

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL

Leonardo Antonio Furini

DESEMPENHO OPERACIONAL DE HASTES E PONTEIRAS NA
DESCOMPACTAÇÃO DE SOLO

Passo Fundo

2018

Leonardo Antonio Furini

**DESEMPENHO OPERACIONAL DE HASTES E PONTEIRAS NA
DESCOMPACTAÇÃO DE SOLO**

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Portella

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2018

Leonardo Antonio Furini

**DESEMPENHO OPERACIONAL DE HASTES E PONTEIRAS NA
DESCOMPACTAÇÃO DE SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 10 de Agosto de 2018.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor José Antonio Portella - Orientador
Universidade de Passo Fundo - PPGPPF

Professor Doutor Márcio Walber
Universidade de Passo Fundo - PPGPPF

Professor Doutor Nilson Luiz Maziero
Universidade de Passo Fundo - PPGPPF

Professor Doutor Walter Boller
Universidade de Passo Fundo - PPGAgro

Dedico este trabalho a Deus, minha esposa e meus pais.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me acompanhar nessa caminhada e por me manter focado no trabalho.

À minha esposa Sabrina Caroline Bassani pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Aos meus pais Denir Luiz Furini e Gessi Inês Furini pela educação recebida.

Ao meu orientador José Antonio Portella agradeço de coração pelo conhecimento compartilhado, agregando uma grande bagagem técnica em minha vida acadêmica e profissional.

À Stara S/A Indústria de Implementos Agrícolas pelo apoio financeiro, acesso a bons equipamentos e estrutura para que pudesse realizar este trabalho, em especial aos colegas Álex Cappellari, Fernando Cappellari e Róbinson Jabuonski Junior pelo apoio na realização deste trabalho.

À UPF pelo excelente serviço educacional prestado pelo corpo docente da FEAR durante o curso de Engenharia Mecânica no qual fiz minha graduação. Fica também o agradecimento ao corpo docente do PPGPPF pela qualidade do ensino prestado no mestrado profissional em Projeto e Processos de Fabricação.

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

Tendo em vista o importante papel que o agronegócio tem na economia do país, é de suma importância investir em pesquisas que agreguem avanços na tecnologia das máquinas e equipamentos agrícolas. Dentre as operações agrícolas mais onerosas está a descompactação do solo, realizada por meio de subsolagem ou de escarificação. Logo, a otimização dessa operação trará consigo uma redução de custos para o agricultor, aliada a um aumento de produtividade no campo. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes geometrias de hastes e ponteiros de um descompactador de solo, sendo seus desempenhos avaliados através da força e potência de tração. Complementarmente foi realizada a medição da área de elevação de solo e avaliação da incorporação de matéria orgânica. O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho Distrófico em um delineamento experimental fatorial 5x2x2, utilizando cinco geometrias de hastes/ponteiras que foram tracionadas em duas velocidades de deslocamento (3,0 km/h, 6,0 km/h) e duas profundidades de trabalho (300 mm e 400 mm). Os resultados médios indicaram que a Haste 2 apresentou a menor demanda energética. Porém, na configuração de maior velocidade e maior profundidade a Haste 3 apresentou o melhor desempenho. A Haste 4, com ponteiro alado, necessitou da maior demanda energética. De maneira geral, o aumento da velocidade e da profundidade causaram um aumento da demanda de força horizontal e força vertical. Apesar de não apresentar diferenças estatísticas, a área de elevação de solo foi maior na Haste 4, sendo que a Haste 5 com inclinação lateral, apresentou a menor incorporação da matéria orgânica e a segunda menor demanda energética entre as hastes estudadas.

Palavras-chave: descompactação de solo; subsolagem; escarificação; haste com inclinação lateral.

ABSTRACT

Considering the major role agribusiness plays in the Brazilian economy, it is of utmost importance to invest in studies that add improvements to the technology of agricultural machinery and equipment. Among the most expensive agricultural operations is soil decompaction, which is performed by subsoiling or scarification. Hence, optimizing this operation will reduce costs for farmers and increase field productivity. Therefore, this study aimed to assess different shank and tip geometries of a soil decompactor, also assessing their performances through draft force and power. Additionally, the soil elevation area was measured, and the incorporation of organic matter was assessed. The experiment was performed in dystrophic red latosol in a 5x2x2 factorial experimental design, using five shank/tip geometries that were drawn at two travel speeds (3,0 km/h and 6,0 km/h) and two working depths (300 mm and 400 mm). The mean results indicated that shank 2 presented the lowest power requirement. However, when setting higher speed and higher depth, shank 3 performed the best. Shank 4 with winged tip presented the highest power requirement. Overall, the increase in speed and depth increased horizontal and vertical force. Although there were no statistical differences, the soil elevation area was higher in shank 4, and shank 5 with lateral inclination, presented the lowest incorporation of organic matter and the second lowest power requirement among the shanks studied.

Keywords: soil decompaction, subsoiling, scarification, shank with lateral inclination.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Camada de solo compactada.....	24
Figura 2 - Influência do teor de umidade.	26
Figura 3 - Formação de torrões.....	27
Figura 4 – Rompimento do solo de modo frágil.....	28
Figura 5 – Rompimento do solo de através do distúrbio de tensão.....	29
Figura 6 - Partes de um subsolador/escarificador de arrasto.....	31
Figura 7 - Subsolador.	32
Figura 8 - Paraplow 1000 da Howard.....	32
Figura 9 - Escarificador.	33
Figura 10 – Formas geométricas de hastes mais comuns.....	36
Figura 11 – Haste com inclinação lateral.	36
Figura 12 - Desarme automático.	37
Figura 13 – Haste com ponteira sem asa e com asa.	38
Figura 14 – Área de solo descompactada pelos tipos de ponteira: com e sem asas.	38
Figura 15 – Geometria da ponteira alada.....	39
Figura 16 – Ângulo de envergadura da ponteira alada.....	39
Figura 17 – Profundidade de trabalho recomendada.	41
Figura 18 – Largura de ponteira sem asa x Profundidade crítica.	42
Figura 19 – Compressão de solo abaixo da profundidade crítica.....	42
Figura 20 - Influência da velocidade na força.	43
Figura 21 – Distância entre hastes ideal.	44
Figura 22 - Montagem do implemento agrícola no trator.	45
Figura 23 - Forças agindo sobre a haste.	46
Figura 24 - Diagrama do processamento da informação desde a excitação até a resposta.	49
Figura 25 - Extensômetro elétrico.	50
Figura 26 – Sistema de medição com extensometria.	51
Figura 27 - Esquema de modulo de aquisição de dados de célula de carga.....	51
Figura 28 - Anel octogonal com pontos de colagem dos sensores e ação das forças.....	52
Figura 29 - Anel octogonal para medições em subsoladores.	53
Figura 30 - Fluxograma de atividades.	54
Figura 31 – Localização geográfica de Não-Me-Toque - RS, local dos experimentos.....	55

Figura 32 - Área do experimento.....	55
Figura 33 – Haste comercial (H1), Haste 1.	56
Figura 34 – Haste comercial adaptada, Haste 1.....	57
Figura 35 - Haste protótipo (H2), Haste 2.	57
Figura 36 – Haste protótipo (H3), Haste 3.	58
Figura 37 – Haste protótipo (H4), Haste 4.	58
Figura 38 – Haste protótipo (H5), Haste 5.	59
Figura 39 - Hastes à campo no dia dos experimentos.	60
Figura 40 – Célula de carga biaxial.	60
Figura 41 - Sensor utilizado.	61
Figura 42 – Pontos de colagem dos sensores.	61
Figura 43 - Célula sendo instrumentada.	62
Figura 44 – Calibração da célula de carga biaxial.....	62
Figura 45 – Células de carga utilizadas para calibração das células octogonais.....	63
Figura 46 - Sistema de medição.	64
Figura 47 – Carro dinamométrico.	65
Figura 48 - Vista lateral do carro dinamométrico.....	66
Figura 49 – Montagem da haste e célula de carga.....	66
Figura 50 – Simplificação no conjunto haste.	67
Figura 51 – Equipamento utilizado para os experimentos de campo.....	67
Figura 52 – Perfilômetro mecânico de varetas.	68
Figura 53 – Escala para medição da área de elevação de solo.	69
Figura 54 – Penetrômetro.	69
Figura 55 – Pontos de medição de resistência do solo a penetração.	72
Figura 56 – Medição da resistência do solo a penetração.	72
Figura 57 – Resistência do solo a penetração.....	73
Figura 58 – Força horizontal e vertical (kgf), média geral.....	81
Figura 59 – Força média horizontal e vertical (kgf) para 6,0 km/h e 400 mm.....	82
Figura 60 – Posicionamento e nivelamento do perfilômetro de varetas.....	83
Figura 61 - Haste 1, Velocidade 3,0 km/h e Profundidade 400 mm.	84
Figura 62 – Avaliação visual do distúrbio superficial de solo (incorporação da cobertura vegetal), para 6,0 km/h e 400 mm.	84
Figura 63 – Distúrbio superficial de solo para a Haste 5 (H5).....	85
Figura 64 – Distúrbio superficial de solo na Haste 4 (H4).....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças entre escarificador e subsolador.	33
Tabela 2 – Principais subsoladores fabricados no Brasil.	47
Tabela 3 – Descompactador com curvatura lateral semelhante ao Paraplow.....	47
Tabela 4 – Escarificadores produzidos no Brasil.	48
Tabela 5 – Esquema experimental.....	71
Tabela 6 - Análise de Variância das três variáveis deste estudo para a força horizontal média.	75
Tabela 7 - Análise de variância haste x velocidade x profundidade (Força horizontal média (kgf)).....	77
Tabela 8 - Força horizontal máxima (kgf).....	79
Tabela 9 - Análise de Variância das três variáveis deste estudo para a força vertical média (kgf).	80
Tabela 10 - Potência média para 6,0 km/h e 400 mm.	83
Tabela 11 – Análise de variância para área de elevação de solo (m ²), estatística geral.	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Aquarius	Projeto para Agricultura de Precisão
ASAE	<i>American Society of Agricultural Engineers</i>
FEAR	Faculdade de Engenharia e Arquitetura
FIMA	<i>Feria Internacional de la Maquinaria Agrícola</i>
HBM	<i>Hottinger Baldwin Measurements</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de cone
IP67	Proteção contra entrada de poeira e água
MKS*	Metro, Quilograma-Força, Segundo
PIB	Produto interno Bruto
PPGAgro	Programa de Pós-Graduação em Agronomia - UPF
PPGPPF	Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação - UPF
UPF	Universidade de Passo Fundo

LISTA DE SÍMBOLOS

Ae	Área de elevação (m ²)
Fm	Força média (N)
Pm	Potência média (CV)
Vm	Velocidade média (km/h)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivos.....	18
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.3	Conteúdo da dissertação	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Estado da arte, na história.....	20
2.2	Compactação do solo.....	21
2.2.1	Resistência do solo a penetração	23
2.2.2	Efeitos da umidade na compactação do solo	26
2.3	Mobilização do solo.....	27
2.4	Subsolagem x Escarificação	30
2.5	Formas geométricas da haste.....	35
2.6	Geometria da ponteira da haste.....	37
2.7	Profundidade de trabalho	41
2.8	Velocidade de deslocamento	43
2.9	Espaçamento entre hastes	44
2.10	Força de tração em subsoladores	45
2.11	Máquinas do mercado agrícola.....	47
2.11.1	Subsoladores	47
2.11.2	Escarificadores.....	48
2.12	Transdutor de força (célula de carga)	48
2.12.1	Extensômetro elétrico	49
2.12.2	Sistema de medição	50
2.12.3	Célula de carga octogonal.....	52
2.13	Considerações finais	53
3	MATERIAL E MÉTODOS	54
3.1	Material.....	54
3.1.1	Área experimental.....	54
3.1.2	Caracterização das hastes e ponteiros	56

3.1.3	Célula de carga.....	60
3.1.4	Sistema de medição	63
3.1.5	Carro dinamométrico	64
3.1.6	Perfilômetro	67
3.1.7	Penetrômetro	69
3.2	Métodos	70
3.2.1	Tratamentos	70
3.2.2	Delineamento experimental	70
3.2.3	Resistência do solo à penetração	71
3.2.4	Força horizontal e força vertical	73
3.2.5	Área de solo elevada	73
3.2.6	Velocidade média de deslocamento.....	74
3.2.7	Potência média na barra de tração	74
3.2.8	Análise estatística	74
4	RESULTADOS E DISCUSÃO.....	75
4.1	Força média horizontal	75
4.1.1	Interação haste x velocidade	76
4.1.2	Interação haste x profundidade	77
4.1.3	Interação haste x velocidade x profundidade.....	77
4.2	Força horizontal máxima	79
4.3	Força vertical média	80
4.4	Força resultante.....	81
4.5	Potência na barra de tração	82
4.6	Área de elevação de solo	83
5	CONCLUSÕES.....	87
5.1	Trabalhos futuros	87
6	REFERÊNCIAS.....	88
	APÊNDICE A – Curva de calibração célula de carga octogonal 1.....	94
	APÊNDICE B – Curva de calibração célula de carga octogonal 2.....	95
	APÊNDICE C – Análise de Variância para a interação Hastes x Velocidade (Força Horizontal média (kgf)).....	96
	APÊNDICE D – Análise de Variância para a interação Hastes x Profundidade (Força horizontal média (kgf)).....	98
	APÊNDICE E – Medições Força Horizontal para 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.....	100
	APÊNDICE F – Medições Força Vertical para 6,0 km/h e 400 mm de profundidade...101	

1 INTRODUÇÃO

O setor agrícola tem papel fundamental no desenvolvimento do Brasil, visto que em 2017 o crescimento de 1 % do PIB brasileiro foi influenciado quase que exclusivamente pela agropecuária, que teve crescimento de 13 % no ano, frente a estagnação do setor industrial e do crescimento de apenas 0,3 % no setor de serviços. O destaque no desempenho da agricultura foram as culturas de milho e soja (AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS, 2018).

Até a década de 1950 o crescimento da produção agrícola brasileira se dava, basicamente, por conta do aumento da área de terras cultivadas. Já a partir da década de 1960 o uso de máquinas passou a ter grande importância no aumento dessa produção. Porém, o processo de modernização se intensificou a partir da década de 1970, quando houve um aumento de mais de 1.000 % no número de tratores utilizados em comparação com a década de 1950. Esse número ficou mais expressivo na década de 1980, ou seja, o aumento no número de tratores em relação à década de 1950 foi de 6.512 %, segundo dados de um levantamento do IBGE (AGRA E SANTOS, 2001).

Outro avanço da modernização na mecanização agrícola brasileira, falando especificamente da região do planalto médio rio-grandense, que é onde foi instalado o experimento deste trabalho, deu-se a partir dos anos de 1970 com a introdução do sistema de plantio direto. Essa revolução no campo foi muito importante pois alavancou a produtividade das culturas da soja, milho e trigo, no entanto, trouxe consigo máquinas cada vez maiores e mais pesadas, as quais vem causando sérios problemas de compactação de solo.

O tráfego intenso das máquinas ano após ano no manejo de solos, muitas vezes com teores de umidade inadequados, somado aos altos teores de argila característicos da região do planalto médio gaúcho, somando-se ainda ao pisoteio de animais em áreas de integração agricultura/pecuária e a própria ação natural do clima, favorecem a compactação do solo tanto nas camadas superficiais quanto subsuperficiais, reduzindo seu desempenho produtivo. Essa compactação elevada causa alteração nas propriedades físicas do solo, dificultando principalmente a infiltração de água e a penetração das raízes das culturas, podendo ocasionar aumento no escoamento superficial de água e comprometer o desempenho das plantas cultivadas.

Cabe ao agricultor, portanto, intervir nesta condição de solo compactado, sendo que as técnicas mecânicas utilizadas são a subsolagem e a escarificação. Basicamente, a opção por uma ou outra depende da profundidade em que se encontra a camada compactada. Porém, por se tratarem de práticas que requerem grande demanda energética, as máquinas devem estar

bem projetadas para não agregarem um custo final de produção muito elevado ao agricultor, principalmente no quesito consumo de combustível.

Uma operação de escarificação ou de subsolagem requer uma série de cuidados para que traga benefícios ao solo ao invés de piorar a situação, pois não é uma operação tão simples como aparenta, sendo que quando mal conduzida não promove efeitos duradouros. Portanto, a pesquisa científica nesse segmento, visando buscar alternativas que otimizem as operações de mobilização de solo como um todo, sempre trará contribuições importantes para o contínuo aperfeiçoamento do setor agrícola, acarretando conseqüentemente o aumento da produtividade no campo.

Visto que a evolução no campo não pode parar, ainda há avanços a serem feitos no que se refere a descompactação de solo, tanto pela otimização dos elementos rompedores da camada compactada, que são as hastes com suas ponteiras, quanto na inserção das tecnologias da agricultura de precisão nas máquinas. Ambas as formas visam otimizar o processo de mobilização de solo compactado, diminuindo o custo da produção e aumentando a produtividade.

Tendo em vista o papel importante que a mobilização de solos compactados tem no processo produtivo das lavouras, este trabalho tem o objetivo de avaliar a demanda energética em diferentes projetos de hastes subsoladoras juntamente com suas ponteiras. Foram avaliadas e identificadas as influências destas variações geométricas das hastes/ponteiras na magnitude da força (horizontal e vertical) e potência necessária para tracioná-las. Como complemento a essa avaliação, foi feita a verificação da área de elevação de solo, que dá um indício da área de solo descompactada, ao final, foi feita uma avaliação visual do distúrbio do solo na superfície, ou seja, incorporação da matéria orgânica superficial.

1.1 Justificativa

Para romper a camada compactada de solo, que dificulta a infiltração de água e o crescimento das raízes das plantas, e que, conseqüentemente, diminui a produtividade das culturas, é necessária uma grande demanda energética, podendo impor ao agricultor um aumento considerável nos custos finais da sua produção. Portanto, um projeto de haste e ponteira bem dimensionadas, fará com que a força total de tração para movimentar os elementos rompedores de solo seja reduzida, diminuindo conseqüentemente o custo operacional no quesito consumo de combustível.

A redução da demanda energética no preparo periódico do solo também permitirá um aumento da capacidade de campo feita pelo conjunto trator-descompactador, uma vez que também contempla a possibilidade de uso de mais hastes, ou seja, um descompactador de maior porte para o mesmo conjunto tratório.

1.2 Objetivos

Tendo em vista a justificativa que impulsionou a realização deste trabalho, os objetivos que deverão ser alcançados ao término do mesmo são os que seguem.

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar experimentalmente o desempenho operacional de cinco diferentes hastes e ponteiros de um descompactador de solo, sendo um conjunto comercial e mais quatro protótipos que foram desenvolvidos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Verificar o efeito do tipo de haste/ponteira na força e potência na barra de tração;

Verificar o efeito do tipo de haste/ponteira na força vertical;

Verificar a interação haste x velocidade, haste x profundidade e haste x velocidade x profundidade.

Como complemento, verificar o efeito do tipo de haste na área de elevação de solo e no distúrbio de solo na superfície.

1.3 Conteúdo da dissertação

No CAPÍTULO 1 (Introdução), está apresentada inicialmente uma breve contextualização da dissertação, posteriormente a justificativa para a elaboração do trabalho em questão, ao final, estão apresentados os objetivos a serem alcançados ao fim da dissertação, ou seja, objetivo geral e os objetivos específicos.

No CAPÍTULO 2 (Revisão Bibliográfica), está uma revisão da literatura que abrange todos os fatores que envolvem a operação de descompactação de solo, também uma avaliação do mercado de implementos agrícolas que fazem a descompactação mecânica do solo, além de uma

breve revisão sobre sistemas de medição utilizados para coleta de informações de campo nos elementos rompedores de solo que são as hastes e ponteiras.

No CAPÍTULO 3 (Materiais e Métodos), está apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. Está caracterizada a área experimental utilizada para os experimentos de campo, as hastes e ponteiras utilizadas e o delineamento experimental, bem como os equipamentos utilizados para dar suporte ao trabalho de campo.

No CAPÍTULO 4 (Resultados e Discussão), estão apresentados os resultados dos experimentos efetuados em campo, bem como a discussão desses resultados em comparação com a literatura estudada.

No CAPÍTULO 5 (Conclusões) estão as conclusões da dissertação e as sugestões de trabalhos futuros.

No CAPÍTULO 6 (Referências Bibliográficas) é referenciada a bibliografia consultada e utilizada para a realização da dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para promover alterações num implemento agrícola que efetua a descompactação de solo é necessário compreender todo o fenómeno que cerca essa operação agrícola, desde os motivos pelo qual o solo sofre compactação, formas de efetuar sua mobilização e tipos de operação para esse tipo de preparo periódico de solo. É necessário conhecer também a interação da máquina com o solo, ou seja, efeitos da geometria das hastes e ponteiros, da profundidade e velocidade de trabalho na demanda energética e no distúrbio superficial do solo.

Também é de suma importância conhecer as características operacionais das máquinas (subsoladores e escarificadores) disponíveis no mercado brasileiro, sendo que para avaliar experimentalmente o desempenho das hastes/ponteiras se faz necessário efetuar um apanhado geral sobre transdutores de força (células de carga) e sistemas de medição.

2.1 Estado da arte, na história

Segundo Upadhyaya et al. (2009), há cerca de 3000 anos os habitantes dos vales do Eu-Phrates e do Nilo usavam arados simples em forma de cunha para o preparo do solo. Já os arados de ferro foram usados na China há mais de 2000 anos. Segundo os autores o primeiro arado de ferro fundido temperado foi patenteado em 1785 por Robert Ransome na Inglaterra. Já na década de 1830, o norte americano John Deere desenvolveu o arado de aço, semelhante ao arado de aiveca hoje conhecido.

De acordo com Lanças (2002), o interesse no projeto de equipamentos para romper as camadas compactadas do subsolo, advindas principalmente da ação de máquinas de preparo de solo como grade e enxada rotativa, teve início em meados da década de 1950 nos Estados Unidos da América. No Brasil, os primeiros trabalhos de descompactação mecânica do solo foram relatados no final da década de 1970.

Em 1982 durante a FIMA 82 em Zaragoza na Espanha, foi apresentado o subsolador Paraplow 1000 da empresa Howard Rotavator. Segundo Pidgeon (1983), este inovador implemento de preparo de solo foi desenvolvido na Inglaterra numa cooperação entre indústria privada e universidade.

