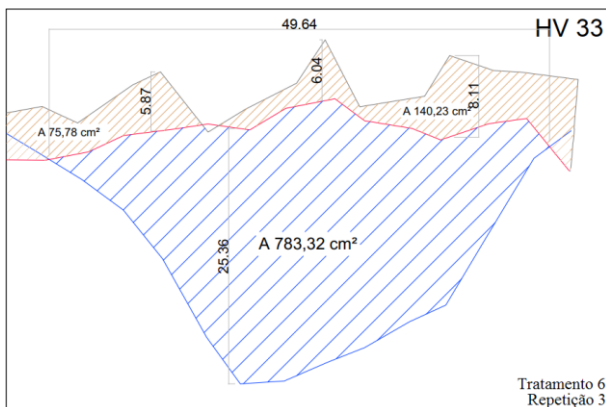
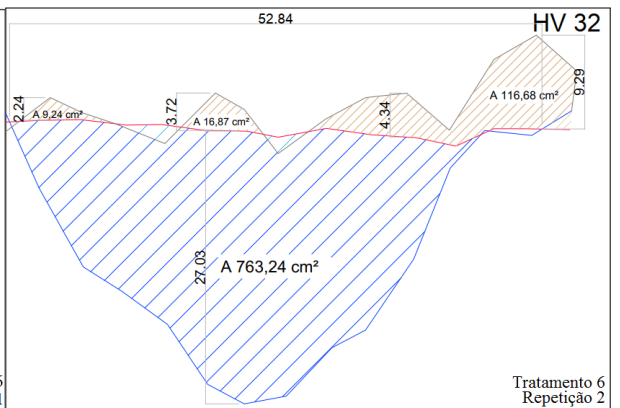
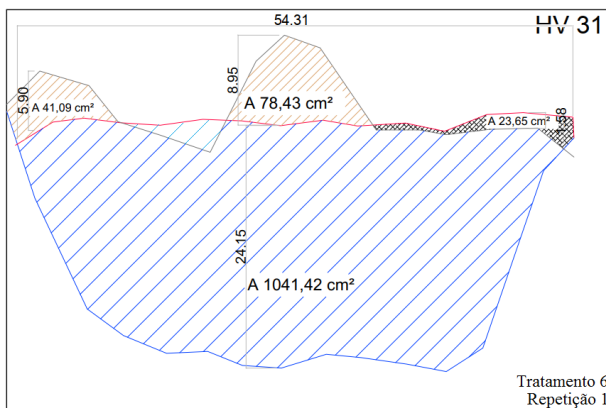
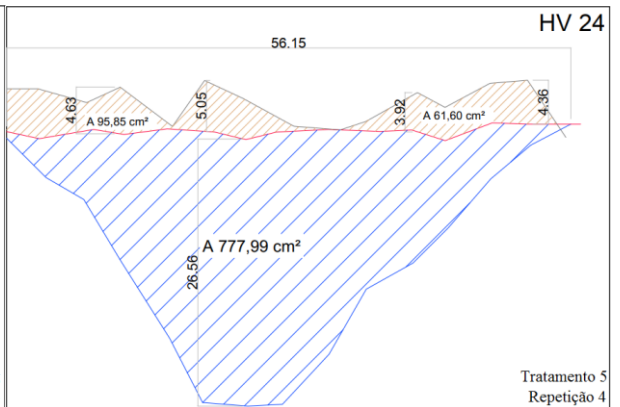
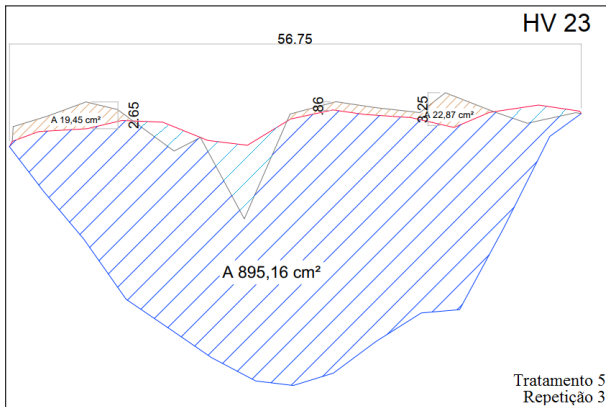
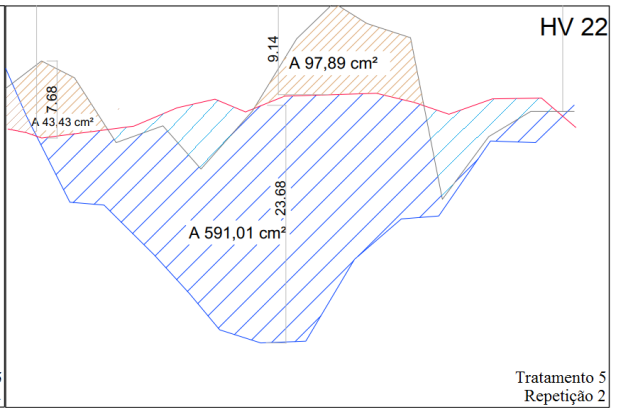
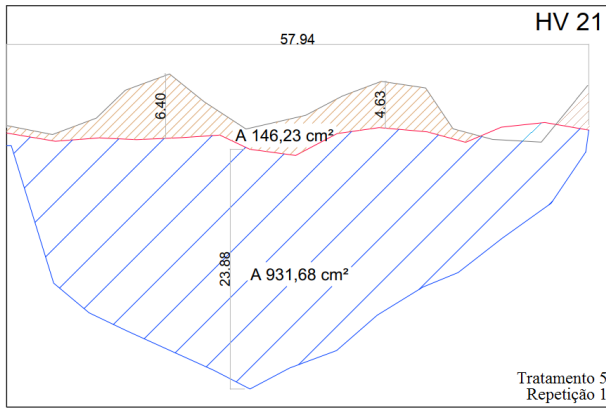
APÊNDICE B – PERFIL DA ÁREA DE SOLO ELEVADA, MOBILIZADA, PROFUNDIDADE E LARGURA DE SULCO (TRATAMENTO 1 E 2).