Segundo Freitas (2014), o Paraplow, um descompactador de solo com inclinação lateral na haste, foi desenvolvido no Reino Unido pela empresa Howard, tendo a função de descompactar camadas de solo adensadas. Por ser um implemento de haste de pequena

espessura, difere-se consideravelmente dos subsoladores e escarificadores existentes no mercado agrícola.

Assim como a subsolagem foi introduzida para resolver um problema específico, outro equipamento semelhante ao subsolador passou a ser utilizado mais recentemente pelos agricultores: é o escarificador. Possui o mesmo princípio de rompimento do solo que o subsolador, ou seja, pela propagação de trincas. O solo, portanto, não é cortado como na aração ou gradagem e sim rompido em suas linhas de fratura naturais ou através da interface de seus agregados (LANÇAS, 2002).

O escarificador Fox, lançado em 2009, foi resultado de pesquisas realizadas pela empresa Stara S/A e o projeto Aquarius. As pesquisas concluíram que um dos fatores limitantes de produtividade é a compactação do solo, pois dificulta a penetração da água das chuvas e absorção de nutrientes, fatores que afetam negativamente a germinação e o desenvolvimento radicular das plantas. A partir do resultado dos estudos, foi desenvolvido um implemento que descompactasse o solo, ao mesmo tempo que preservasse a maior quantidade possível da palhada na superfície (STARA S/A, 2018).

2.2 Compactação do solo

A compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas tem sido uma preocupação desde o início da mecanização na agricultura brasileira, sendo um dos fatores que mais influencia a sustentabilidade dos solos agrícolas, em virtude das modificações ocasionadas em algumas propriedades físicas do solo (RICHART et al., 2005).

A compactação do solo é um problema antigo e intensificou-se com a modernização da agricultura, principalmente pelo uso de máquinas cada vez maiores e mais pesadas. No plantio convencional, a camada de solo compactada era rompida pelos implementos de preparo do solo, transferindo a compactação para maiores profundidades pelo tráfego e contato dos implementos com o solo subsuperficial. Já no sistema plantio direto ou em pastagens, como não há revolvimento, a compactação do solo fica mais restrita à sua superfície (REICHERT, et al., 2007).

Para Klein (1990), os solos do sul do Brasil foram explorados a partir da década de 1950, basicamente com culturas de inverno como o trigo, sendo que a partir da década de 1960 com a inserção da soja o solo passou a ser cultivado duas vezes ao ano. Segundo o autor, com a crise energética mundial, no início da década de 1970, as indústrias colocaram no mercado implementos leves e de alta performance, como arados e grades, implementos prejudiciais à

estrutura do solo. Este preparo intensivo e inadequado trouxe problemas sérios à conservação do solo, pois, com o preparo passando a ser superficial o solo degradou muito rapidamente, perdendo a estrutura original.

A transferência do peso das máquinas para o solo causará uma modificação na sua estrutura física, influenciará o fluxo de gases e afetará a presença da água, causando uma alteração na dinâmica de absorção de nutrientes, reduzindo o desenvolvimento do sistema radicular da cultura e afetando negativamente a produtividade, especialmente em anos com déficit hídrico (GIRARDELLO et al., 2014).

As modificações de importância agronômica que ocorrem em solos compactados são influenciadas por alguns fatores tais como: o aumento da resistência mecânica à penetração radicular, redução da aeração, alteração do fluxo de água e calor e da disponibilidade de água e nutrientes. Sendo que num determinado tempo e local, um desses fatores pode tornar restrito o desenvolvimento das plantas, dependendo do tipo de solo, da condição climática, da espécie e do estágio de desenvolvimento da planta (CAMARGO & ALLEONI, 2006).

Fernandes (2015) afirma que a compactação resultante do tráfego de máquinas é induzida pelo teor de água do solo, o teor de matéria orgânica, o tipo de solo, o peso total da máquina, juntamente com a intensidade com que acontece o trânsito no solo.

Segundo Raper (2005), a compactação do solo no campo, resultante do tráfego de veículos pode não ser completamente eliminada, mas pode ser controlada e reduzida através do gerenciamento inteligente do tráfego.

Navarini (2010), cita que o problema da compactação subsuperficial do solo já existe desde a época em que eram realizadas mobilizações intensas por diversos implementos, como, grades e arados, sendo que o agravamento do problema de compactação ocorreu com a adoção do sistema plantio direto em função do não revolvimento.

Segundo Weill (2015), uma camada compactada rasa se dá em menos de 40 cm de profundidade e uma camada compactada profunda atinge profundidades maiores que 40 cm.

O aumento de tamanho e de peso dos tratores se faz necessário para manter a relação entre o peso/potência adequado para suprir a necessidade de tração de equipamentos cada vez maiores, como semeadoras, carretas agrícolas graneleiras, descompactadores e distribuidores. Porém, quando o tráfego destas máquinas é realizado em solos com condições de umidade acima da ideal, ocorre a compactação do solo, que ocasiona a redução na infiltração de água e da produtividade das culturas (GIRARDELLO et al., 2013).

Segundo Klein (2014), a textura do solo é uma característica que representa as proporções relativas das frações de areia, silte e argila, propriedades estas que não podem ser

alteradas pois são inerentes ao solo. Segundo o autor, solos com teor de argila intermediário, em razão das suas propriedades químicas e físicas, são melhores para os fins agrícolas, sendo que a distribuição do tamanho das partículas do solo interfere diretamente no grau de compactação.

Segundo Reinert e Reichert (2006), solos arenosos são mais resistentes à compactação, porém possuem baixa capacidade de retenção de água, enquanto os solos argilosos têm o efeito contrário, ou seja, tem alta capacidade de retenção de água e maior susceptibilidade à compactação.

Para Lanças (2002), a utilização de máquinas tais como o arado, grade e enxada rotativa resolvem o problema da compactação do solo nas camadas superficiais. Porém na maioria dos casos a transfere para camadas mais profundas. O autor ainda afirma que a utilização dessas máquinas, quase sempre à mesma profundidade de preparo do solo e por diversos anos consecutivos, tem contribuído para o surgimento das camadas compactadas logo abaixo da linha de ação dos órgãos ativos das mesmas, sendo denominada de compactação subsuperficial (conhecida também como soleira, pé de arado ou pé de grade).

Quando a compactação for impeditiva para o crescimento das raízes, há a necessidade de romper essas camadas, sendo que esse rompimento é realizado por implementos conhecidos como escarificadores ou subsoladores. Porém, como esse sistema de preparo realiza a mobilização a grandes profundidades e certamente em um solo com elevada resistência ao rompimento, requer um alto consumo de combustível e potência para sua execução, elevando assim a demanda energética do sistema (RIQUETTI et al., 2012).

2.2.1 Resistência do solo a penetração

Para Lanças (2002), os métodos para avaliar a camada compactada de solo podem ser divididos em três grupos: Métodos visuais (sulcos de erosão, raízes com má formação, falhas de germinação); Métodos precisos (densidade do solo, porcentagem de macroporos, condutividade hidráulica saturada); Métodos intermediários (avaliação da resistência do solo à penetração utilizando penetrômetro).

Segundo Macedo et al. (2016), o método mais preciso para verificar a compactação do solo é através da avaliação laboratorial da densidade, visto que a coleta das amostras à campo devem ser feitas em diferentes profundidades, principalmente nas que iram atuar o sistema radicular das plantas.

Devido a facilidade de operação, o método mais utilizado para verificar a profundidade da camada compactada do solo é o índice de cone. Este termo é definido como a força necessária para inserir um cone padrão no solo, sendo que quando os valores de índice de cone se aproximam de 1,5 - 2,0 MPa o crescimento das raízes torna-se limitado e as plantas podem começar a sofrer os efeitos negativos da compactação do solo (RAPER, 2005).

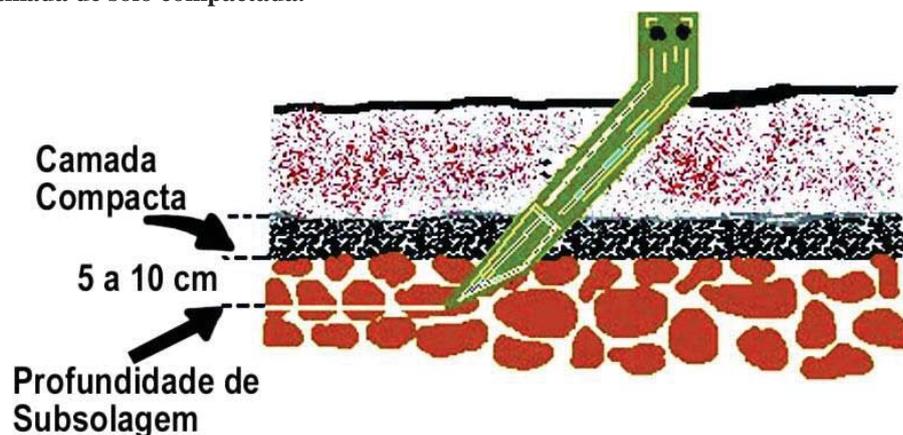
No caso do penetrômetro, a avaliação da resistência do solo à penetração é realizada pelo índice de cone (IC), definido como sendo a resistência do solo à penetração de uma ponta cônica, sendo expressa como a força por unidade de área da base do cone. As partes constituintes da ponteira cônica que penetra o solo seguem a padronização descrita pela norma ASAE S313.1, com uma área de projeção do cone de 130 mm² e ângulo de 30° (CARBONERA, 2007).

Segundo Klein (2014), a resistência à penetração é obtida pelo quociente da força aplicada ao cone pela área da base do cone, sendo que a unidade usual de pressão para determinação da resistência à penetração é o MPa. No passado utilizava-se o “índice de cone”, cujo significado é o mesmo.

Porém, os penetrômetros utilizados no campo apresentam problemas operacionais, segundo Klein (2014) esses equipamentos não permitem a obtenção da resistência em condições de baixos conteúdos de água no solo, em razão da dificuldade para a penetração.

Na Figura 1 pode ser visto que a camada compactada subsuperficial se encontra a uma determinada distância da superfície, sendo que através da inserção do penetrômetro é possível verificar a profundidade desta camada e seu nível de compactação, sendo possível adequar a profundidade de atuação do órgão ativo do implemento agrícola responsável pela descompactação desse solo, ou seja, a haste/ponteira do subsolador/escarificador.

Figura 1 - Camada de solo compactada.



Fonte: Lanças (2002).

Segundo Silva et al. (2015), no que diz respeito à compactação do solo, o monitoramento da resistência mecânica à penetração ao longo do perfil do solo é de suma importância, pois permite localizar a camada compactada, e assim tomar a decisão mais correta sobre qual equipamento utilizar no momento do preparo. Na ocorrência de camadas compactadas, uma boa solução para a sua descompactação é o uso de implementos de hastes, tais como os escarificadores e subsoladores.

Segundo Klein et al. (2009), a avaliação da qualidade física do solo agrícola tem conquistado cada vez mais importância, sendo que as opções que aparecem para tal avaliação é a resistência mecânica do solo à penetração, o intervalo hídrico ótimo e a densidade relativa.

Segundo Macedo et al. (2016), o penetrômetro não mede a compactação do solo diretamente e sim a resistência a penetração ao qual o solo em questão submete qualquer corpo que queira perfurá-lo. O funcionamento do penetrômetro consiste em uma haste perfurando o solo a uma velocidade constante, sendo que a resistência que o solo induz a sua penetração em diferentes profundidades é registrada em forma de pressão no visor do aparelho. Portanto, o penetrômetro mede indiretamente a compactação porque não possui um valor de resistência a penetração associado a compactação, existem valores que se pode dizer que o sistema radicular começa a encontrar dificuldade em penetrar, que são entre 2,0 e 3,0 Mpa.

Porém, a utilização dos dados de resistência do solo à penetração como dados absolutos devem ter os devidos cuidados, ou seja, segundo Klein et al. (1998), a resistência à penetração é altamente influenciada pela condição de umidade do solo, portanto a determinação da resistência do solo à penetração apenas quando o solo encontra-se próximo à capacidade de campo não é recomendável, uma vez que grandes variações de densidade poderão não ser detectadas.

Portanto, é importante que a determinação da resistência à penetração seja feita juntamente com o controle ou a determinação da umidade do solo, uma vez que existe uma dependência da resistência à penetração em função da umidade e da densidade. Em densidade do solo baixa, o efeito da umidade é pequeno, todavia, quando a densidade do solo aumenta pequenas variações de umidade acarretam um grande incremento na resistência (KLEIN, 2014). Sabe-se ainda que existe uma elevada variabilidade espacial da umidade do solo, o que reforça a necessidade da determinação da umidade nas distintas profundidades no momento da determinação da resistência do solo à penetração.

Ao avaliar o efeito do tráfego de máquinas sobre a compactação do solo, o intervalo hídrico ótimo e suas relações com a produtividade de cultivares de soja durante dois anos, em

Latossolo Vermelho, Beutler et al. (2008) concluíram que o tráfego de máquinas compactou o solo e reduziu a produtividade de soja, isso a partir da resistência à penetração de 1,64 a 2,35 MPa e da densidade do solo de 1,50 a 1,53 Mg/m³.

Em sua pesquisa sobre o efeito da compactação na cultura do milho, Freddi et al. (2007) verificaram que o tráfego de tratores sobre o solo provocou maiores níveis de compactação na camada superficial. O diâmetro radicular e a massa seca das raízes aumentaram linearmente com o aumento da resistência à penetração do solo. Verificou-se que valores de resistência à penetração variando entre 1,03 e 5,69 MPa provocaram alterações na morfologia do sistema radicular do milho, reduzindo a produtividade da cultura em 2,581 Mg/ha, mas não foram impeditivos ao enraizamento.

2.2.2 Efeitos da umidade na compactação do solo

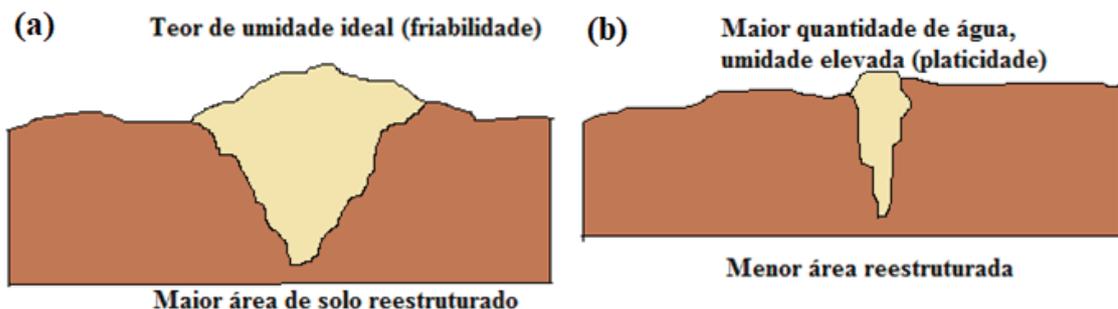
Conforme Camargo e Alleoni (2006), a umidade é o mais importante atributo a ser levado em conta ao se tratar de compactação do solo, portanto é melhor operar em solos com umidade adequada (sempre mais secos do que úmidos), pois nestas condições a resistência à compactação devido ao tráfego de máquinas é maior.

Para Macedo et al. (2016), quando se efetua a descompactação do solo em condição de excesso de água, esta atua como lubrificante evitando que a ponteira atinja zonas de fratura do solo, tendo uma menor área de descompactação.

Portanto, para o manejo do solo, a condição da umidade é muito importante, uma vez que os efeitos sobre a estrutura são dependentes dessa condição. Logo, a condição de umidade no qual o solo pode ser trabalhado é a friável. (KLEIN, 2014).

A Figura 2 deixa claro a influência da umidade na eficiência da descompactação do solo, trabalhando na condição ideal de friabilidade (Fig. 2a) e com excesso de umidade (Fig. 2b).

Figura 2 - Influência do teor de umidade.



Fonte: Macedo et al. (2016).

Para Macedo et al. (2016), para verificar se o solo se encontra na condição de friabilidade, basta pegar uma porção de solo e tentar moldá-la, se essa porção for moldada facilmente e se desfizer facilmente, esse solo encontra-se na friabilidade. Ainda segundo Macedo et al. (2016), quando se trabalha em condição de umidade muito baixa (Figura 3), a descompactação deixará muitos torrões e será necessária uma potência tratorária maior.

Figura 3 - Formação de torrões.



Fonte: Macedo et al. (2016).

Sasaki et al. (2005), avaliando o desempenho operacional de um subsolador com haste parabólica em três Latossolos com diferentes teores de água, concluíram que quanto menor é o teor de água no solo, maior é o volume de solo mobilizado. Isto pode ser explicado devido ao efeito lubrificante da água, o qual é reduzido quando o solo está mais seco.

Raper e Sharma (2002) verificaram que a umidade do solo influenciava significativamente o desempenho da subsolagem. Concluíram que, nos solos mais secos as forças de tração eram muito maiores que nas demais umidades. Do mesmo modo o padrão de rompimento de solo era muito irregular, com formação de torrões, quando o solo estava muito seco. Isto evidencia que há uma umidade ideal para que a subsolagem tenha uma performance adequada.

2.3 Mobilização do solo

Várias operações agrícolas realizadas no campo apresentam algum tipo de atividade mecanizada com o intuito de buscar melhores resultados de eficiência operacional e retorno econômico ao produtor rural (MONTANHA, 2013).

Dentre as mudanças ocorridas no manejo de sistemas agrícolas produtivos, a mais impactante no quesito conservação de solo foi o crescente abandono das práticas de intensa

mobilização, sendo que sucessivos procedimentos de arações e gradagens foram substituídos por uma ampla e crescente adoção do plantio direto (DENARDIN et al., 2014).

Segundo Navarini (2010), proporcionar condições favoráveis para o crescimento do sistema radicular das plantas é o objetivo de todo o manejo do solo.

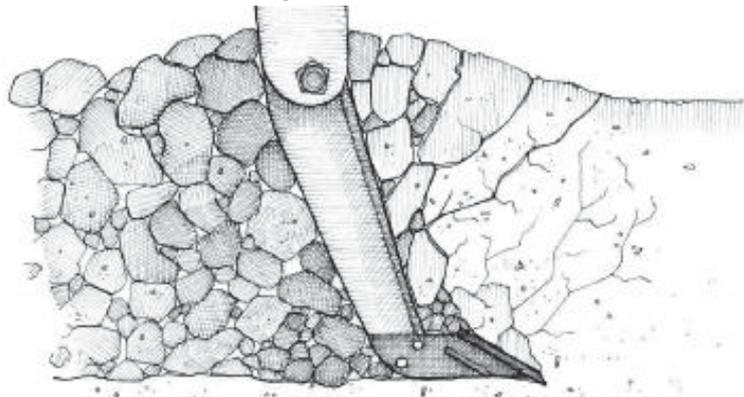
Segundo Bottega et al. (2011), em um sistema produtivo, deve-se dar a devida atenção às características físicas do solo, tais como porosidade, agregação, resistência à penetração e densidade, sendo que as condições físicas em que o solo se encontra durante a fase de implantação e desenvolvimento de uma determinada cultura influenciará consideravelmente em sua produtividade. Portanto, uma das formas de alterar a condição física do solo é através de seu manejo, buscando criar condições estruturais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento da planta.

A ausência de revolvimento do solo, decorrente da prática do sistema de plantio direto associada à maior intensidade de uso da terra, expõe o solo a intenso tráfego de máquinas, que operado em condições inadequadas de umidade contribui para alterar a qualidade estrutural do solo, o que acarreta aumento da compactação em muitas áreas manejadas sob o sistema de plantio direto (COLLARES et al., 2006).

Os implementos de hastes aparecem no cenário agrícola como uma boa opção para o agricultor dentro do conceito do manejo conservacionista, sendo que eles têm como vantagem mobilizar o solo sem revolvê-lo, conseguindo romper as camadas compactadas do solo e atingir profundidades de trabalho maiores, quando comparado com outros implementos de preparo primário (SANTOS, et al., 2011).

Segundo Weill (2015), o desprendimento do solo pode ser obtido através do distúrbio frágil ou distúrbio de tensão. Para que o solo frature de maneira frágil é necessário que o mesmo esteja suficientemente seco. Na Figura 4 ilustra-se o modo de fratura frágil do solo.

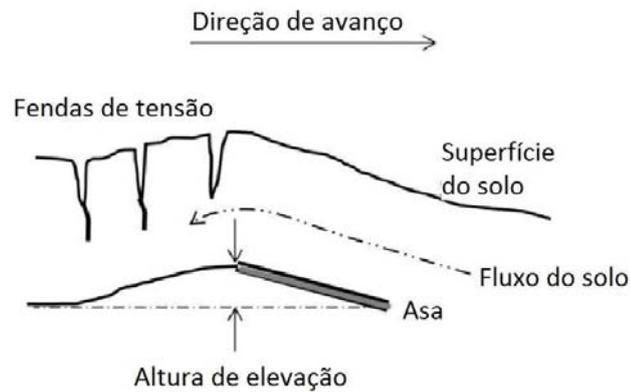
Figura 4 – Rompimento do solo de modo frágil.



Fonte: Weill (2015).

A Figura 5 apresenta o modo de fratura por distúrbio de tensão, onde toda massa de solo é elevada, e caso as ponteiros das hastes estejam equipadas com asas essa massa é quebrada à medida que se inclina sobre o topo dela antes de ser derrubada.

Figura 5 – Rompimento do solo de através do distúrbio de tensão.



Fonte: Adaptado de Weill (2015).

Geralmente o grau de desprendimento é maior se o solo é submetido ao distúrbio frágil. Porém, ainda segundo Weill (2015), a geometria da zona de solo desprendida é influenciada pela textura do solo e seu grau de compactação, visto que o solo sempre se deforma junto ao plano de menor resistência. Portanto, vários fatores devem ser levados em consideração para uma descompactação de solo adequada.

Segundo Filho et al. (2008), o aumento da área de elevação do solo provoca maior índice de rugosidade do solo oferecendo melhores condições do mesmo no quesito conservacionista, porém quanto maior o índice de rugosidade, maior a dificuldade de plantio e colheita. Os autores avaliaram a mobilização de um Latossolo Vermelho em função de sistemas de preparo de solo utilizando, escarificador, arado de discos, grade aradora e arado de aivecas, concluindo que o escarificador e o arado de discos promoveram a maior área de elevação, porém o maior empolamento foi verificado na grade aradora, equipamento que promove maior fragmentação do solo.

Ewen (2015) apresenta um estudo onde foi empregado o subsolador Paraplow para melhorar as condições do solo para o crescimento vegetativo das culturas agrícolas, sendo que através da redução da densidade do solo com sua mobilização se aumenta a capacidade de infiltração de água. Obteve-se potenciais benefícios em relação a uma melhor aeração e desenvolvimento radicular da cultura de trigo. Entretanto a resposta em termos de produtividade não foi significativa, ficando em média cerca de 5 % melhor que a testemunha não subsolada.

A expansão volumétrica do solo, também conhecida como empolamento, é dada pela relação entre a área de solo elevada pela área de solo descompactada, sendo que área descompactada consiste naquela situada entre o perfil original e o perfil de fundo do sulco, enquanto que a área de elevação é aquela situada entre o perfil da superfície após a descompactação e o perfil original. Logo, o empolamento causará redução da densidade do solo, sendo que tal fenômeno gerará benefícios no momento da semeadura, no entanto, ao se tornar muito desagregado o solo estará sujeito a erosão caso ocorram chuvas fortes e constantes (FILHO et al., 2008).

Ao avaliar a manutenção de cobertura vegetal no sistema de plantio direto sob escarificação mecânica, Tabaldi et al. (2009) utilizaram o escarificador FOX com taxa fixa (escarifica) e taxa variável (não escarifica), escarificador convencional e área sem escarificação como testemunha. Os resultados mostraram que o escarificador FOX com taxa fixa manteve 72 % da cobertura vegetal, o equipamento FOX taxa variável 70 % e o escarificador convencional cerca de 26 %, considerando 100 % de cobertura vegetal para a área sem escarificação.

2.4 Subsolação x Escarificação

A escarificação e a subsolação melhoram a condição estrutural do solo, fruto da mínima mobilização e manutenção da cobertura vegetal, o que faz amenizar a variação de temperatura do solo repercutindo na atividade microbiana, favorecendo também a redução da erosão, ocasionada pela redução da fragmentação do solo (SANTOS et al., 2011).

De acordo com Gamero (2008), a partir da necessidade de descompactação do solo, alguns agricultores ainda que esporadicamente, utilizam a mobilização do solo através de escarificadores e subsoladores visando corrigir essa limitação. A vantagem da utilização destes implementos, comparados ao uso do arado ou grade, está no fato destes não promoverem uma inversão de camadas, obtendo-se uma menor alteração da estrutura do solo.

Ao escolher o tipo de subsolador deve-se considerar os objetivos da operação e as características da lavoura, ou seja, o grau de distúrbio da superfície do solo que pode ser tolerado, o grau desejado de desprendimento de solo dentro do perfil, a gravidade de compactação e a profundidade da zona compactada (WEILL, 2015).

Segundo Weill (2015), é muito importante considerar a profundidade de compactação para a subsolação. Quando a compactação é profunda, nem sempre é possível realizar a subsolação em toda a profundidade da camada compactada.

Para Lanças (2002), a primeira consideração a fazer antes de se optar pela subsolagem de uma área agrícola, é que esta é uma operação de alto consumo energético, provavelmente o maior dentre as operações agrícolas. Para o autor, somente devem ser mobilizados os solos que realmente necessitem desse trabalho, sendo que a profundidade de subsolagem deve ser compatível com a faixa compactada do solo.

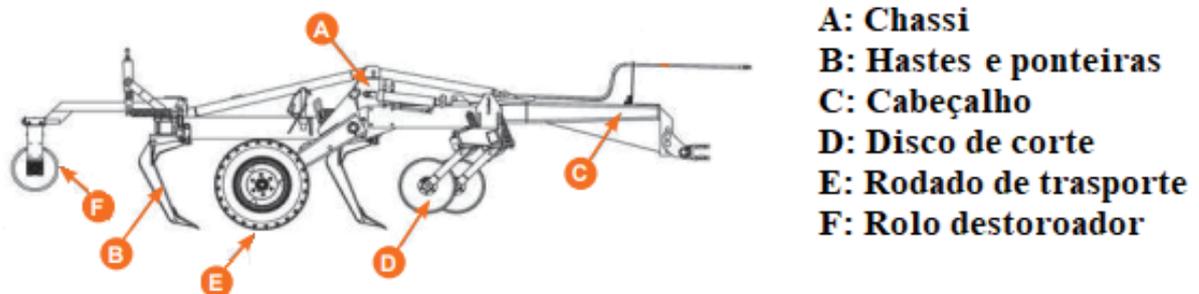
Segundo Grotta et al. (2004), o subsolador é um dos principais equipamentos utilizados com a finalidade de eliminar ou de minimizar os efeitos negativos induzidos pela compactação do solo, aumentando a profundidade útil do solo e rompendo a camada endurecida, que por ventura possa aparecer com o uso contínuo dos equipamentos tradicionais de preparo de solo.

A forma de descompactação de solo mais comum no meio agrícola é através da subsolagem, sendo que com a evolução da eletrônica embarcada tem-se a possibilidade de variar a profundidade do subsolador e realizar a descompactação de modo otimizado (MACHADO et al. 2015).

Geralmente, um subsolador pode ser tracionado pelo trator pela barra de tração quando possui sistema de transporte próprio, ou montado no sistema de engate três pontos quando é um implemento de pequeno porte. Já os escarificadores, por serem máquinas maiores que os subsoladores e por possuírem sistema de transporte próprio, geralmente são acoplados a barra de tração do trator.

Na Figura 6 podem ser vistas as principais partes que constituem um subsolador ou escarificador, sendo esta a configuração mais comum no mercado, ou seja, acoplados na barra de tração do trator.

Figura 6 - Partes de um subsolador/escarificador de arrasto.



Fonte: Stara S/A (2018).

O implemento agrícola é composto pelo chassi A onde são montadas as hastes B com sua ponteira na extremidade inferior, o cabeçalho C faz a ligação do chassi do implemento ao trator, já os discos de corte D são responsáveis por fazer o corte da matéria orgânica à frente

das hastes para evitar embuchamento. O rolo destorroador F é responsável por desmanchar os torrões maiores que possam se formar, sendo que discos de corte e rolo destorroador são opcionais da máquina, ou seja, não necessariamente eles devam estar presentes nela. O sistema de transporte E é responsável pela regulagem da profundidade de trabalho das hastes e pelo transporte do implemento.

Existem diversos fabricantes de subsoladores no Brasil, sendo que alguns deles estão com suas máquinas no mercado já há algumas décadas. Na Figura 7 pode ser visto um exemplo de subsolador do mercado.

Figura 7 - Subsolador.



Fonte: GTS do Brasil (2017).

De acordo com Michalson et al. (1998), o resultado do desenvolvimento do subsolador Paraplow fabricado na Inglaterra na década de 1980 pela Howard Rotavator, foi uma haste com “perna-inclinada”, a qual deveria levantar e quebrar o solo de profundidades de trabalho consideráveis, causando uma perturbação mínima na superfície do solo, bem como um mínimo distúrbio dos resíduos presentes na superfície.

Na Figura 8 pode ser visto o Paraplow da Howard com suas hastes com inclinação lateral. Nota-se que este subsolador também possui discos de corte à frente da haste, porém não possui rolo destorroador, sendo que seu sistema de montagem no trator é nos três pontos.

Figura 8 - Paraplow 1000 da Howard.



Fonte: Sprzedajemy (2018).

Apesar de serem mais recentes no mercado agrícola, os escarificadores são fabricados por diversas indústrias no Brasil, na Figura 9 pode ser visto um exemplo de escarificador típico. Essas máquinas são utilizadas principalmente para o preparo de solo no sistema de plantio direto, ou seja, descompactar camadas de solo rasas mantendo considerável porcentagem da cobertura vegetal.

Figura 9 - Escarificador.



Fonte: Stara S/A (2018).

O escarificador é semelhante ao subsolador, possuindo discos de corte de palhada à frente das hastes e rolo destorroador atrás delas. O modelo apresentado na Figura 9 também possui sistema de transporte de arrasto, ou seja, acoplado na barra de tração do trator, e possui ainda rodado de transporte.

Silva et al. (2015) concluíram que a escarificação é a prática pela qual se rompe camadas adensadas e/ou compactadas formadas no interior do solo causada pelo tráfego intenso de máquinas, pisoteio animal e operações de preparo do solo com uso de arados e grades, atuando em menor profundidade (até 30 cm).

Para Lanças (2002), os subsoladores trabalham a profundidades maiores que 400 mm, enquanto os escarificadores trabalham até 350 mm de profundidade. A profundidade de trabalho de um subsolador para soqueira de cana de açúcar pode chegar a 600 mm.

Segundo Lanças (2002), em termos didáticos, escarificador e subsolador podem ser definidos como na Tabela 1.

Tabela 1 - Diferenças entre escarificador e subsolador.

Característica	Subsolador	Escarificador
Profundidade de trabalho	Maior que 40 cm	Até 35 cm
Número de hastes	Até 7	Maior que 5
Espaçamento das hastes	Maior do que 50 cm	Até 50 cm
Função	Rompimento de camadas compactadas subsuperficial	Preparo do solo e rompimento de camadas compactadas superficial

Fonte: Lanças (2002).

Como na atualidade existem uma grande gama de tratores de alta potência, acima de 300 CV, existem subsoladores com mais de 7 hastes e escarificadores com quase 20 hastes, porém a lógica da Tabela 1 continua, ou seja, um escarificador possui mais hastes que um subsolador por necessitar de menor potência para o trabalho, uma vez que trabalha em profundidades menores.

Para Raper et al. (2005), se a operação de subsolagem for feita muito abaixo da camada compactada ocorre o desperdício de energia, todavia se a subsolagem for feita acima da camada compactada também se dá o desperdício de energia pois a operação é ineficaz por não resolver o problema da descompactação, sendo que para resolver essa questão, tecnologias estão disponíveis permitindo que a subsolagem seja realizada na profundidade específica da camada compactada, é a subsolagem sítio-específico. Porém, deve ser tomada a devida atenção ao se tratar de subsolagem a profundidade variável.

Para Girardello et al. (2013), a escarificação mecânica deve ser utilizada preferencialmente em casos severos de compactação, e mesmo assim de forma esporádica, pois esta operação tem elevado consumo de tempo e de combustível e ainda elevada demanda de potência e de mão de obra, sendo que seus resultados na melhoria dos atributos físicos do solo são de curta duração, notadamente em solos argilosos, e em muitos casos não se refletem no aumento da produtividade das culturas.

Ao avaliar a influência da intervenção mecânica em solo manejado sob sistema de plantio direto mediante a prática de escarificação ou aração, Drescher et al. (2012), concluíram que esta intervenção mecânica apresenta potencial temporário para suavizar a compactação e promover a melhoria da estrutura do solo, com efeito residual de até dois anos e meio para a resistência do solo à penetração.

Avaliando a influência da operação da escarificação ao longo do tempo sobre a estrutura de um solo em plantio direto, Mahl et al. (2008) concluíram que quatro meses após a escarificação a resistência do solo a penetração continuava reduzida em comparação ao solo sob plantio direto sem escarificação até a profundidade de 0,30 m, ou seja, até a profundidade de atuação das hastes. Entretanto, após dezoito meses os efeitos benéficos da escarificação foram observados apenas nas camadas de 0,05 e 0,10 m.

Ao avaliar a escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água, Camara e Klein (2005), concluíram que escarificação do solo realizada em plantio direto reduziu a densidade e aumentou a rugosidade superficial, a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água no solo, porém o solo sob plantio direto escarificado transcorridos

seis meses após a escarificação, apresentou níveis semelhantes de restos culturais na superfície que o plantio direto sem escarificação.

Nunes et al. (2014) avaliaram a persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de um Nitossolo Vermelho sob manejo de plantio direto na cultura do milho. Eles concluíram que a escarificação não aumentou a produtividade de grãos e os seus efeitos sobre a estrutura do solo não persistem por mais de dezoito meses.

Para Silva et al. (2012), apesar da escarificação ter sido utilizada para amenizar os efeitos da compactação em solos manejados sob sistema de plantio direto, ainda não está clara a duração dos seus efeitos sobre as propriedades físicas do solo. Os autores avaliaram durante um ano o comportamento da densidade do solo e do grau de compactação em profundidade após a escarificação de um Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto. Eles concluíram que os efeitos da escarificação apresentaram duração inferior a um ano, porém, possíveis efeitos benéficos da escarificação na redução da densidade do solo em superfície, em curto prazo, acarretam no aumento dos riscos de compactação do solo em profundidade. Todavia, isso tudo vai depender do manejo pós escarificação.

2.5 Formas geométricas da haste

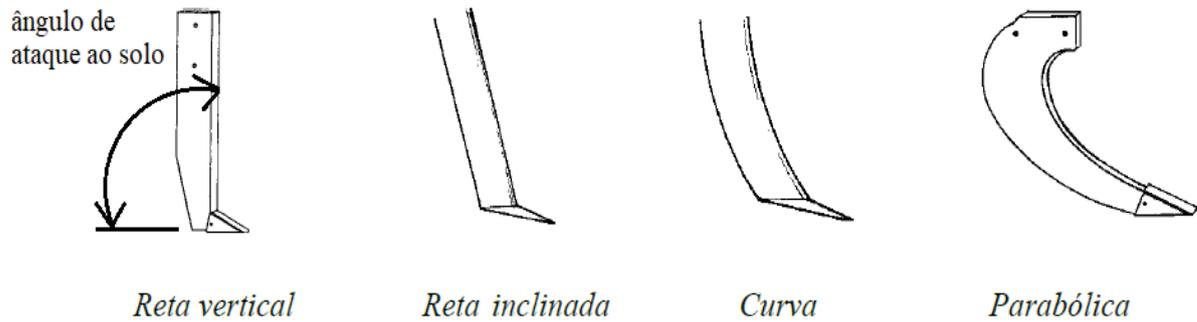
As hastes dos subsoladores são compridas e estreitas e provocam um rompimento de solo tridimensional, para cima, para frente e para os lados.

Segundo Kees (2008), as hastes possuem espessura variando de $\frac{3}{4}$ " a $1\frac{1}{2}$ ", de modo que as hastes devem ser projetadas para suportar impactos de pedras, raízes grandes ou solos muito compactados.

Para Portella et al. (1994), a geometria da haste é importante devido a influência sofrida pela distribuição de tensão no solo, podendo determinar se a haste vai atuar como uma faca que desliza através do solo sem erguê-lo para a superfície, ou se criará torrões de solo que aparecem na superfície rompida.

Para Silva et al. (2015), a haste constitui-se de uma barra de aço plana, com espessura entre 1 e 2 polegadas, equipadas com molas tensoras ou dispositivos de segurança que se rompem com sobrecarga, sendo fixadas por meio de sistemas deslizantes, permitindo regulagem variável do espaçamento entre as mesmas. Segundo os autores as hastes podem ter os seguintes formatos: Reta vertical, que faz com o solo um ângulo de 90° ; Reta inclinada que faz com o solo um ângulo de 30 , 45 ou 60° ou Curva e Parabólica, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Formas geométricas de hastes mais comuns.



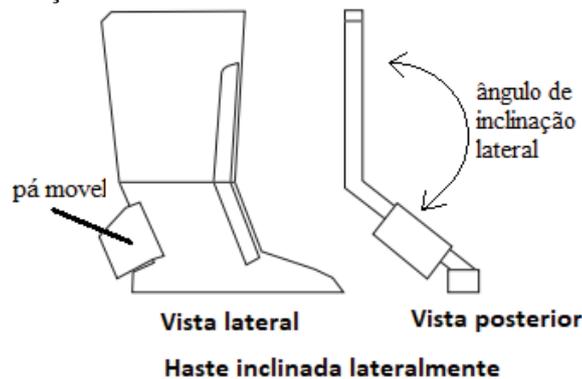
Fonte: Silva et al. (2015).

Ainda segundo os autores, a exigência da demanda de potência do trator por haste diminui na sequência da esquerda para a direita.

As hastes podem ter uma aresta cortante à frente em forma de cunha ou até uma faca frontal postiça em forma de cunha, sendo que a inserção de um chanfro à frente da haste em forma de cunha reduz o distúrbio superficial do solo em comparação a hastes com a parte frontal reta (BARR et al., 2016).

Hastes deslocadas lateralmente, tais como aquelas encontradas em subsoladores Paraplow, têm uma curvatura para o lado como visto na Figura 11, com ângulo de inclinação em torno de 45°. Essas hastes podem possuir ainda uma pá traseira móvel que pode aumentar o distúrbio do solo, dependendo de sua regulação.

Figura 11 – Haste com inclinação lateral.



Fonte: Kees (2008).

Segundo Weill (2015), hastes inclinadas para as laterais minimizam o distúrbio da superfície do solo e requerem um pouco menos de potência que os outros tipos de hastes.

Para Kees (2008), hastes com inclinação lateral como as encontradas nas máquinas Paratill da empresa Bigham Brothers dos EUA, perturbam menos a cobertura vegetal do solo se comparadas com as hastes sem inclinação lateral.

Segundo Freitas (2014), as hastes inclinadas do Paraplow produzem um ângulo dianteiro e lateral de 45° de inclinação, fazendo com que o solo seja levantado conforme movimento de translação, sendo que existe um fluxo sobre as hastes nas laterais onde as componentes de força fazem ocorrer a descompactação ao longo de rupturas naturais resultantes da tensão do corte.

Ao estudar haste reta inclinada e haste parabólica em diferentes tipos de solo, Sasaki et al. (2005), concluíram que não houve diferença entre os dois tipos de haste quanto à demanda de força e potência na barra de tração, sendo que os parâmetros velocidade, patinagem, resistência específica operacional, capacidade efetiva de trabalho não apresentaram diferenças quanto ao tipo de haste subsoladora usada.

Em sua pesquisa Barr et al. (2016) concluíram que hastes com inclinação lateral de 45° , com a parte inclinada ultrapassando a borda da superfície do solo, minimizam a perturbação superficial quando comparadas com hastes retas.

Hastes verticais retas com ângulo de inclinação de 90° minimizam o distúrbio do solo à frente da sua passada, sendo que há pouca tendência em elevar o solo, porém descobriu-se que essas hastes requerem mais potência que outros tipos de hastes, como a curva ou inclinada, mas quando elas são levemente inclinadas para trás, ou seja, ângulo de inclinação menor que 90° , há pouca diferença no requerimento de energia (RAPER E SHARMA, 2002).

As hastes dos subsoladores e escarificadores possuem sistema de desarme automático individual, como visto na Figura 12. O sistema é dotado de molas que absorvem uma determinada carga e, após romper esse limite, fazem a haste “desnucar” para trás protegendo o sistema contra possíveis danos. Após o desarme a máquina deve ser retirada do solo e com uma marcha ré a mesma acopla o sistema novamente.

Figura 12 - Desarme automático.



Fonte: Stara S/A (2018).

2.6 Geometria da ponteira da haste

Ponteiras são elementos montados na extremidade inferior da haste. Elas são intercambiáveis devido ao alto desgaste que sofrem devido ao atrito com o solo. Existem

diversos formatos de ponteira, que podem ser estreitas ou aladas. Na Figura 13 está uma haste com ponteira sem asas (a) e uma haste com ponteira alada (b).

Figura 13 – Haste com ponteira sem asa e com asa.



(a) Ponteira sem asa

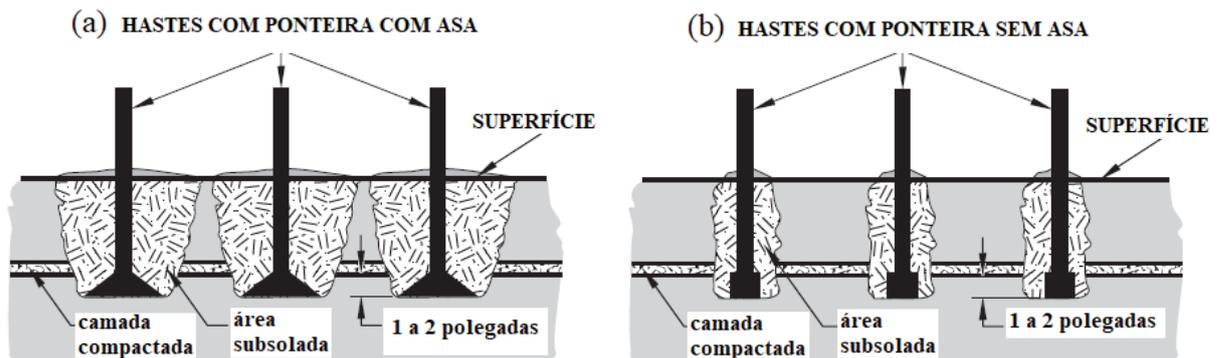


(b) Ponteira com asa (alada)

Fonte: Stara (2018); Great Plains Manufacturing (2018).

Segundo Kees (2008), as hastes com ponteiros com asa apesar de requererem mais potência para serem tracionadas (de 25 a 55 %), mobilizam mais área de solo, sendo que tal fato pode ser visualizado na Figura 14, onde está um esquema representativo da descompactação de solo pelos dois tipos de ponteira, (a) com asa e (b) sem asa.

Figura 14 – Área de solo descompactada pelos tipos de ponteira: com e sem asas.



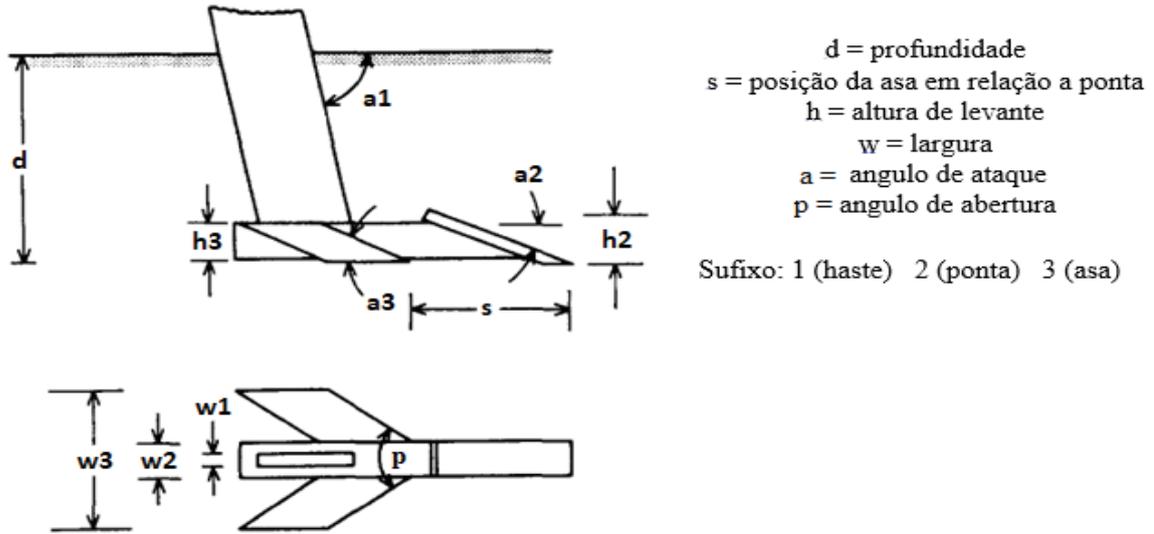
Fonte: Kees (2008).