APÊNDICE B – PERFIL DA ÁREA DE SOLO ELEVADA, MOBILIZADA, PROFUNDIDADE E LARGURA DE SULCO (TRATAMENTO 3 E 4).



APÊNDICE B – PERFIL DA ÁREA DE SOLO ELEVADA, MOBILIZADA, PROFUNDIDADE E LARGURA DE SULCO (TRATAMENTO 5 E 6).



APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Variável analisada: FORÇA DE TRAÇÃO

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
FERRAMENTA	1	170.376124	170.376124	466.515	0.0000
VELOCIDADE	2	0.888093	0.444046	1.216	0.3241
FERRAMENTA*VELOCIDAD	2	3.406454	1.703227	4.664	0.0266
REPETI__O	3	2.456036	0.818679	2.242	0.1255
erro	15	5.478158	0.365211		
Total corrigido	23	182.604865			
CV (%) =	10.20				
Média geral:	5.9247958	Número de observações:	24		

Variável analisada: POTÊNCIA NA BARRA DE TRAÇÃO

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
FERRAMENTA	1	453.248688	453.248688	411.708	0.0000
VELOCIDADE	2	73.727632	36.863816	33.485	0.0000
FERRAMENTA*VELOCIDAD	2	38.376234	19.188117	17.429	0.0001
REPETI__O	3	7.309250	2.436417	2.213	0.1288
erro	15	16.513492	1.100899		
Total corrigido	23	589.175296			
CV (%) =	11.02				
Média geral:	9.5226542	Número de observações:	24		

Variável analisada: CONSUMO HORÁRIO DE COMBUSTÍVEL

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
FERRAMENTA	1	0.736190	0.736190	3.435	0.0836
VELOCIDADE	2	1.612960	0.806480	3.763	0.0474
FERRAMENTA*VELOCIDAD	2	3.067961	1.533980	7.158	0.0066
REPETI__O	3	1.047123	0.349041	1.629	0.2248
erro	15	3.214577	0.214305		
Total corrigido	23	9.678811			
CV (%) =	28.78				
Média geral:	1.6083417	Número de observações:	24		

APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

 Variável analisada: PATINAMENTO

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
FATOR_A	1	328.782038	328.782038	566052.288	0.0000
FATOR_D	2	1.892033	0.946017	1628.723	0.0000
FATOR_A*FATOR_D	2	8.419600	4.209800	7247.862	0.0000
REPETI__O	3	0.001412	0.000471	0.811	0.5076
erro	15	0.008713	0.000581		
Total corrigido	23	339.103796			
CV (%) =	10.92				
Média geral:	8.2320833	Número de observações:	24		

 Variável analisada: ÁREA DE SOLO MOBILIZADA

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
FERRAMENTA	1	0.005557	0.005557	29.381	0.0001
VELOCIDADE	2	0.000082	0.000041	0.216	0.8079
FERRAMENTA*VELOCIDAD	2	0.000220	0.000110	0.580	0.5718
REPETI__O	3	0.000421	0.000140	0.742	0.5436
erro	15	0.002837	0.000189		
Total corrigido	23	0.009116			
CV (%) =	20.08				
Média geral:	0.0685000	Número de observações:	24		

 Variável analisada: ÁREA DE SOLO ELEVADA

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
FERRAMENTA	1	0.000120	0.000120	5.644	0.0313
VELOCIDADE	2	0.000094	0.000047	2.211	0.1441
FERRAMENTA*VELOCIDAD	2	0.000149	0.000075	3.511	0.0561
REPETI__O	3	0.000039	0.000013	0.607	0.6206
erro	15	0.000319	0.000021		
Total corrigido	23	0.000722			
CV (%) =	30.82				
Média geral:	0.0149708	Número de observações:	24		

APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Variável analisada: EMPOLAMENTO DO SOLO

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
FERRAMENTA	1	116.140201	116.140201	1.054	0.3209
VELOCIDADE	2	222.603007	111.301503	1.010	0.3878
FERRAMENTA*VELOCIDAD	2	343.163913	171.581957	1.557	0.2431
REPETI__O	3	153.019903	51.006634	0.463	0.7125
erro	15	1653.450851	110.230057		
Total corrigido	23	2488.377875			
CV (%) =	44.71				
Média geral:	23.4803375	Número de observações:	24		

Variável analisada: PROFUNDIDA MÁXIMA DE SULCO

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
FERRAMENTA	1	0.054274	0.054274	99.078	0.0000
VELOCIDADE	2	0.000995	0.000497	0.908	0.4245
FERRAMENTA*VELOCIDAD	2	0.000782	0.000391	0.713	0.5059
REPETI__O	3	0.001490	0.000497	0.906	0.4612
erro	15	0.008217	0.000548		
Total corrigido	23	0.065756			
CV (%) =	11.02				
Média geral:	0.2123042	Número de observações:	24		

Variável analisada: LARGURA MÁXIMA DE SULCO

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
FERRAMENTA	1	0.013085	0.013085	5.238	0.0370
VELOCIDADE	2	0.007488	0.003744	1.499	0.2551
FERRAMENTA*VELOCIDAD	2	0.009821	0.004910	1.965	0.1745
REPETI__O	3	0.005013	0.001671	0.669	0.5842
erro	15	0.037474	0.002498		
Total corrigido	23	0.072881			
CV (%) =	9.55				
Média geral:	0.5234417	Número de observações:	24		

APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

 Variável analisada: RESISTÊNCIA ESPECÍFICA OPERACIONAL

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
FERRAMENTA	1	10535.432445	10535.432445	22.508	0.0003
VELOCIDADE	2	192.687896	96.343948	0.206	0.8162
FERRAMENTA*VELOCIDAD	2	1053.152754	526.576377	1.125	0.3506
REPETI__O	3	767.087160	255.695720	0.546	0.6582
erro	15	7021.245772	468.083051		
Total corrigido	23	19569.606027			
CV (%) =	25.51				
Média geral:	84.8157125	Número de observações:	24		

 Variável analisada: TRAÇÃO ESPECÍFICA

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
FERRAMENTA	1	1003.635720	1003.635720	54.894	0.0000
VELOCIDADE	2	25.822882	12.911441	0.706	0.5092
FERRAMENTA*VELOCIDAD	2	80.233448	40.116724	2.194	0.1459
REPETI__O	3	15.596190	5.198730	0.284	0.8360
erro	15	274.247620	18.283175		
Total corrigido	23	1399.535861			
CV (%) =	15.99				
Média geral:	26.7402958	Número de observações:	24		