Segundo Weill (2015), as ponteiros podem variar em largura, altura de elevação de asa, ângulo de inclinação e comprimento, sendo que o desprendimento de solo depende muito da geometria da ponteira. Para o autor, ponteiros alados possuem asas fixadas diretamente na ponteira ou na haste, sendo que a largura das ponteiros estreitas (sem asas) pode variar entre 2,5 e 12,5 cm (1 e 5"), e a largura das ponteiros alados, entre 15 e 30 cm (6 e 12").

Para Kees (2008), ponteiros alados possuem larguras típicas de 6 a 16", de modo que as asas devem ser projetadas para fraturar o solo uniformemente sem levantar a superfície excessivamente.

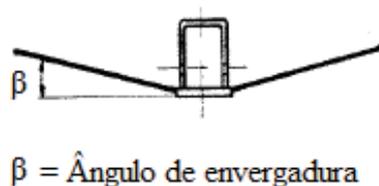
As Figuras 15 e 16 mostram as geometrias de uma ponteira alada, indicando os ângulos principais.

Figura 15 – Geometria da ponteira alada.



Fonte: Spoor & Godwin (1978).

Figura 16 – Ângulo de envergadura da ponteira alada.



Fonte: Adaptado de Souza (1989).

Para as ponteiros sem asas os parâmetros geométricos são os mesmos, desconsiderando apenas as dimensões referentes a asa lateral que não está presente nas ponteiros comuns.

No que se refere aos tipos e as formas das ponteiros de escarificadores e subsoladores, Lanças (1987), trabalhando com diferentes formas geométricas de haste e de ponteiros e velocidades de deslocamento no subsolador, concluiu que as ponteiros aladas mostram melhor conversão energética em relação às sem asas, apresentando menor consumo específico operacional. Apesar de requerer maiores valores de força de tração e quantidade de combustível, concluiu também que as ponteiros aladas apresentam maiores elevações do solo,

mesmo operando com profundidades de trabalho menores que as ponteiras sem asas e ainda que a força de tração cresceu com o aumento da velocidade.

Ao estudar a influência de parâmetros geométricos na distribuição das forças em uma operação de subsolagem, Souza (1989) concluiu que o ângulo de envergadura da asa do subsolador deve assumir um valor que mantenha a asa posicionada horizontalmente, no caso do estudo 15°. Concluiu também que a colocação de asas na ponta do subsolador aumentou significativamente a força resultante e a área transversal de solo mobilizado, mas em poucos tratamentos houve uma redução significativa da resistência específica do solo. Segundo o autor no quesito ângulo de ataque da asa a condição mais favorável entre as estudadas no trabalho foi 25°.

Segundo Santos et al. (2015), a ponteira alada apresentou eficiência energética superior à ponteira estreita, pois com mesmo número de hastes, trabalhou-se uma área maior de solo, utilizando-se quantidade de energia semelhante.

Segundo Kees, (2008), a altura de levante da asa varia de 1 a 4” e o ângulo de abertura varia entre 40 e 60°.

Ao avaliar a influência de parâmetros geométricos na variação da força de tração para ponteira de haste alada, Souza (1989) concluiu que aumentando a largura da asa de 240 mm para 435 mm houve um acréscimo na força horizontal e uma diminuição na força vertical, discordando do trabalho de outros pesquisadores que verificaram um aumento da força vertical com o aumento da largura da asa.

Ao estudar hastes com e sem asas nas respectivas ponteiras, Sasaki et al. (2005) concluíram que as ponteiras com asas demandam força de tração 18 % a mais que ponteira sem asas.

Segundo Weill (2015), quando comparadas com ponteiras estreitas, as aladas possuem várias vantagens, como desprender um volume muito maior de solo, reduzir a potência necessária por unidade de solo desprendido e aumentar a profundidade de trabalho efetivo.

Ao avaliar a demanda energética e mobilização do solo com o uso de escarificadores em sistemas de semeadura direta, Bellé et al. (2014) submeteram uma haste descompactadora comercial reta inclinada de largura 0,035 m e ângulo de inclinação 60° com ponteira de largura 0,055 m e 20° de ângulo de ataque, com outra haste descompactadora experimental reta inclinada de largura 0,015 m e ângulo de inclinação 45° com ponteira de largura 0,037 m e 20° de ângulo de ataque, ambas a profundidade fixa de 0,25 m. Eles concluíram que o desempenho do elemento descompactador experimental foi superior ao comercial, uma vez

que o experimental exigiu menor força e potência média na barra de tração, consumo horário de combustível e resistência específica operacional.

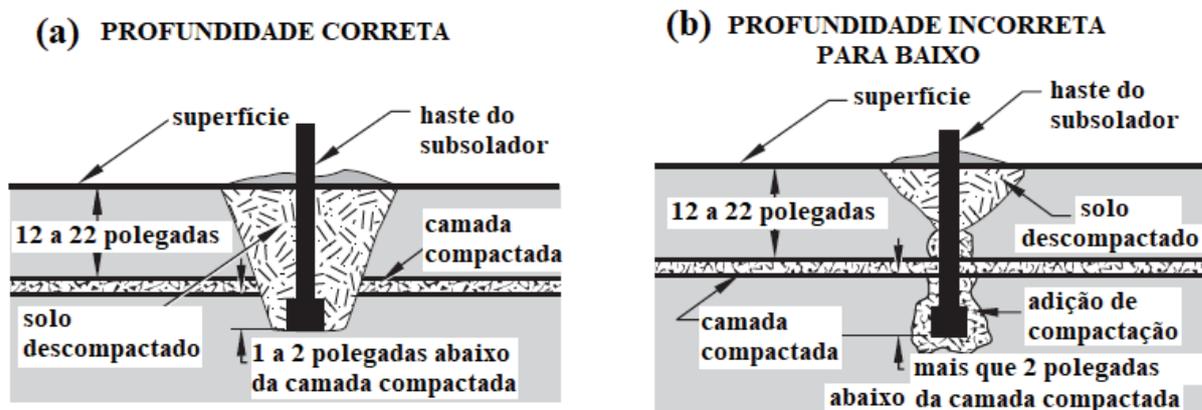
2.7 Profundidade de trabalho

Existe uma profundidade máxima de trabalho para cada tipo de haste, sendo que a profundidade de trabalho dos subsoladores é considerada ótima, para uma grande faixa de solos, desde que estejam com teor de água adequado para efetuar a subsolagem. Tal profundidade de trabalho está por volta de 5 a 7 vezes a largura da ponteira da haste sem asa (SPOOR E GODWIN, 1978).

Segundo Lanças (2002), existe uma profundidade máxima de trabalho para cada geometria de haste, a partir da qual a área mobilizada do solo não apresenta aumentos significativos e a própria haste começa a provocar a compactação do solo, além de provocar um aumento significativo da resistência específica do solo (força de tração por unidade de área mobilizada).

Para Kees (2008), a profundidade de trabalho da haste deve ser de 1 a 2” abaixo da camada compactada. A Figura 17 mostra que depois de encontrada a camada compactada, existe uma profundidade de operação de descompactação recomendada, sendo que a profundidade correta (Fig. 17a) é regular a haste de forma que atinja no máximo 2” abaixo da camada compactada, pois se for trabalhado em uma profundidade incorreta para baixo (Fig. 17b) ocorre uma adição de compactação do solo abaixo da ponteira da haste.

Figura 17 – Profundidade de trabalho recomendada.



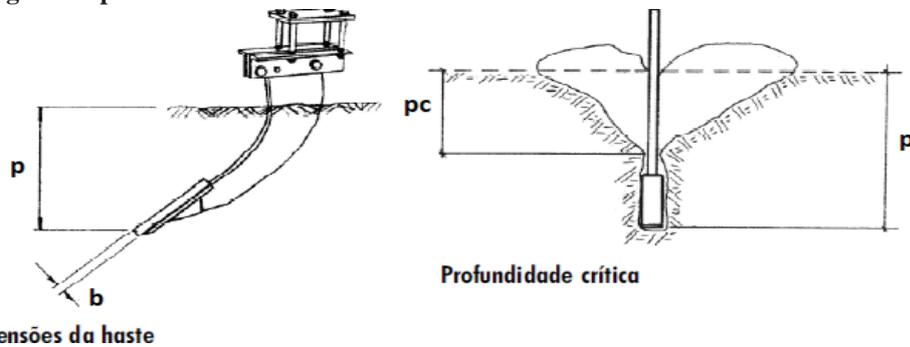
Fonte: Kees (2008).

Em sua pesquisa Compagnon et al. (2013), observaram que o aumento da profundidade de trabalho de 200 para 300 mm fez com que o escarificador exigisse 11,6 % a

mais de força na barra de tração, evidenciando o efeito da resistência do solo sobre o equipamento de hastes.

A profundidade máxima de trabalho apresenta grande correlação com a geometria da ponteira da haste e com as condições e tipo de solo, recebendo o nome de “profundidade crítica”, sendo que o solo se trinca a partir da profundidade crítica (p_c) até a sua superfície independentemente da profundidade da haste (p). Assim, a profundidade crítica é influenciada diretamente pela largura da ponteira (b). Ficou estabelecida, portanto, a relação: $p = (5 \text{ a } 7) \cdot b$ conforme ilustrado na Figura 18 (LANÇAS, 2002).

Figura 18 – Largura de ponteira sem asa x Profundidade crítica.



Fonte: Lanças (2002).

Segundo Weill (2015), a profundidade crítica é a profundidade de trabalho máxima na qual o solo pode ser quebrado e elevado em vez de comprimido lateralmente, sendo que abaixo dessa profundidade, as ponteiros do subsolador compactam o solo e, frequentemente, os canais criados pelas ponteiros são cobertos por terra conforme observado na Figura 19.

Figura 19 – Compressão de solo abaixo da profundidade crítica.



Fonte: Weill (2015).

Kichler et al. (2007), estudando o desempenho energético de subsoladores, verificaram a ocorrência de aumento no consumo de combustível de 20 % e incremento na força de 120 % quando a profundidade foi aumentada de 0,23 m para 0,35 m.

2.8 Velocidade de deslocamento

Segundo Weill (2015), em geral, recomenda-se subsolar ou escarificar em velocidade de cerca de 5,0 a 6,0 km/h para quebrar o solo de forma satisfatória, sendo que o grau de distúrbio obtido tende a aumentar com o aumento da velocidade, isso ao operar em condições secas.

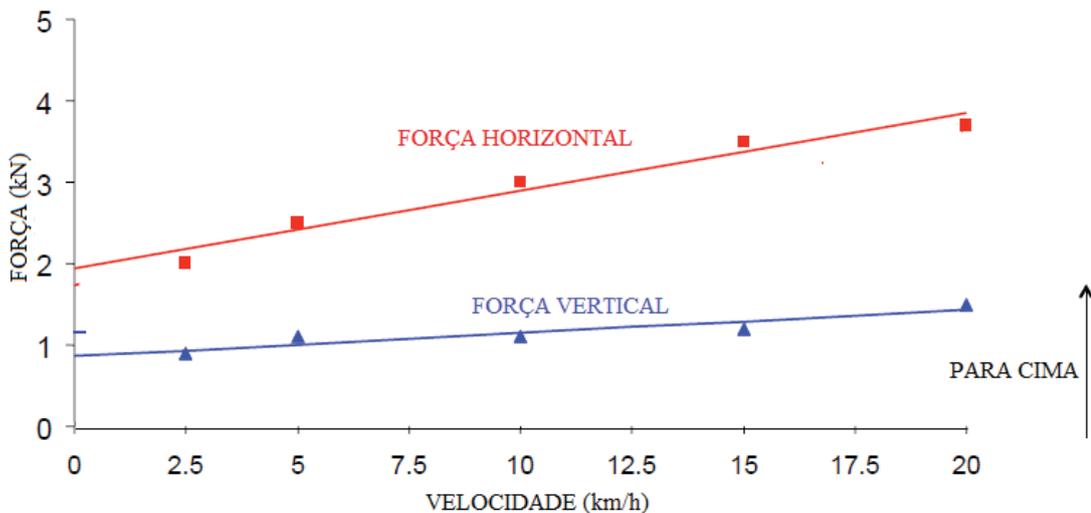
Para Silva et al. (2015), os valores de velocidades adotados para a operação de subsolagem estão na faixa de 2,0 a 6,0 km/h, dependendo da unidade motora a ser utilizada.

Para Kees (2008), a velocidade de deslocamento muito elevada da operação de descompactação do solo pode promover perturbações superficiais excessivas causando a incorporação da matéria orgânica. Por outro lado, a velocidade de deslocamento muito baixa pode não levantar e fraturar o solo adequadamente.

Machado et al. (1996), pesquisando o desempenho de escarificadores, observaram que em relação à velocidade de trabalho, os resultados encontrados não apresentaram diferença estatística significativa na área transversal de solo mobilizado. Este é um ponto a ser estudado com maior cuidado, pois seria de se esperar que maiores velocidades produzissem mais mobilização da camada superficial do solo.

Segundo Wheeler e Godwin (1996), à medida que a velocidade de trabalho aumenta cresce também a força horizontal e vertical, conforme apresentado na Figura 20, isso para ponteiros de 30 mm de largura a uma profundidade de 250 mm.

Figura 20 - Influência da velocidade na força.



Fonte: Wheller e Godwin (1996).

Um resultado até certo ponto interessante foi encontrado por Bellé (2014), que relatou em sua pesquisa que o aumento da velocidade de deslocamento proporcionou acréscimo da força média na barra de tração e consumo horário de combustível, mas não alterou a área de solo mobilizado, área de elevação, nem o empolamento do solo que é a divisão entre a área de elevação e a área descompactada, expresso em porcentagem.

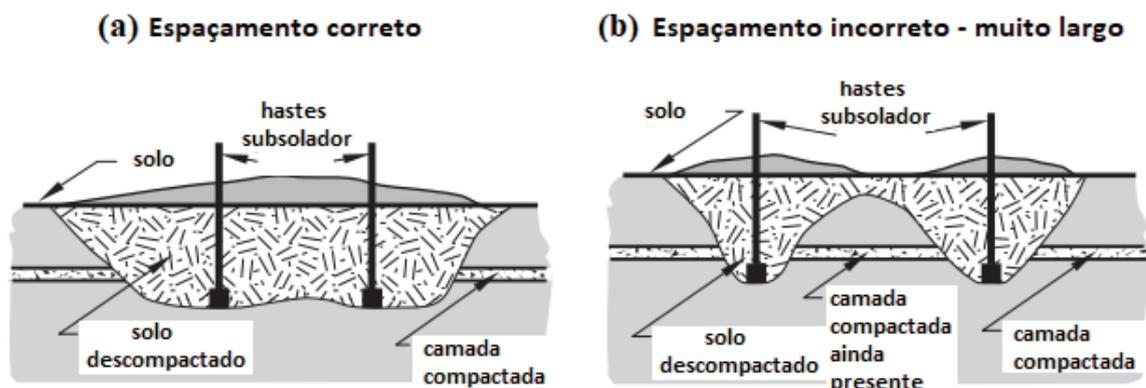
Gamero (2008) verificou que o aumento da velocidade de deslocamento implicou em maiores valores de potência na barra de tração, consumo horário de combustível, potência específica operacional e potência média em relação à profundidade.

2.9 Espaçamento entre hastes

Segundo Lanças (2002), o número de hastes a serem utilizadas num subsolador ou escarificador dependerá da disponibilidade de potência do trator para executar a tração. Já o espaçamento entre hastes influi diretamente na largura de corte total do implemento que, por sua vez, é diretamente proporcional à capacidade de campo. Portanto, para subsoladores com ponteiros sem asas, o espaçamento entre hastes fica na faixa de 1,0 a 1,5 vezes a profundidade de trabalho e para ponteiros com asas na faixa de 1,5 a 2,0 vezes a profundidade de trabalho.

Segundo Kees (2008), o espaçamento entre as hastes depende da umidade do solo, do grau de compactação e a profundidade da camada compactada, sendo que o espaçamento deve ser ajustado para que a área trabalhada possa ser fraturada de forma mais eficiente como ilustrado na Figura 21. Para um espaçamento correto (Fig. 21a) a área de solo mobilizado é homogênea, já para um espaçamento incorreto (Fig. 21b) não se mobiliza toda camada de solo compactada.

Figura 21 – Distância entre hastes ideal.



Fonte: Adaptado de Kees (2008).

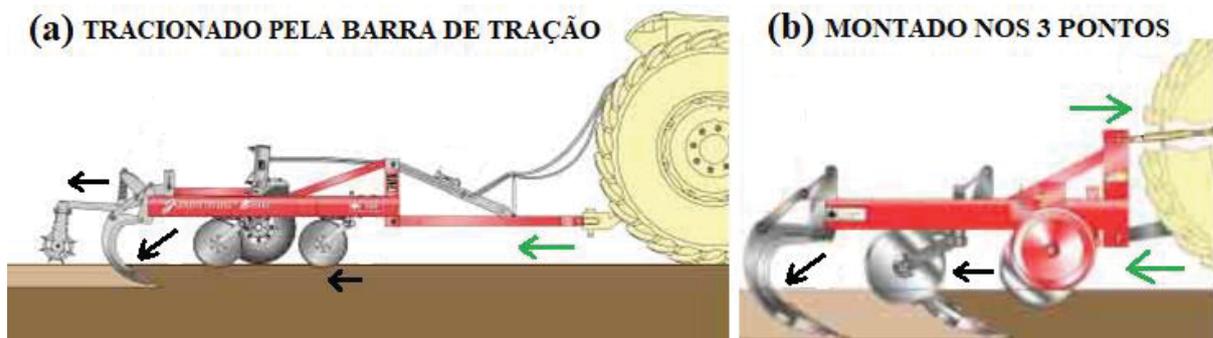
2.10 Força de tração em subsoladores

Dentre as operações mecanizadas de campo que são necessárias a cada etapa do processo produtivo, a subsolagem é a que requer o maior consumo de energia. Porém a operação de subsolagem, usada para romper camadas subsuperficiais compactadas, tem sido muito questionada pelos agricultores, pois possui custo financeiro elevado e certas incertezas da duração de seus efeitos benéficos (SALVADOR et al., 2009).

Segundo Camara (2006), no que diz respeito à demanda energética, ou seja, potência exigida na barra de tração, é de fundamental importância explorar ao máximo as regulagens oferecidas pelos equipamentos oferecidos no mercado. Porém a interferência humana nos implementos agrícolas já desenvolvidos e em uso na agricultura é limitada, sendo pertinente a avaliação de novos equipamentos mais eficientes no aproveitamento da energia do trator, isso inclui os que causam menor desestruturação do solo.

Um implemento agrícola para descompactação de solo que pode ser um escarificador ou um subsolador, podem estar montados no trator de duas formas: na barra de tração ou no sistema de engate três pontos. Os implementos menores de até 7 hastes para tratores de menor potência, costumam ser montados ao sistema de engate três pontos (Fig. 22a), já os implementos maiores com mais de 7 hastes possuem sistema de transporte próprio e são tracionados na barra de tração do trator (Fig. 22b), conforme Figura 22.

Figura 22 - Montagem do implemento agrícola no trator.

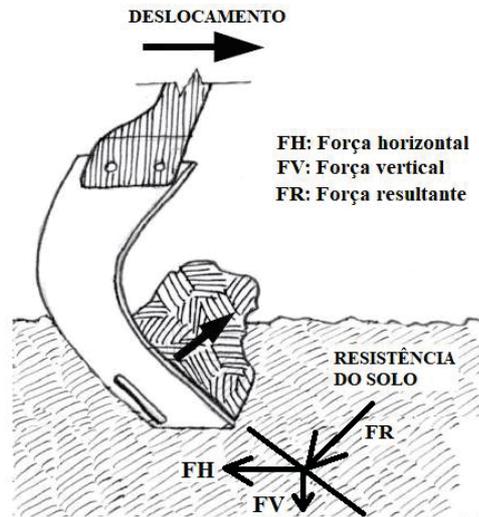


Fonte: Adaptado de JAN (2008).

Como visto na Figura 22, a resistência que o solo causa no implemento está nos discos de corte, nas hastes e no rolo destorroador, conforme indicação das setas pretas. Toda a força atuante nos órgãos ativos do implemento é descarregada pelo cabeçalho do implemento na barra de tração do trator, ou no sistema de engate três pontos, conforme indicação das setas em verde, sendo que para a montagem no engate três pontos o terceiro ponto do trator sofre compressão.

Portanto, o ponto de tração do implemento no trator muda dependendo do sistema de acoplagem, porém as forças atuantes na haste são as mesmas. Como visto na Figura 23, devido à inclinação da haste do subsolador, a resistência do solo empurra a haste para trás e para baixo, gerando uma força resultante com intensidade e ângulo específicos.

Figura 23 - Forças agindo sobre a haste.



Fonte: Adaptado de Weill (2015).

Como ilustrado na Figura 22 (a) as forças atuantes na haste de um descompactador de solo são descarregadas na barra de tração de trator para os implementos de maior porte. Portanto, para o cálculo da potência na barra de tração tem-se a Equação 1.

$$P = \frac{F_m \times V_m}{270} \quad (1)$$

P: Potência média na barra de tração (CV);

F_m: Força média na barra de tração (kgf);

V_m: Velocidade média (km/h);

270: Valor adimensional de conversão de unidades, como segue:

P(CV): F_m (kgf) x V(m/s) x 1000/(3600 X 75);

1000: para transformar km em metros;

3600: para transformar horas em segundo;

75: para transformar kgf x m/s em CV, sendo que 1 CV = 75 kgf x m/s.

Segundo Kees (2008), a potência necessária para efetuar a subsolagem depende da umidade do solo, da profundidade de trabalho e da espessura da camada compactada e em menor grau de importância do tipo de solo, sendo que cada haste pode exigir de 30 a 75 CV.

Sendo que hastes com inclinação lateral necessitam uma força de tração menor quando comparadas com hastes retas e hastes reta inclinadas (BARR et al., 2016).

2.11 Máquinas do mercado agrícola

Para promover alterações nas geometrias de hastes e ponteiros de um descompactador de solo é necessário conhecer o que está disponível no mercado na atualidade.

2.11.1. Subsoladores

Na Tabela 2 podem ser visualizadas as principais máquinas, bem como suas características técnicas. Estas informações foram retiradas dos manuais dos fabricantes.

Tabela 2 – Principais subsoladores fabricados no Brasil.

Fabricante	Nome comercial	Sistema de engate/transporte	Prof. de trabalho máxima (mm)	Potência média por haste (CV)	Veloc. de trab. Indicada (km/h)
Stara	Asa Laser	Barra de tração	450	20,5	4-7
Jan	Jumbo Matic Buster	Barra de tração	400	20	4-6
Tatu Marchesan	AST/MATIC 450	Barra de tração	450	18,5	5-6
Baldan	ASDA	Barra de tração	450	22,5	4,5 - 5
Piccin	SPCR400	Barra de tração	400	45	-
Inroda	Puma	Barra de tração	450	22,5	5-6
GTS	Terrus	Barra de tração	450	35	-

Fonte: O autor (2017), retirado do manual de operação de cada fabricante.

Na Tabela 3 podem ser vistos dados de um implemento nacional que utiliza o sistema de curvatura lateral para operações de descompactação.

Tabela 3 – Descompactador com curvatura lateral semelhante ao Paraplow.

Fabricante	Nome comercial	Sistema de engate/transporte	Prof. de trabalho (mm)	Potência p/haste (CV)	Veloc. de trab. Indicada (km/h)
IKEDA	DPT 650 MA	3 pontos	200-500	30,4	-

Fonte: O autor (2017), retirado do manual de operação do fabricante.

Além do Paraplow, que foi produzido pela Howard, existem outras máquinas que utilizam este mesmo sistema de curvatura lateral, porém com algumas variações nas ponteiros

e nas hastes. Uma delas é a Bigham Brothers dos Estados Unidos da América, que possui as marcas V-Till®, Terra-Till® e Para-Till®.

A Agrisem International da Inglaterra também aplica este sistema de curvatura lateral na haste de seus descompactadores, o Cultiplow Silver®, Cultiplow Gold® e o Cultiplow Platinum®. Porém como o tipo de solo e de preparo de solo nessas regiões diferem do Brasil essas máquinas internacionais não serão avaliadas a fundo.

2.11.2. Escarificadores

Na Tabela 4 podem ser vistos os principais esscarificadores do mercado brasileiro com suas especificações, segundo manuais dos próprios fabricantes.

Tabela 4 – Escarificadores produzidos no Brasil.

Fabricante	Nome comercial	Sistema de engate/transporte	Prof. de trabalho máxima (mm)	Potência média por haste (CV)	Veloc. de trab. Indicada (km/h)
Stara	Fox	Barra de tração	260	12,5	4-8
Jan	Matic	Barra de tração	300	13,5	4-6
Tatu Marchesan	EST Matic 300	Barra de tração	260	11	6-8
Piccin	EPCR 300	Barra de tração	260	14,5	-
Khor	Skarific	Barra de tração	350	13,5	4-8
Inroda	Lince	Barra de tração	260	12,5	4-8
Ikeda	ESC 7 MA	Barra de tração	350	13	-

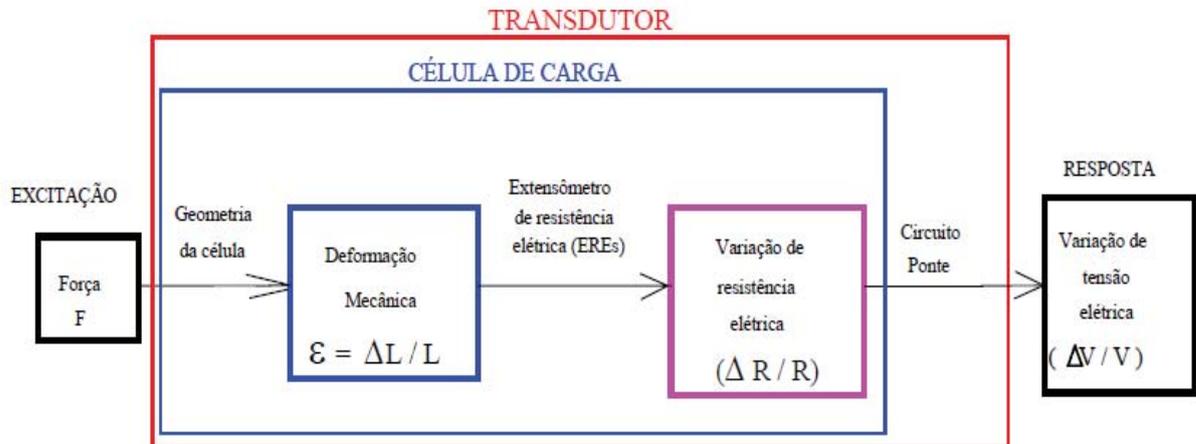
Fonte: O autor (2017), retirado do manual de operação de cada fabricante.

2.12 Transdutor de força (célula de carga)

Transdutor é um dispositivo que tem a capacidade de transformar um tipo de energia em outra através de um estímulo ou por uma reação de uma grandeza física, sendo que em termos de instrumentação um transdutor ideal deve: medir com confiabilidade a intensidade do fenômeno físico; operar sob efeito de grandezas indesejáveis como umidade, temperatura, choque e vibração; ser capaz de fornecer um sinal de saída que seja compatível com o equipamento de condicionamento do sinal. Tudo isso com modificações desprezíveis nas características originais do evento (WEBER, 2008).

Ainda segundo Weber (2008), o estímulo na entrada de um transdutor, que pode ser compressão, tração ou torque, pode ser verificado por diferentes tipos de sensores, dentre eles o extensômetro elétrico. Na Figura 24 está a esquematização dos três estágios do processamento da informação desde a excitação (entrada) até a resposta (saída).

Figura 24 - Diagrama do processamento da informação desde a excitação até a resposta.



Fonte: Weber (2008).

As células de carga são avaliadas por algumas características fundamentais obtidas com os dados de calibração das mesmas, sendo que as principais características a serem avaliadas são: (1) desvio da linearidade, que trata da relação entre a maior diferença existente entre a curva média real de calibração e a reta teórica de calibração, pela máxima tensão lida na saída do canal de medição; (2) histerese, que trata da diferença entre as curvas de carregamento e descarregamento durante a calibração; (3) repetibilidade, que trata da diferença que pode ocorrer nas curvas de calibração nas várias repetições de carregamento feitas para gerar a curva de calibração final; (4) interferência entre canais, que deve ser verificado em células de carga multi-axiais, que fazem a medição de força em mais de um sentido ao mesmo tempo, como é o caso das células de carga octogonais (BECK, 1983).

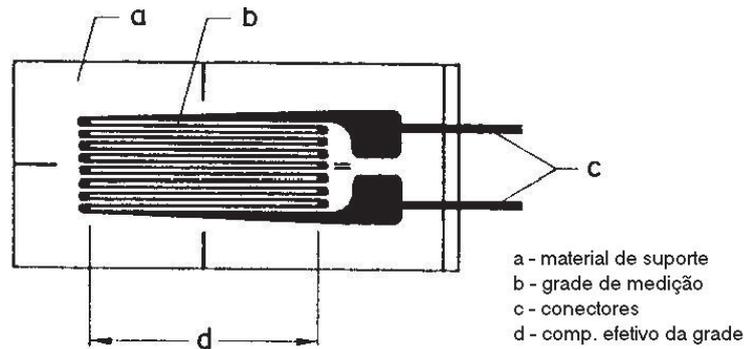
Essa interferência entre canais nas células de carga multiaxiais também é conhecida como *crosstalk*.

2.12.1 Extensômetro elétrico

Um extensômetro é um transdutor resistivo, mecanicamente deformável, cuja resistência elétrica varia com seu grau de deformação, sendo que a medida da variação da resistência elétrica do extensômetro, utilizando um circuito elétrico, permite estimar o seu grau de deformação e a força aplicada sobre ele (GUADAGNINI et al., 2011).

As medidas de deformação assumem que a extensão decorrente no objeto é transferida sem perdas para o extensômetro, logo deve existir uma ótima aderência entre eles. Na Figura 25 está a representação de um extensômetro.

Figura 25 - Extensômetro elétrico.



Fonte: Grante (2004).

Segundo Grante (2004), o princípio de trabalho do extensômetro de metal está baseado na relação deformação/resistência do condutor elétrico, sendo que todo condutor elétrico muda sua resistência elétrica quando submetidos a tensões mecânicas, sejam compressivas ou de tração.

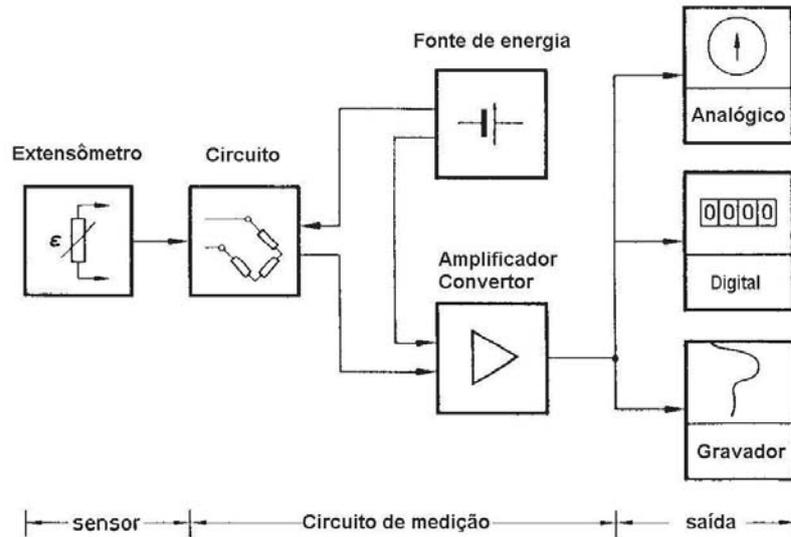
2.12.2 Sistema de medição

As deformações que ocorrem em componentes mecânicos são medidas pelos extensômetros, porém tais leituras não aparecem em forma de gráficos ou tabelas, sendo necessária a utilização de um conjunto de aparelhos que transformam a deformação sentida pelo extensômetro em informações concretas. Portanto esse processo de leitura das deformações é feito por um sistema de medição (GRANTE, 2004).

Ao sofrer deformação mecânica o extensômetro sofre uma variação de sua resistência elétrica causando um desequilíbrio na ponte, o que faz causar uma variação na tensão de saída da mesma. Esse sinal elétrico passa por um condicionamento, que segundo Bordignon (2005) é o processo de amplificação ou atenuação do sinal, posteriormente por um conversor A/D que converte o sinal de analógico para digital a uma taxa de amostragem definida pelo usuário, logo esse sinal digitalizado pode ser manipulado por um computador através de programas específicos.

Como visto na Figura 26 o sistema de medição é formado pelos extensômetros ligados entre si por um circuito elétrico denominado ponte de Wheatstone, ponte capaz de realizar a medição da variação das resistências elétricas nos braços do seu circuito. Esse circuito é alimentado por uma fonte de energia, geralmente de 5V. Depois de amplificados, os sinais de tensões emitidos pelos sensores são convertidos de analógicos para digitais, para que sejam gravados através de um software que também faz o pós-processamento desses dados.

Figura 26 – Sistema de medição com extensometria.



Fonte: Grante (2004).

Para Silva (2010), a aquisição de dados consiste em ler e armazenar dados de um determinado fenômeno, mantendo condições para que estes dados possam ser analisados ou processados posteriormente. Um módulo de aquisição de dados pode ser esquematizado como na Figura 27.

Figura 27 - Esquema de módulo de aquisição de dados de célula de carga.



Fonte: Silva (2010).

Um módulo de aquisição consiste, portanto, em conversores A/D (convertem sinal analógico em digital) e amplificadores de sinais, pois os dados gerados não são adequados para serem associados aos conversores, necessitando serem condicionados (amplificar ou atenuar).

Resumindo, os extensômetros colados na célula de carga e ligados entre si num arranjo elétrico denominado ponte de Wheatstone sofrem deformação mecânica junto com a célula de carga, essa deformação mecânica causa variação na resistência elétrica de cada sensor e um desequilíbrio na ponte (arranjo elétrico), logo essa variação é lida, amplificada e convertida de

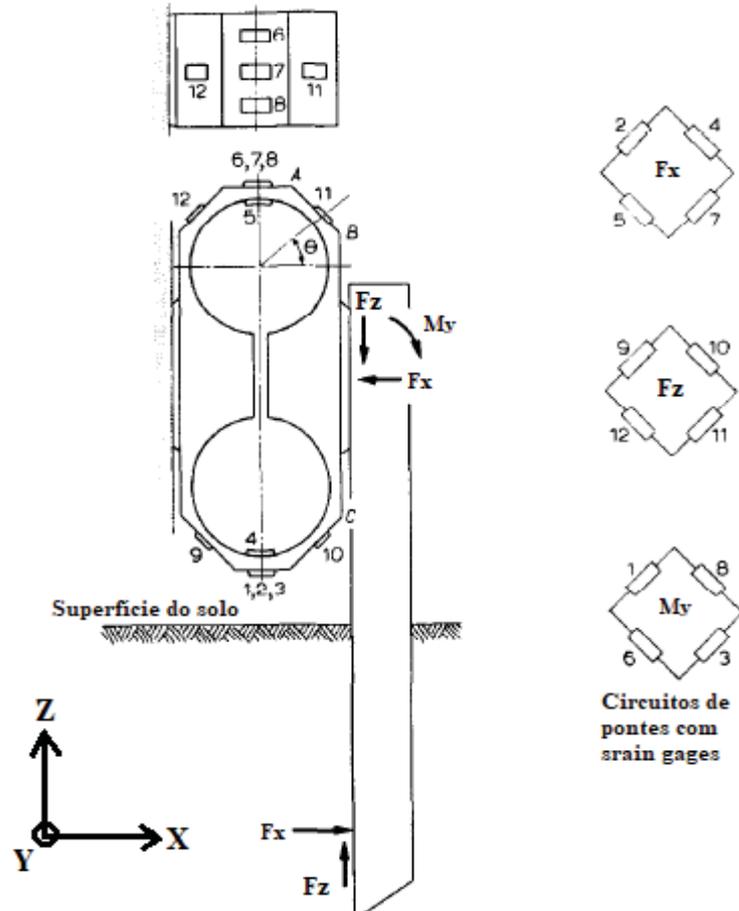
sinal analógico para digital pelo módulo de aquisição de dados, esse sinal digital que pode ter frequência de 10 Hz por exemplo, é armazenado por um software instalado em um computador interligado ao módulo de aquisição de dados. Posteriormente esses dados poderão ser pós-processados.

2.12.3 Célula de carga octogonal

Segundo Godwin (1975), o sistema de forças atuantes em mecanismos de preparo de solo consiste de duas componentes de forças perpendiculares entre si, a força horizontal (F_x) e a força vertical (F_z), e ainda um momento resultante desses carregamentos (M_y). Uma vez que o carregamento lateral (F_y) é considerado nulo, bem como o momento fletor em torno da força horizontal (M_x) e da força vertical (M_z). Com base nisso foi desenvolvido um transdutor de força em forma de anel octogonal estendido.

Na Figura 28 está representado o anel octogonal de Godwin, ou seja, uma célula de carga para medições em equipamentos agrícolas, linhas de plantio ou hastes subsoladoras.

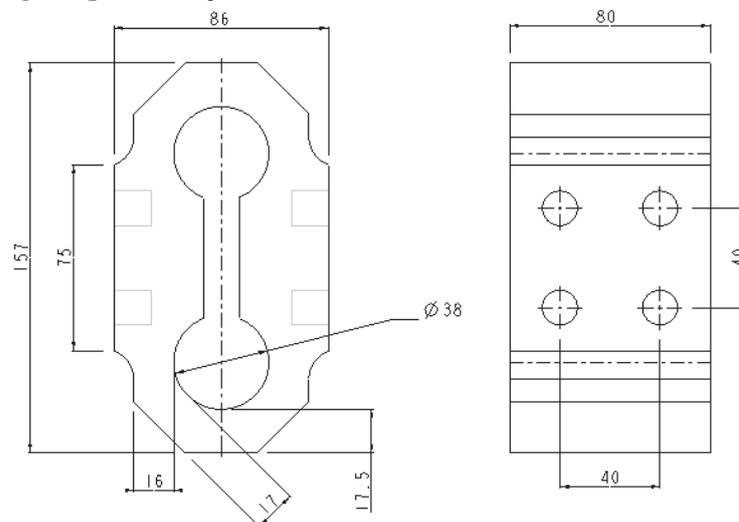
Figura 28 - Anel octogonal com pontos de colagem dos sensores e ação das forças.



Fonte: Godwin (1975).

Portanto, o anel octogonal (Figura 28) desenvolvido por Godwin (1975), é instrumentado com 3 pontes de Wheatstone, cada uma possuindo 4 sensores colados em pontos específicos, ou seja, de maior deformação dentro do nível elástico. Cada ponte tem portanto, a responsabilidade de medição de um tipo de força, horizontal, vertical e momento. Baseado nos cálculos de dimensionamento de Godwin (1975) e de outros pesquisadores, Silva (2010) dimensionou um anel octogonal (Figura 29) para medições de esforços em hastes subsoladoras, utilizando uma carga horizontal (F_x) de 20 KN para o dimensionamento. O material proposto para a fabricação da célula de carga foi SAE 4140.

Figura 29 - Anel octogonal para medições em subsoladores.



Fonte: Silva (2010).

2.13 Considerações finais

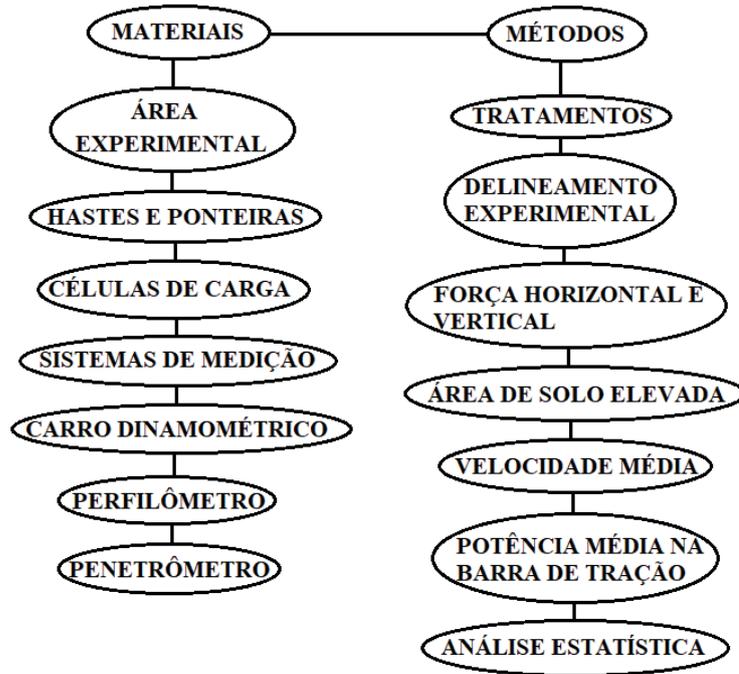
Considerando os prejuízos que um solo compactado pode trazer para as culturas agrícolas, é de suma importância entender esse fenômeno, desde as causas do seu aparecimento nas lavouras e como poder evitá-las. Sendo que quando a compactação já estiver comprometendo a produtividade das culturas, é necessário intervir, efetuando a mobilização mecânica desse solo, daí a importância de conhecer as operações de subsolagem e escarificação, a fim de poder utilizá-las da melhor forma possível, visto que esta operação é uma das mais onerosas no meio agrícola.

Como forma de otimizar o processo de descompactação de solo, a melhoria dos elementos rompedores tem papel fundamental nesse processo de evolução dos implementos agrícolas, sendo que na sequência deste trabalho será verificado como ainda a muito o que se otimizar nessa operação de preparo periódico de solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma visto na Figura 30 mostra a sequência dos assuntos abordados em material e métodos.

Figura 30 - Fluxograma de atividades.



Fonte: O autor (2018).

3.1 Material

Inicialmente foi caracterizada a área experimental, posteriormente descritas as hastes e ponteiras que serão utilizadas no experimento, na sequência as células octogonais que serão utilizadas para as medições de força horizontal e vertical, o carro dinamométrico que foi utilizado para a montagem das hastes, o sistema de medição, o perfilômetro para medição da área de elevação de solo e por fim o penetrômetro para a medição da resistência do solo à penetração.

3.1.1 Área experimental

Os experimentos de campo foram efetuados em Não-Me-Toque-RS conforme Figura 31. A área está localizada geograficamente a 28°29'33" de latitude e 52°49'0" de longitude.

Figura 31 – Localização geográfica de Não-Me-Toque - RS, local dos experimentos.



Fonte: Wikipédia (2017).

Trata-se de uma área de lavoura cultivada sob sistema de plantio direto com cultivo de soja (*Glycine max*) no verão e trigo (*Triticum*) no inverno, sendo que o experimento foi realizado no mês de Abril na resteva da cultura da soja, 15 dias pós colheita. Na Figura 32 pode ser vista a lavoura onde foi conduzido o experimento, uma superfície plana e sem ondulações.

Figura 32 - Área do experimento.



Fonte: O autor (2018).

3.1.1.1 Caracterização do solo

Os experimentos foram realizados em solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, ou seja, um solo de textura argilosa e relevo suavemente ondulado. O clima dessa região é classificado como subtropical úmido. No dia do experimento foi coletada amostra de solo na profundidade de 400 mm em cinco pontos distintos da área experimental, posteriormente foi verificado em laboratório que a umidade era de 23,2 %. O solo estava em condições boas para a operação de descompactação, ou seja, em condição friável, nem muito seco nem muito úmido.

O experimento foi realizado em apenas um dia, sendo que a temperatura ambiente variou de 22 a 32 °C durante a coleta dos dados.

3.1.2 Caracterização das hastes e ponteiros

Os experimentos deste trabalho foram efetuados com cinco modelos de hastes cada uma com sua respectiva ponteira, sendo um modelo comercial e as outras quatro de protótipos que foram desenvolvidas com embasamento nas pesquisas realizadas na revisão bibliográfica.

O primeiro modelo de haste/ponteira ilustrado na Figura 33, trata-se de uma haste comercial com geometria reta inclinada com ponteira sem asa, denominada aqui de H1 (Haste 1). A haste possui espessura de 18,5 mm e ângulo de ataque ao solo de 80° (Fig. 33a). Já a ponteira da haste possui largura de 45 mm (Fig. 33b), sendo que o ângulo de ataque ao solo da ponteira é de 25° na parte posterior e 40° na parte frontal (Fig. 33c).

Figura 33 – Haste comercial (H1), Haste 1.



Fonte: O autor (2018).

A Haste 1 possui faca de corte intercambiável montada em sua face frontal, sendo que tal faca possui espessura variável (Fig. 33d).

Porém, devido ao custo financeiro de se obter um conjunto comercial completo, foi feita a compra apenas da faca frontal e da ponteira, sendo que o corpo da haste foi fabricado, respeitando a geometria. Na figura 34 está ilustrada a haste comercial (H1) adaptada.

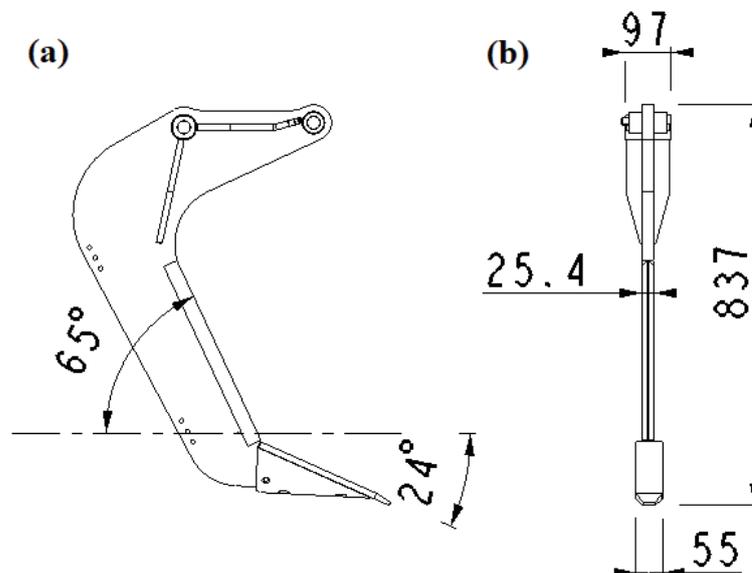
Figura 34 – Haste comercial adaptada, Haste 1.



Fonte: O autor (2018).

A segunda haste está apresentada na Figura 35, é um dos modelos que foi desenvolvido como protótipo, denominada aqui de H2 (Haste 2). Trata-se de uma haste reta inclinada (Fig. 35a), com ângulo de ataque de 60° em relação ao solo e 24° de ângulo de ataque ao solo na ponteira. A haste conta com uma usinagem em chanfro na face frontal para simular uma faca de corte similar a Haste 1. A Haste 2 possui espessura de 25,4 mm (Fig. 35b), com uma largura de ponteira de 55 mm.

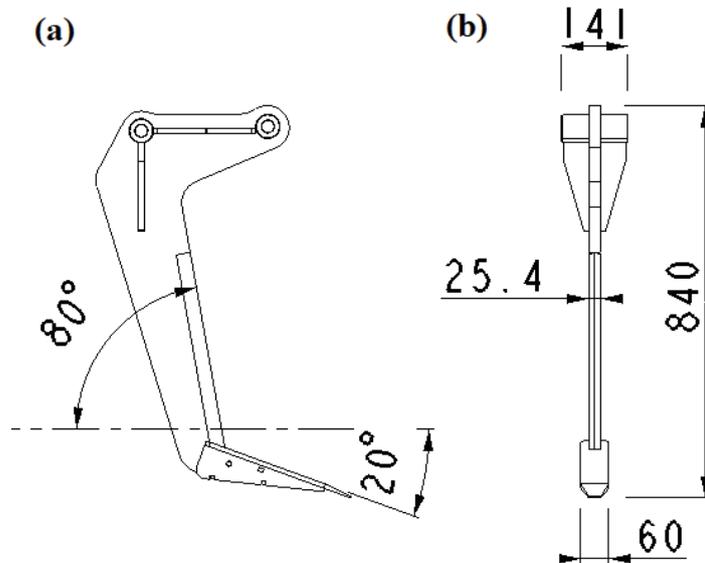
Figura 35 - Haste protótipo (H2), Haste 2.



Fonte: O autor (2018).

Já a terceira haste é mais uma das geometrias que foram desenvolvidas como protótipo (Figura 36), ela foi denominada aqui de H3 (Haste 3). Possui formato reto inclinado (Fig. 36a) com ângulo de ataque ao solo de 80° e 20° de ângulo de ataque ao solo na ponteira. A haste possui espessura de 25,4 mm (Fig. 36b) com 60 mm de largura na ponteira.

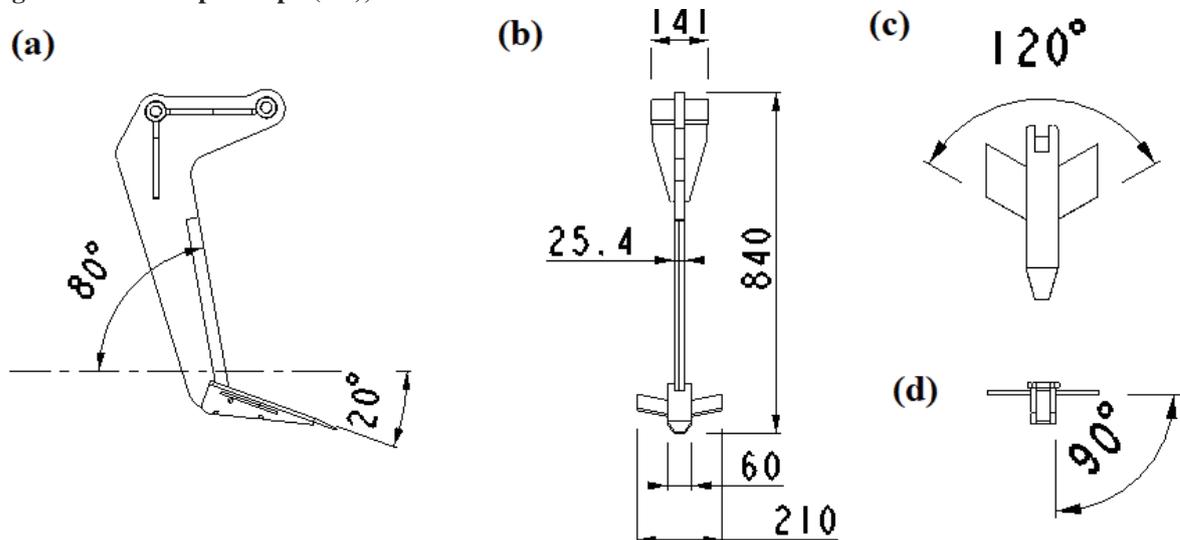
Figura 36 – Haste protótipo (H3), Haste 3.



Fonte: O autor (2018).

A quarta geometria de haste também é um protótipo que foi desenvolvido e está ilustrada na Figura 37, ela foi denominada aqui de H4 (Haste 4). É do tipo reta inclinada, contando com ângulo de ataque ao solo de 80° (Fig. 35a) e 20° de ângulo de ataque ao solo na ponteira, sendo que ela também possui usinagem em cunha na face frontal da haste.

Figura 37 – Haste protótipo (H4), Haste 4.



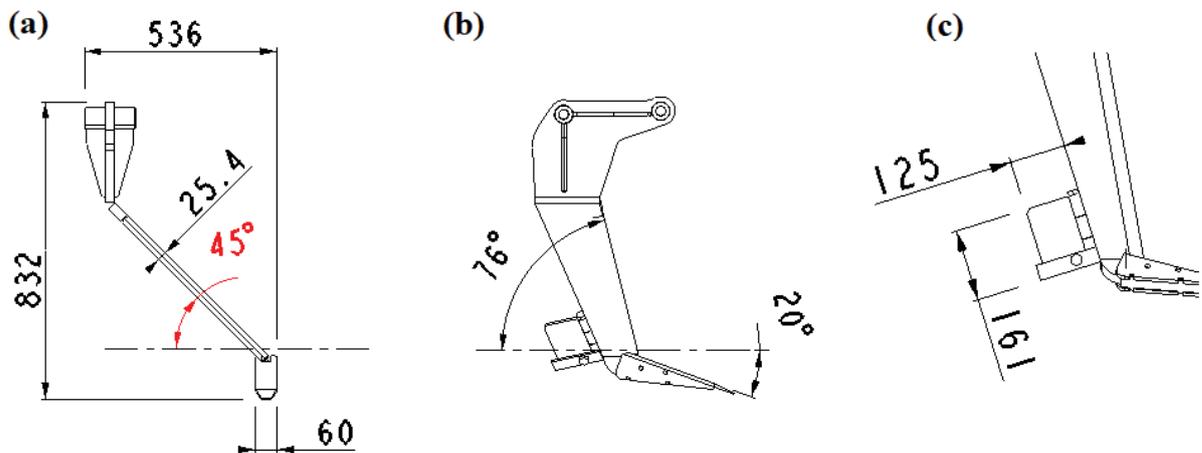
Fonte: O autor (2018).

Porém, a Haste 4 que possui 25,4 mm de espessura, conta com ponteira alada (Fig. 37b), tendo largura total de 210 mm, ângulo de abertura de asa 120° (Fig. 37c) e ângulo de envergadura de 0° (Fig. 37d), ou seja, forma um ângulo de 90° com a vertical.

A quinta haste foi denominada aqui de Haste 5 (H5), ela também é um protótipo desenvolvido neste trabalho e pode ser vista na Figura 38. Ela é do tipo haste com inclinação lateral, semelhante ao descompactador Paraplow da Howard. Sendo que a mesma possui inclinação lateral de 45° (Fig. 38a), largura da ponteira de 60 mm e espessura da haste 25,4 mm, contando também com usinagem em cunha na face frontal simulando uma faca de corte. O ângulo de ataque ao solo da haste é de 76° (Fig. 38b), já na ponteira o ângulo de ataque ao solo é de 20° .

A mobilização de solo pode ser aumentada pela pá móvel traseira (Fig. 38c) que possui largura de 125 mm e comprimento de 161 mm, sendo que ela pode ser regulada por meio de um parafuso montado em uma guia inferior que está fixado à haste. Porém neste estudo a pá móvel traseira foi posicionada paralelamente à haste, ou seja, ela não terá influências no aumento do distúrbio de solo.

Figura 38 – Haste protótipo (H5), Haste 5.



Fonte: O autor (2018).

Na Figura 39 estão as cinco hastes utilizadas no experimento deste trabalho, a haste comercial e as quatro hastes projetadas e fabricadas como protótipo. As hastes aparecem montadas no carro dinamométrico (ver item 3.1.5) no dia dos experimentos de campo.

Figura 39 - Hastes à campo no dia dos experimentos.

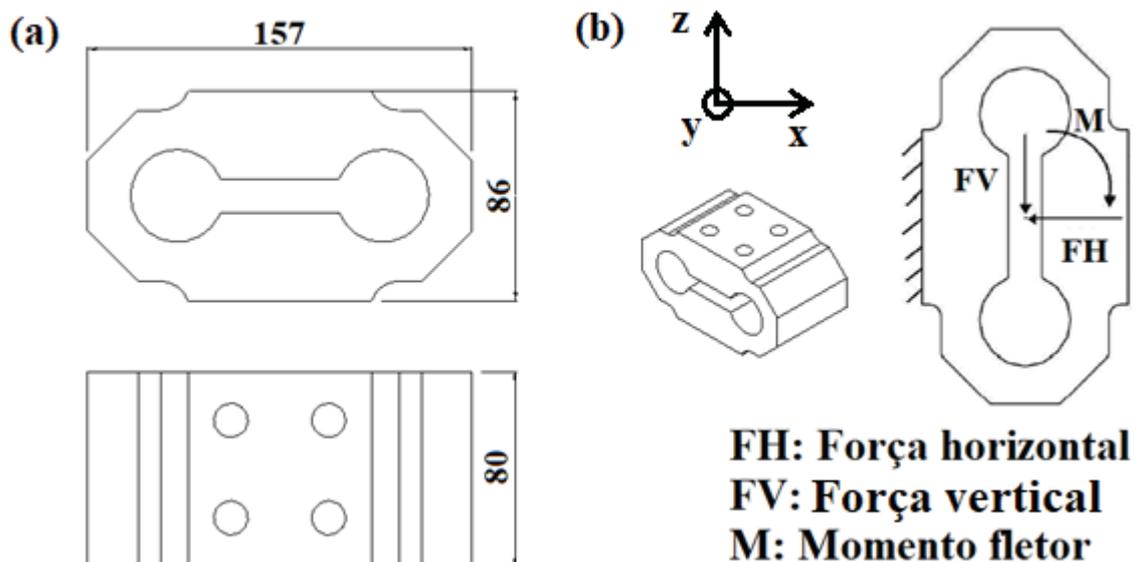


Fonte: O autor (2018).

3.1.3 Célula de carga

Para efetuar a coleta de dados de força horizontal e vertical atuantes em cada geometria de haste/ponteira, foram utilizadas duas células de carga tipo biaxial, ou seja, que medem forças em dois eixos cartesianos ao mesmo tempo. A célula de carga em questão é em formato de anel octogonal. Na Figura 40 pode ser visto o dimensional da célula de carga (Fig. 40a) e os tipos de carga que ela é capaz de medir (Fig. 40b): força horizontal (eixo x), força vertical (z) e momento em torno do centro do anel (eixo y).

Figura 40 – Célula de carga biaxial.



Fonte: O autor (2018).

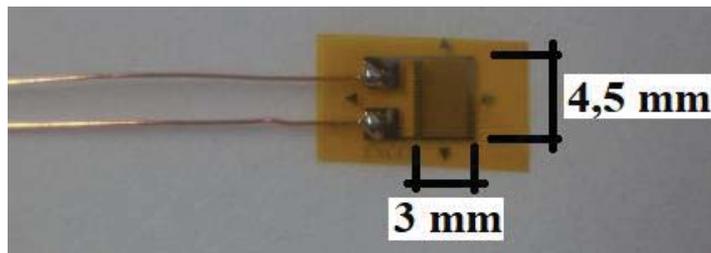
O projeto desta célula de carga, bem como os pontos de colagem dos sensores foram baseados no trabalho de Silva (2010).

A grosso modo, a instrumentação de uma célula de carga consiste em colar extensômetros elétricos (*strain gages*) nos pontos mais sensíveis à deformação mecânica, considerando a máxima deformação elástica permissível tanto da célula quanto do sensor.

Foram utilizados doze extensômetros para a instrumentação de cada anel octogonal, sendo que cada quatro extensômetros ligados entre si pela ponte de Wheatstone fazem a medição de um tipo de carga: horizontal; vertical; momento em torno do centro do anel. Os dados de momento fletor não foram utilizados neste trabalho, mesmo assim foi feita a instrumentação da célula de carga para esse tipo de força, uma vez que se necessita desse dado para verificar a interferência entre canais durante a calibração das células de carga.

Na Figura 41 está o tipo de extensômetro utilizado, trata-se de um sensor unidirecional com resistência de 350 Ohms e grade de medição de 3 por 4,5 mm.

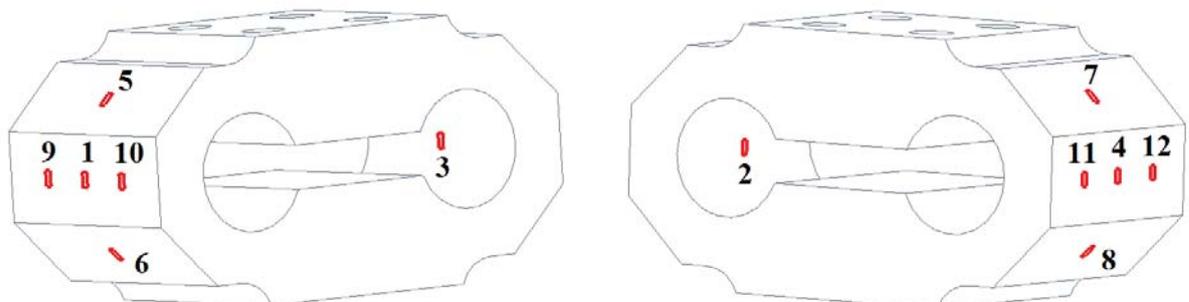
Figura 41 - Sensor utilizado.



Fonte: O autor (2018).

Como dito anteriormente, cada quatro sensores foram ligados entre si formando uma ponte de Wheatstone dita ponte completa. Na Figura 42 estão apresentados os pontos onde foram colados os sensores para cada força a ser medida. O material utilizado para fabricar as células de carga foi conforme indicação de Silva (2010), ou seja, aço SAE 4140.

Figura 42 – Pontos de colagem dos sensores.



Força horizontal: 1, 2, 3 e 4

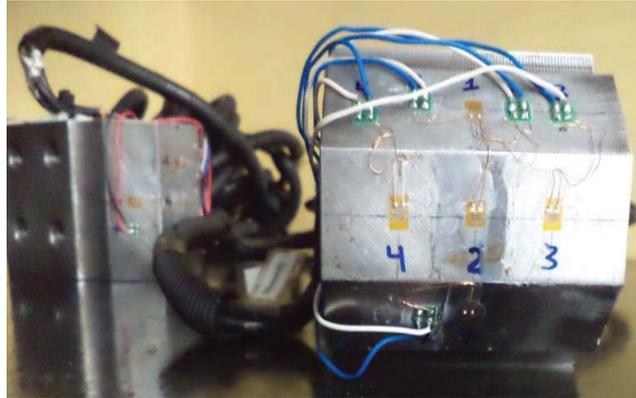
Força vertical: 5, 6, 7 e 8

Momento: 9, 10, 11 e 12

Fonte: O autor (2018).

E na Figura 43 as células de carga sendo instrumentadas.

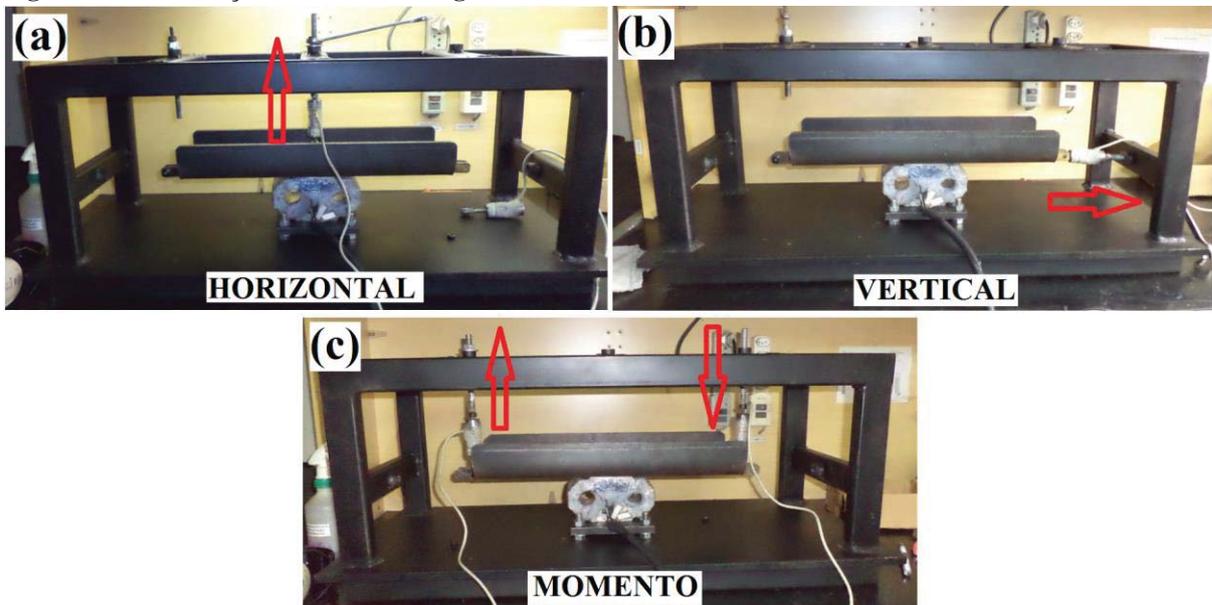
Figura 43 - Célula sendo instrumentada.



Fonte: O autor (2017).

Depois de fabricada e instrumentada, a célula de carga foi calibrada utilizando um dispositivo específico para este fim, apresentado na Figura 44. A célula foi fixada na base do dispositivo e sobre ela foi montado outro componente no qual foi montada a célula de carga utilizada para a calibração. Na Figura 44a está ilustrada a calibração da força horizontal, na Figura 44b da força vertical e na Figura 44c a calibração do momento fletor, sendo que para calibrar o momento fletor foram utilizadas duas células de carga semelhantes.

Figura 44 – Calibração da célula de carga biaxial.



Fonte: O autor (2018).

Portanto, para a calibração foram utilizadas as duas células de carga ilustradas na Figura 45.

Figura 45 – Células de carga utilizadas para calibração das células octogonais.



Fonte: O autor (2018).

Para a calibração das células de carga octogonais, foi aplicada uma carga de 1000 kgf para a calibração da força horizontal com três repetições, uma carga de 1000 kgf para a força vertical com três repetições e um binário de 800 kgf.m para o momento em torno do centro com três repetições. Ao final gerou-se curva de calibração para cada força, apresentadas no Apêndice A e Apêndice B.

Foi feita também a verificação do desvio da linearidade, histerese e repetibilidade para as duas células de carga, sendo que para a primeira o maior desvio da linearidade foi para a força horizontal, 0,83 %; a maior histerese foi para a força vertical, 0,88 %; por fim o maior desvio de repetibilidade foi para o momento, 1,45 %. Já para a segunda o maior desvio da linearidade foi para o momento fletor, 0,77 %; a maior histerese foi para a força horizontal, 0,76 %; já o maior desvio de repetibilidade foi para a força horizontal, 0,91 %.

Quando se aplica puramente a carga horizontal, por exemplo, era de se esperar que os sensores que medem as forças verticais e momento não apresentassem deformação alguma, porém não é isso que acontece, ou seja, para cada tipo de carga que for aplicada a leitura das demais apresentará um pequeno valor, isso é a interferência entre canais. Para fazer as compensações que considerem essas cargas induzidas foi utilizada a matriz de compensação de *crosstalk* conforme metodologia de Goedel (2006).

As equações finais de cada célula de carga com compensação de *crosstalk* estão também no Apêndice A e Apêndice B.

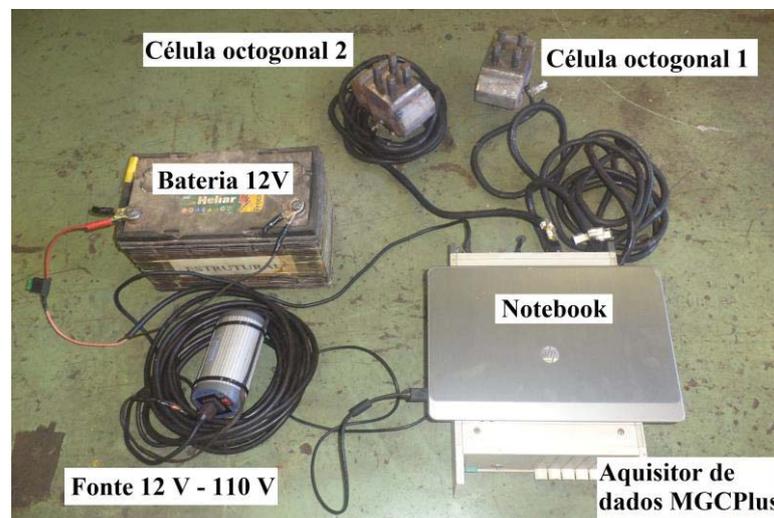
3.1.4 Sistema de medição

A leitura dos dados coletados foi visualizada em tempo real por meio de um gráfico tempo-força, mas também foi gravada em um arquivo de medição para análises posteriores, sendo que a taxa de coleta de dados utilizada foi de 50 Hz.

Portanto, para efetuar a leitura e armazenamento das informações das forças horizontal e vertical geradas por cada anel octogonal, foi utilizado um sistema de aquisição de dados da HBM.

Na Figura 46 pode ser visto o aquisitor de dados MGC Plus, um equipamento voltado para testes de laboratório, mas que também pode ser utilizado a campo com devidos cuidados, principalmente pelo fato de o mesmo não receber proteção IP67. Também fazem parte do sistema de medição o notebook e a bateria 12V com conversor de tensão para 110V para alimentar o MGC Plus.

Figura 46 - Sistema de medição.



Fonte: O autor (2018).

Portanto, o aquisitor de dados descrito anteriormente está ligado via comunicação USB a um notebook onde está instalado o *software* de controle do aquisitor denominado *catmanAP* também da HBM. No momento da coleta também foi possível acompanhar em um gráfico as forças que estão sendo medidas, sendo essa uma boa ferramenta para detectar possíveis falhas no sistema de medição no exato momento em que ela acontece.

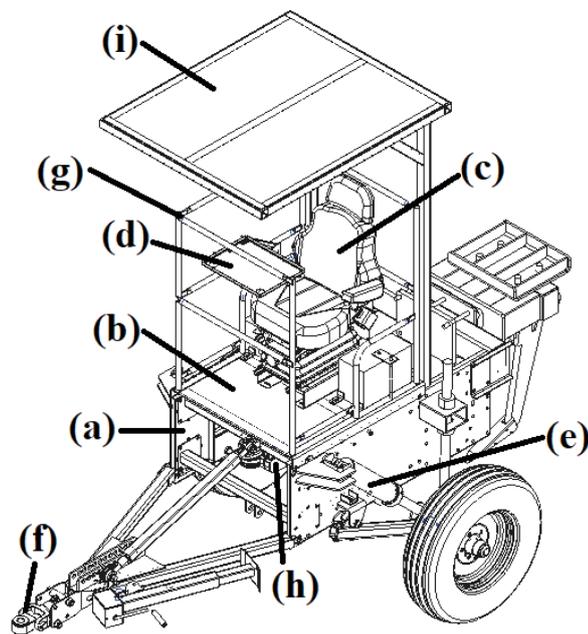
Cada medição efetuada no experimento gerou um arquivo que posteriormente foi processado para efetuar as avaliações estatísticas pertinentes.

3.1.5 Carro dinamométrico

Para efetuar a coleta dos dados de força horizontal e força vertical atuantes em cada haste foi utilizado um carro dinamométrico da empresa Stara. O mesmo foi rebocado por um trator de 110 CV.

O carro dinamométrico ilustrado na Figura 47 é composto por um chassi de chapas e tubos de aço (Fig. 47a) com uma plataforma de operação (Fig. 47b) montada sobre o mesmo. Nesta plataforma está o assento (Fig. 47c) para acomodar o operador do sistema de medição, sendo que para a visualização em tempo real dos dados da medição o assento conta com uma base de apoio (Fig. 47d) para acomodar o notebook. Já o sistema de aquisição de dados e a bateria 12V para alimentar o sistema também está alocado sobre a plataforma de operação ao lado do assento.

Figura 47 – Carro dinamométrico.

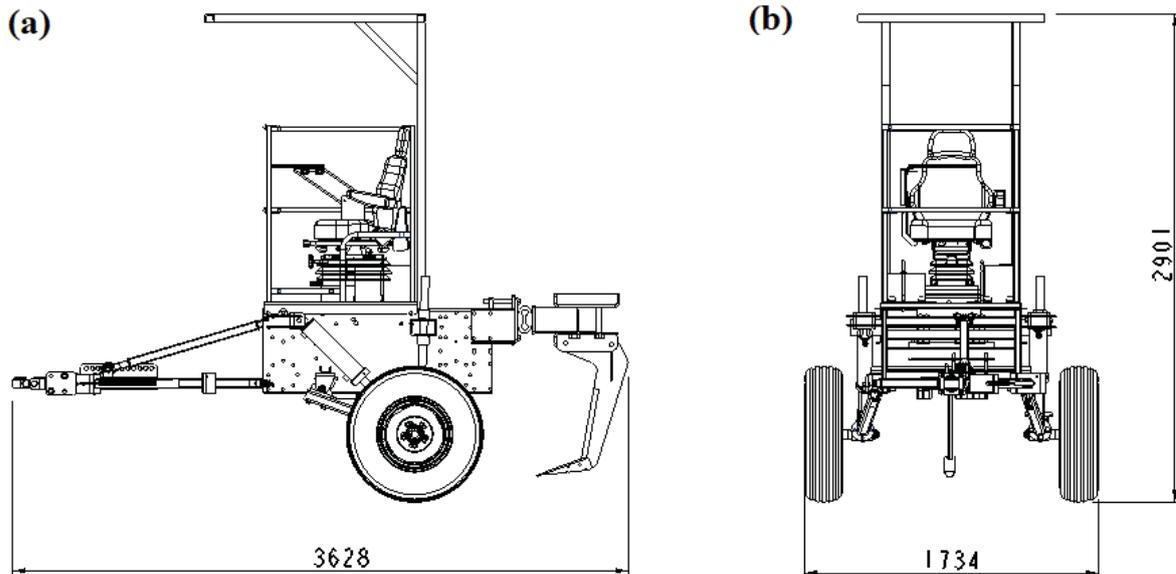


Fonte: O autor (2017).

O sistema de levante (Fig. 47e) do carro é composto por dois rodados munidos de dois atuadores hidráulicos montados no sistema cilindro escravo, isso para que o veículo suba e desça de forma simétrica em ambos os lados. Já a tração do veículo se dá pelo cabeçalho (Fig. 47f), este com tirante regulável para nivelar o carro. A fim de proporcionar segurança ao operador do equipamento uma proteção (Fig. 47g) foi montada na plataforma. Por fim abaixo da plataforma está um sistema para alocação de lastros (Fig. 47h), isso para aumentar a massa total do veículo para facilitar a penetração inicial das hastes no solo, uma vez que a massa total do carro dinamométrico não seria suficiente. Ainda como dispositivo de segurança para o operador foi montada uma capota (Fig. 47i).

Na Figura 48 pode ser visto o carro dinamométrico em vista lateral (Fig. 48a) e vista posterior (Fig. 48b) com as dimensões principais, estando o mesmo em condição de transporte.

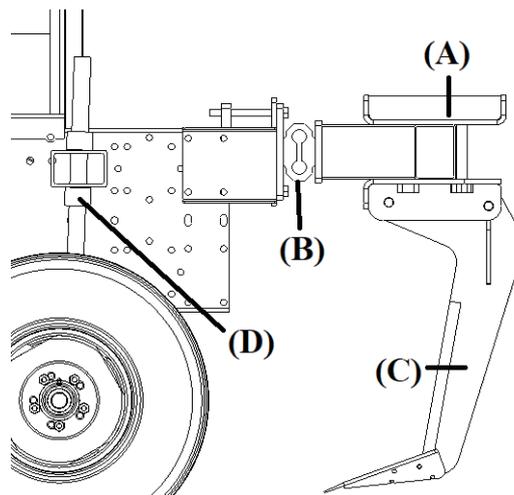
Figura 48 - Vista lateral do carro dinamométrico.



Fonte: O autor (2018).

Na traseira do carro dinamométrico (Figura 49) está o sistema de montagem das amostras do experimento, sendo que para tal foi designado um conjunto de chapas e tubos de aço (Fig. 49A), no qual são montadas as células de carga (Fig. 49B) (lado a lado) e uma amostra de haste (Fig. 49C) por vez. O nível de profundidade que a haste atingirá no solo é regulado por meio de uma barra roscada com porcas (Fig. 49D) montada em cada rodado.

Figura 49 – Montagem da haste e célula de carga.

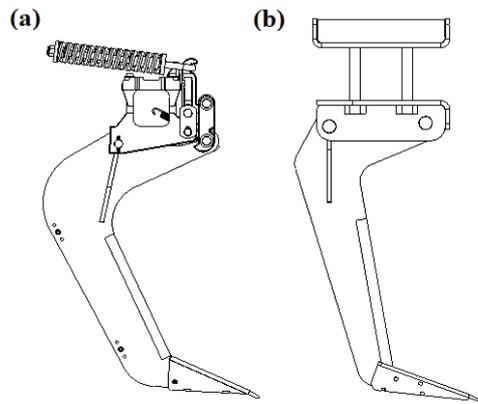


Fonte: O autor (2018).

Como visto na Figura 49, a haste está sem o mecanismo de desarme automático, sendo que o mesmo não foi utilizado em nenhuma das amostras, pois o fato de as molas do desarme se comprimirem, poderiam vir a alterar os ângulos de ataque das hastes no solo. Na Figura 50

está uma representação de um conjunto haste e desarme automático (Fig. 50a) e ao lado a simplificação feita para os experimentos deste trabalho (Fig 51b).

Figura 50 – Simplificação no conjunto haste.



Fonte: O autor (2018).

O equipamento utilizado para efetuar os experimentos de campo, ou seja, medição de força vertical e horizontal, é constituído, portanto, da unidade motora e do carro dinamométrico munido do sistema de medição, células de carga e haste/ponteira como ilustrado na Figura 51.

Figura 51 – Equipamento utilizado para os experimentos de campo.



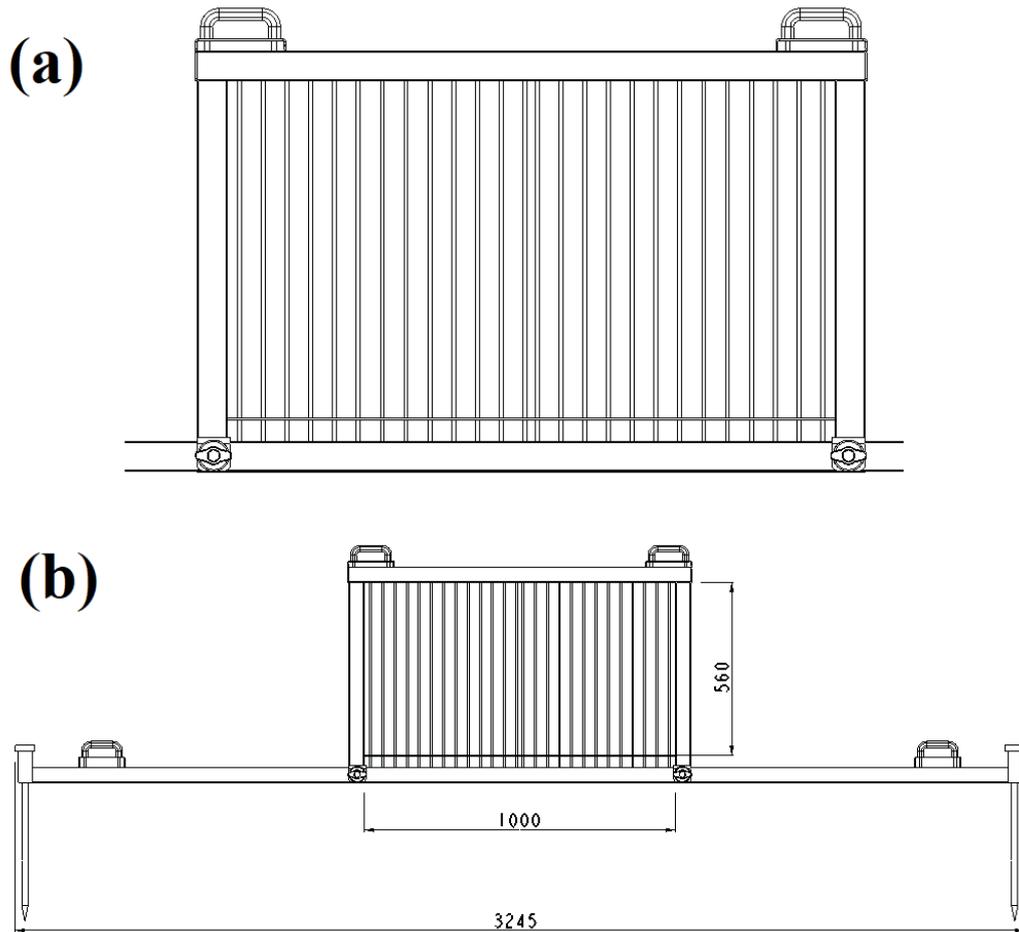
Fonte: O autor (2018).

3.1.6 Perfilômetro

Para efetuar as medições de área de elevação de solo foi fabricado um perfilômetro mecânico de varetas cujo projeto pode ser visto na Figura 52. O dimensionamento do perfilômetro, bem como suas características operacionais foram baseadas em SOUZA (1989), LANÇAS (1987) e semelhante ao utilizado por KLEIN (1990).

O perfilômetro possui 26 varetas de medição (Fig. 52a), com uma distância de 20 mm entre cada vareta, exceto nas duas varetas centrais que estão espaçadas de 10 mm. O equipamento tem uma área útil de medição de 560 x 960 mm e uma massa total de 45 kg (Fig. 52b). Nas extremidades da base do perfilômetro estão duas hastes metálicas que são utilizadas para fixar o sistema ao solo (Fig. 52b).

Figura 52 – Perfilômetro mecânico de varetas.



Fonte: O autor (2018).

Após posicionar o equipamento sobre a área a ser medida as 26 varetas são liberadas e descrevem o perfil do solo, sendo que os valores são visualizados na escala graduada com resolução de 5 mm que está atrás destas varetas como mostrado na Figura 53.

Figura 53 – Escala para medição da área de elevação de solo.

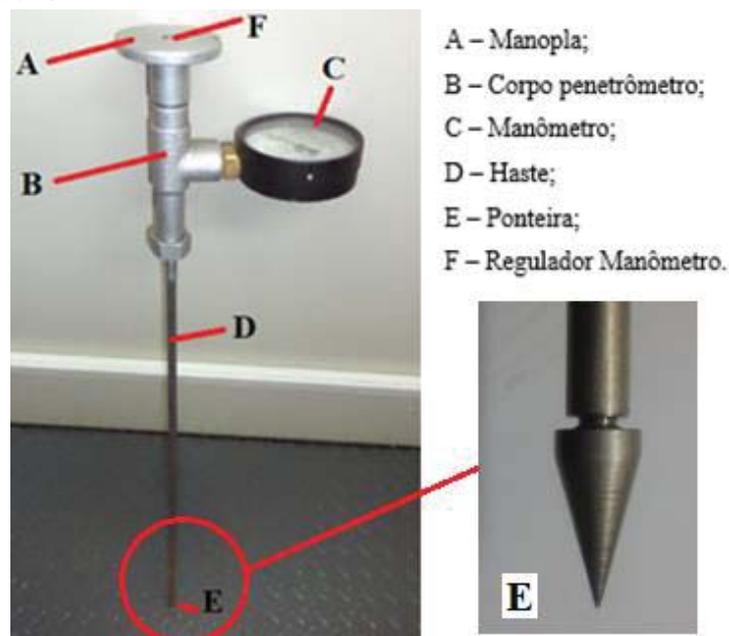


Fonte: O autor (2018).

3.1.7 Penetrômetro

Para verificar os níveis de compactação do solo na área dos experimentos, foi utilizado um penetrômetro que possui funcionamento hidromecânico, sendo que sua utilização é simples, porém os dados não ficam registrados, sendo mostrados em um visor analógico, tendo que ser anotados. O penetrômetro tem um fundo de escala de 100 kgf/cm² (aprox. 10 Mpa). As partes constituintes do penetrômetro estão na Figura 54, com destaque para a ponteira cônica padronizada.

Figura 54 – Penetrômetro.



Fonte: O autor (2017).

3.2 Métodos

Será descrito como foi conduzido o experimento, quais tratamentos serão utilizados, como ficará o delineamento experimental, como foi feita a medição da resistência do solo à penetração, a medição da área de elevação de solo e os cálculos de força e potência média na barra de tração. E, ao final, como foi conduzida a análise estatística.

3.2.1 Tratamentos

O experimento foi realizado utilizando diferentes geometrias de haste/ponteira de um descompactador de solo (H1, H2, H3, H4 e H5), sendo que das cinco hastes estudadas, quatro delas possuem geometria reta inclinada (H1, H2, H3, H4), uma das mais utilizadas nos modelos de subsoladores e escarificadores comerciais. Já a haste com inclinação lateral (H5), que não está muito difundida no Brasil, servirá como ferramenta de pesquisa com o intuito de poder homologar um novo conceito de haste para a agricultura brasileira.

Para cada haste foram empregadas duas velocidades de deslocamento, 3,0 e 6,0 km/h.

Foram utilizadas as profundidades de trabalho de 300 e 400 mm para cada conjunto de haste ponteira, sendo que a variação da profundidade foi feita variando o nível de altura do carro dinamométrico em relação ao solo.

As velocidades de trabalho foram definidas com base nas especificações das máquinas oferecidas no mercado, bem como a profundidade de trabalho de 300 mm que é a profundidade típica de uma escarificação, empregando-se ainda uma profundidade de subsolagem de 400 mm para comparação de forças, uma vez que muitas indústrias usam esta profundidade como referência máxima para seus implementos.

A área dos experimentos foi dividida no número de parcelas suficientes para atender os três fatores em estudo (haste, velocidade e profundidade), sendo que apesar de ter sido utilizado apenas uma haste por vez montada no carro dinamométrico, foi necessário considerar a largura de passagem do trator, uma vez que ele causa compactação no solo em cada medição.

3.2.2 Delineamento experimental

A área experimental foi delineada em 20 parcelas cada uma contendo 20 metros, foram, portanto, 20 tratamentos distribuídos inteiramente ao acaso conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Esquema experimental.

20 metros	20 metros
H1P2V1	H1P2V2
H2P1V1	H2P1V2
H3P1V1	H3P1V2
H4P2V1	H4P2V2
H5P1V1	H5P1V2
H1P1V1	H1P1V2
H2P2V1	H2P2V2
H3P2V1	H3P2V2
H4P1V1	H4P1V2
H5P2V1	H5P2V2

Fonte: O autor (2018).

3.2.3 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi determinada antes da instalação do experimento, ou seja, antes de efetuar a descompactação do solo, sendo utilizado o penetrômetro descrito no item 3.1.7. Foram efetuadas 20 medições em toda a área a ser utilizada, ou seja, uma medição para cada tratamento, medições feitas na camada de 100 mm, 200 mm, 300 mm e 400 mm, de modo que as medições coincidisse com a profundidade de trabalho utilizada no experimento.

O penetrômetro permite uma verificação de camada compactada de até 500 mm, sendo que foi feita uma marcação na haste do equipamento de 100 em 100 mm para auxiliar o registro das leituras no momento da inserção do mesmo no solo. O equipamento fornece as medições na unidade de kgf/cm² ou Psi, sendo que as mesmas foram convertidas para MPa.

Solos oriundos de cultivo sob o sistema de plantio direto tendem a sofrer uma modificação na estrutura física devido ao intenso tráfego de máquinas cada vez maiores e mais pesadas, principalmente no que diz respeito a seu nível de compactação, afirmação apoiada nos trabalhos de Klein (1990), Reichert et al. (2007) e Navarini (2010). Portanto foi esse tipo de solo escolhido para os experimentos deste trabalho, ou seja, uma área sob cultivo em sistema de plantio direto. Portanto as medições de resistência do solo a penetração vão comprovar os efeitos negativos que esse tráfego de máquinas causa nos atributos físicos do solo, no caso em questão, o aumento da compactação do mesmo.

As 20 medições de resistência do solo à penetração foram efetuadas na área utilizada para os experimentos como mostrado na Figura 55.

Figura 55 – Pontos de medição de resistência do solo a penetração.



Fonte: O autor (2018).

As medições de resistência do solo à penetração feitas com o penetrômetro, foram realizadas nos pontos de passagem do carro dinamométrico nos 20 tratamentos do experimento. Como visto na Figura 56, a medição foi feita instantes antes da passagem da haste e no mesmo ponto das medições que foram feitas para a verificação da área de elevação de solo utilizando o perfilômetro de varetas.

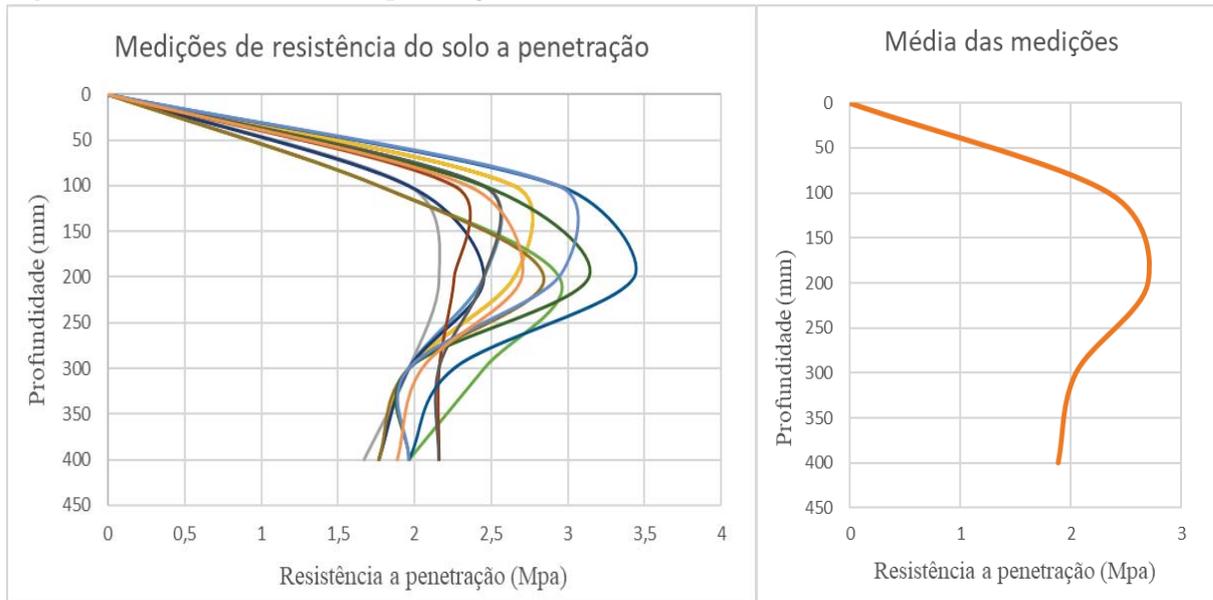
Figura 56 – Medição da resistência do solo a penetração.



Fonte: O autor (2018).

Na Figura 57 estão apresentados os resultados das medições e uma média de todas as medições. Verifica-se que a camada compactada é rasa, localizando-se entre 100 e 250 mm, concordando com a afirmação de Weill (2015).

Figura 57 – Resistência do solo a penetração.



Fonte: O autor (2018).

Ao avaliar os resultados das medições percebe-se que o nível de compactação ultrapassa o limite de 2,0 Mpa o que pode começar a se tornar prejudicial ao crescimento das raízes das plantas segundo Raper (2005). Beutler et al. (2008) também afirmam em sua pesquisa que para esse nível de compactação a produtividade da soja começa a ser reduzida.

Percebe-se que a camada de solo compactada está de 100 a 250 mm de profundidade. Logo a subsolagem deve ser feita, segundo Lanças (2002), de 50 a 100 mm abaixo dessa camada e segundo Weill (2015) 50 mm abaixo, sendo que nos experimentos deste trabalho se trabalhou em profundidade de 300 e 400 mm, respeitando essa recomendação.

3.2.4 Força horizontal e força vertical

A determinação dos dados de força horizontal e vertical foi adquirida com a soma dos sinais de cada uma das duas células de carga octogonais descritas no subitem 3.1.3. Foi utilizada uma taxa de aquisição de dados de 50 Hz como mencionado anteriormente, sendo que esses dados foram manuseados através do software de pós processamento da HBM (catmanAP) juntamente ao programa Microsoft Excel, onde foram extraídos os dados de força horizontal média, força horizontal máxima e força vertical média.

3.2.5 Área de solo elevada

Para efetuar os cálculos da área de solo elevada por cada haste foi utilizado o perfilômetro de varetas, sendo que foi feita a medição do perfil do solo antes e após a descompactação. A diferença entre as duas medições descreve a elevação vertical do solo, ou seja, sua expansão volumétrica.

O perfilômetro foi posicionado sobre a área a ser medida e as varetas descreveram o perfil do solo. A posição de cada vareta foi registrada por meio de fotografia utilizando uma câmera digital SONY de 14,1 Mega pixels sendo posteriormente transcrita em uma planilha Excel para que a área de elevação de solo fosse calculada.

3.2.6 Velocidade média de deslocamento

A velocidade de deslocamento foi monitorada no painel do trator utilizado no experimento, sendo que foram feitos testes prévios para calibrar a velocidade de deslocamento relacionando com a rotação do motor do trator e a marcha a ser utilizada.

3.2.7 Potência média na barra de tração

Para o cálculo da potência na barra de tração foi utilizada a força horizontal média e a velocidade média de deslocamento, conforme Equação 1.

3.2.8 Análise estatística

O experimento foi conduzido em um delineamento experimental seguindo um esquema fatorial de 5x2x2 com dez repetições dentro de cada tratamento, sendo que os tratamentos foram distribuídos ao longo da área experimental inteiramente ao acaso como dito anteriormente no subitem 3.2.2.

Como ferramenta estatística foi utilizado o software livre Sisvar Versão 5.6 aplicando a ANOVA, sendo que para comparação das médias foi utilizado o teste Tukey a 5 % de significância.

A análise estatística foi desenvolvida para que se avalie a interação dos fatores principais de tipos de geometria de haste (Haste 1, Haste 2, Haste 3, Haste 4, Haste 5), com os fatores de velocidade (3km/h e 6km/h), bem como de profundidade de trabalho da haste (300 mm e 400 mm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar a análise estatística dos dados coletados durante os testes de campo, foi utilizada como ferramenta estatística o software Sisvar. O experimento permitiu comparações da demanda de força horizontal média e máxima (força de tração), força vertical média e área de elevação de solo em cinco hastes subsoladoras (H1, H2, H3, H4, H5), operando em dois níveis de velocidade de avanço (3,0 km/h e 6,0 km/h) e em duas profundidades de trabalho (300 mm e 400 mm), com 10 repetições para cada tratamento. O nível de significância mínimo escolhido foi de 5 % para todas as análises, com a análise de variância utilizando o teste Tukey. A aplicação da ANOVA apontou que, para as condições nas quais o experimento foi realizado, houve diferença significativa entre as hastes estudadas, entre as velocidades de avanço, bem como entre as profundidades de trabalho. Também foram encontradas interações significativas na interação haste x velocidade, haste x profundidade e haste x velocidade x profundidade. Na área de elevação de solo não ocorreu diferença estatística significativa. Já na avaliação visual da incorporação da cobertura vegetal do solo foram verificadas diferenças.

O sistema de unidades utilizado foi o MKS Técnico (MKS*).

4.1 Força média horizontal

Os dados coletados e analisados referem-se à porção central de 10 metros de cada unidade experimental, descartando-se as cabeceiras, portanto, ou seja, 5 metros em cada lado. Esta porção central, por sua vez, foi subdividida em 10 unidades tomando-se a média aritmética de cada unidade, consideradas, portanto como repetições.

A Tabela 6 apresenta a análise estatística geral. Pode-se observar que as três variáveis estudadas foram estatisticamente diferentes entre si ao nível de 5 % de significância, com ênfase para a variável profundidade de trabalho, concordando com a grande maioria dos trabalhos técnicos existentes na literatura estudada.

Tabela 6 - Análise de Variância das três variáveis deste estudo para a força horizontal média.

FV	GL	SQ	QM	Fc
Haste	4	2128275.36	532068.84	16.4
Velocidade	1	576072.31	576072.31	17.76
Profundidade	1	4383227.53	4383227.53	135.13
erro	193	6259928.13	32434.86	
Total corrigido	199	13347503.34		

...Tabela 6 - Análise de Variância das três variáveis deste estudo para a força horizontal média (continuação).

CV (%) = 17,89

Média geral: 1006,7 Número de observações: 200

Efeito das Hastes na Força Horizontal (kgf)

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
H2	891.03	a
H5	939.89	a
H3	941.56	a
H4	1115.35	b
H1	1145.69	b

Dms: 110,92

Efeito das Velocidades (kgf)

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
V3 (3 km/h)	953.03	a
V6 (6 km/h)	1060.37	b

Dms: 50,23

Efeito das Profundidades (kgf)

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
P300 (300 mm)	858.66	a
P400 (400 mm)	1154.74	b

Dms: 50,23

Fonte: O autor (2018).

Concordando com Silva et al. (2015), a haste que apresentou a menor força horizontal média na avaliação estatística geral foi a Haste 2, que possui o menor ângulo de ataque da haste ao solo em relação às demais hastes, porém apresentando demandas de força média horizontal estatisticamente iguais a Haste 5 e Haste 3. A Haste 1 apresentou uma alta demanda de força horizontal média, estatisticamente similar a Haste 4, muito provavelmente devido ao alto ângulo de ataque frontal da ponteira.

Para a velocidade de trabalho os resultados são concordantes com Wheeler e Godwin (1996), em cuja pesquisa verificaram que à medida que a velocidade de trabalho aumenta cresce também a força horizontal.

4.1.1 Interação haste x velocidade

Na interação entre as hastes e as velocidades de deslocamento, a análise para a haste e velocidade e a interação haste x velocidade foram estatisticamente significativas ao nível de 5 % de probabilidade de erro, com ênfase para a variável velocidade de avanço.

Embora tendo sido estudado uma velocidade comum ao avanço de subsoladores acoplados à tratores de médio porte (entre 100 e 150 CV de potência), ou seja, ao redor de 3,0 km/h, procurou-se verificar quais efeitos teriam na força de tração quando estes descompactadores de solo fossem tracionados por tratores de maior potência e alcançassem velocidades ao redor de 6,0 km/h. Como afirma Silva et al. (2015), os valores da velocidade para a prática da operação de subsolagem estão na faixa de 2,0 a 6,0 km/h, porém dependem da unidade motora a ser utilizada.

Apenas as hastes 4 e 5 apresentaram diferenças estatísticas em relação à velocidade de avanço conforme dados vistos no Apêndice C, ou seja, à medida que cresceu a velocidade de avanço aumentou também a força horizontal média.

4.1.2 Interação haste x profundidade

A interação haste x profundidade foi estatisticamente significativa ao nível de 5 % de probabilidade. Foi estudada uma profundidade de 300 mm que é aproximadamente onde ocorrem as compactações médias no solo. Como muitas indústrias estão desenvolvendo subsoladores para atuar na profundidade de 400 mm, procurou-se verificar quais efeitos este acréscimo de profundidade teriam na força de tração.

Todas as hastes foram estatisticamente diferentes em relação à profundidade de trabalho, concordando com o estado da arte que afirma haver uma enorme correlação entre a profundidade de trabalho e a força de tração, como os resultados do trabalho de Kichler et al. (2007), ou seja, a força horizontal média aumenta com o aumento da profundidade.

A análise estatística para essa interação encontra-se no Apêndice D.

4.1.3 Interação haste x velocidade x profundidade

Na Tabela 7 está a interação tripla haste x velocidade x profundidade, com ênfase para a análise do desdobramento de haste dentro de cada nível de velocidade x profundidade.

Tabela 7 - Análise de variância haste x velocidade x profundidade (Força horizontal média (kgf)).

FV	GL	SQ	QM	Fc
Haste*Velocidade*Pro erro	4 195	2885171.52 10462331.82	721292.88 53652.98	13.44
Total corrigido	199	13347503.34		

...Tabela 7 - Análise de variância haste x velocidade x profundidade (Força horizontal média (kgf)).
(continuação).

CV (%) = 23.01

Média geral: 1006.7 Número de observações: 200

Análise do desdobramento de Haste dentro de cada nível de: Velocidade - Profundidade

FV	GL	SQ	QM	Fc
Haste /1	4	1247117.72	311779.43	5.81
Haste /2	4	2584991.75	646247.93	12.04
Haste /3	4	394842.41	98710.6	1.84
Haste /4	4	1795455.11	448863.77	8.36
Erro	195	10462331.82	53652.98	

Codificação usada para o desdobramento cod. Velocidade - Profundidade: Velocidade 3 - Profundidade 300; Velocidade 3 - Profundidade 400; Velocidade 6 - Profundidade 300; Velocidade 6 - Profundidade 400.

Velocidade 3,0 km/h – Profundidade 300 mm

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
H3	623.5	a
H5	680.04	a
H2	815.26	a b
H1	862.93	a b
H4	1074.99	b

Velocidade 3,0 km/h – Profundidade 400 mm

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
H2	836.17	a
H4	924.85	a
H5	993.78	a
H3	1280.51	b
H1	1438.36	b

Velocidade 6,0 km/h – Profundidade 300 mm

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
H2	734.92	a
H3	906.54	a
H4	944.11	a
H1	971.49	a
H5	972.89	a

Velocidade 6,0 km/h – Profundidade 400 mm

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
H3	955.72	a
H5	1112.86	a b
H2	1177.8	a b
H1	1309.98	b c
H4	1517.46	c

Dms: 285.3

Fonte: O autor (2018).

Para a configuração de maior demanda de potência do trator, ou seja, maior velocidade

e maior profundidade, a Haste 3 foi a que apresentou a menor demanda energética, enquanto que a Haste 4 apresentou a maior demanda. Na menor profundidade e menor velocidade a Haste 4 também apresentou a maior demanda de força horizontal.

4.2 Força horizontal máxima

O solo agrícola é um meio heterogêneo, razão pela qual ocorre tamanha variabilidade em ensaios de campo. O software de análise de dados apresenta os valores do modo como foram coletados no campo. Faz-se então uma média de resultados aqui denominada Força Média Horizontal.

Para fazer uma análise com propósitos de engenharia de produto busca-se sempre os valores máximos destas forças, de modo a fazer um projeto mecânico com fator de segurança garantido.

Assim, na Tabela 8 estão listados os resultados referentes às máximas forças horizontais verificadas nos experimentos.

Tabela 8 - Força horizontal máxima (kgf).

Haste	Velocidade (km/h)	Profundidade (mm)	Força (kgf)
H1	3,0	300	1082,5
		400	1956,4
	6,0	300	1421,4
		400	1669,4
H2	3,0	300	1262,3
		400	1105,5
	6,0	300	957,4
		400	1743,7
H3	3,0	300	821,1
		400	1842,3
	6,0	300	1174,9
		400	1195,4
H4	3,0	300	1491,4
		400	1133,6
	6,0	300	1214,3
		400	2208,2
H5	3,0	300	1017,9
		400	1443,8
	6,0	300	1349,0
		400	1588,0

Fonte: O autor (2018).

Como já era esperado a máxima força horizontal foi verificada na haste com ponteira alada para a velocidade de 6,0 km/h e profundidade de 400 mm, concordando com Lanças (1987), Sasaki et al. (2005) e Kees (2008).

Para a configuração de máxima profundidade e máxima velocidade a Haste 3 apresentou a menor força horizontal máxima seguida da Haste 5. Portanto o comportamento da força horizontal máxima seguiu o mesmo comportamento da força horizontal média na configuração de máxima velocidade e máxima profundidade.

4.3 Força vertical média

Os dados de forças verticais são importantes pois dão a noção de como a haste está atuando, ou seja, quanto maior a força vertical (puxando a haste para baixo), maior é a tendência da haste se manter dentro do solo. Na Tabela 9 estão apresentados tais dados.

Tabela 9 - Análise de Variância das três variáveis deste estudo para a força vertical média (kgf).

FV	GL	SQ	QM	Fc
Haste	4	785822.33	196455.58	34.18
Velocidade	1	53441.61	53441.61	9.29
Profundidade	1	48612.73	48612.73	8.45
erro	193	1279942.09	6631.82	

Total corrigido 199 1997043.19

CV (%) = 28.24

Média geral: 268.42 Número de observações: 200

Haste

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
H1	153.43	a
H5	256.59	b
H3	296.22	b c
H2	300.50	b c
H4	335.36	c

Dms: 46.69

Velocidade (km/h)

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
V3 (3,0 km/h)	252.07	a
V6 (6,0 km/h)	284.77	b

Dms: 21.14

Profundidade (mm)

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
P300 (300 mm)	252.83	a
P400 (400 mm)	284.01	b

Dms: 21.14

Fonte: O autor (2018).

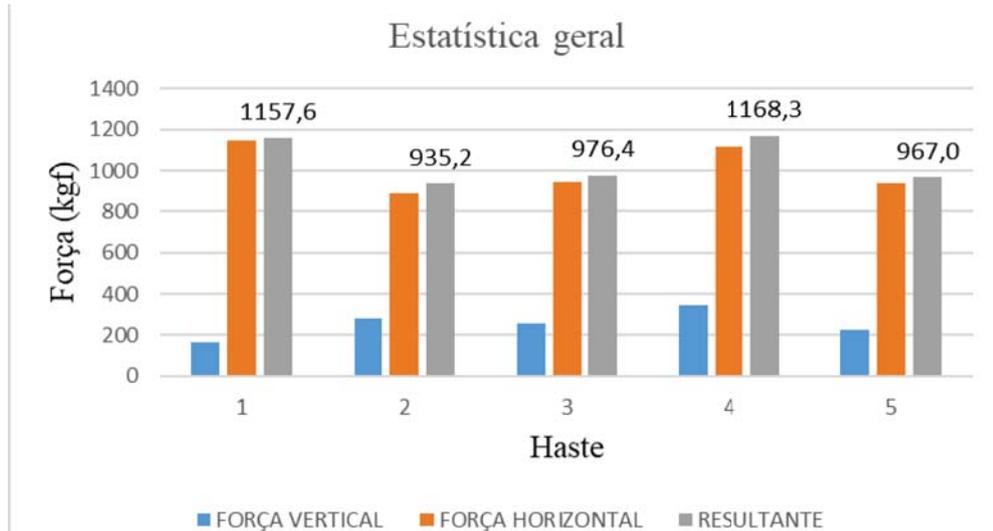
O aumento da velocidade de trabalho também acarretou um aumento da força vertical média (valores positivos para baixo), concordando de Wheeler e Godwin (1996), que dizem que o acréscimo da velocidade causa um aumento da força vertical. Influenciada pela ponteira alada, a Haste 4 apresentou a maior carga vertical média entre todas as hastes estudadas.

Para a profundidade de trabalho também foram verificadas diferenças entre os dois níveis. Portanto a força vertical seguiu a mesma tendência da força horizontal, ou seja, quanto maior a velocidade e profundidade maiores os níveis registrados.

4.4 Força resultante

Existem duas forças atuando na haste no momento da operação de descompactação do solo, a força horizontal e a força vertical, sendo que essas duas forças componentes formam uma força resultante de intensidade e sentido definidos pelas suas componentes. Na figura 58 ilustram-se as forças horizontais e verticais médias bem como as forças resultantes atuantes em cada haste.

Figura 58 – Força horizontal e vertical (kgf), média geral.



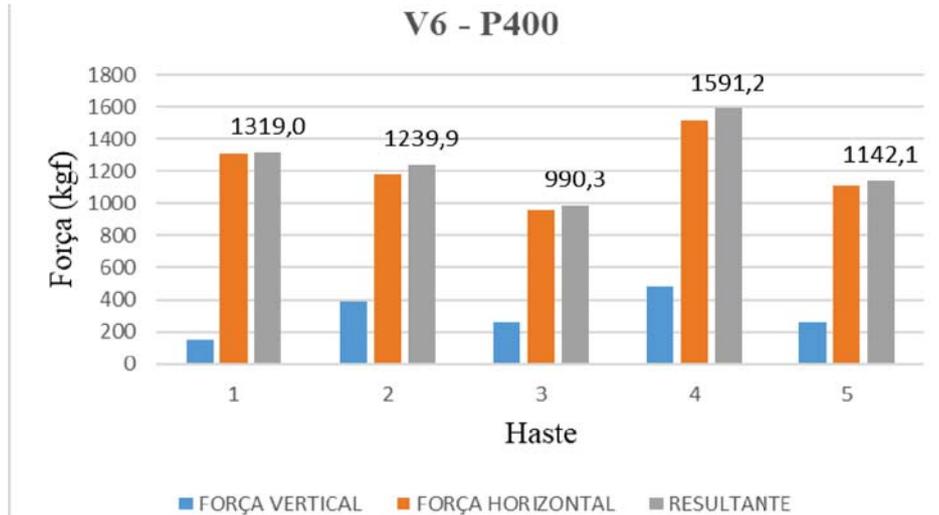
OBS: Os rótulos de dados apresentados no gráfico são dos dados da força resultante.

Fonte: O autor (2018).

Na Figura 59 estão os dados de força horizontal, vertical e resultante para a configuração de maior demanda de força de tração, ou seja, 6,0 km/h e 400 mm de profundidade. Em comparação com os dados gerais percebe-se apenas uma alteração para a configuração de maior demanda energética, onde a haste de menor demanda passou a ser a Haste 3.

Os gráficos das medições de campo das cinco hastes estudadas para esta configuração estão no Apêndice E (Força Horizontal) e Apêndice F (Força Vertical).

Figura 59 – Força média horizontal e vertical (kgf) para 6,0 km/h e 400 mm.



OBS: Os rótulos de dados apresentados no gráfico são dos dados da força resultante.
Fonte: O autor (2018).

Os carregamentos horizontais são diretamente descarregados na barra de tração do trator, enquanto que os carregamentos verticais tendem a puxar o chassi da máquina para baixo descarregando a carga no rodado de transporte que atua também como limitador de profundidade de atuação das hastes, ou seja, a força vertical aumenta a resistência ao rolamento nos mancais do rodado. Logo essa carga gera também um pequeno descarregamento na barra de tração em forma de força horizontal.

A força vertical mantém a haste dentro do solo, sendo que na Haste 4, que possui ponteira alada, essa força foi a maior encontrada, devido a área de contato com o solo ser maior em função das asas da ponteira, discordando dos resultados encontrados por Souza (1989). Já na Haste 1 a força vertical média foi a menor, muito provavelmente devido a ponteira possuir a menor largura entre todas as estudadas.

4.5 Potência na barra de tração

Para o cálculo da potência na barra de tração foi utilizada a configuração de máxima profundidade de trabalho e máxima velocidade de deslocamento, o que teoricamente exigiria a maior demanda do equipamento tratório. Portanto, na Tabela 10 está ilustrado o cálculo de potência média para 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.

Tabela 10 - Potência média para 6,0 km/h e 400 mm.

Haste	Potência Média (CV)
H1	29,1
H2	26,2
H3	21,2
H4	33,7
H5	24,7

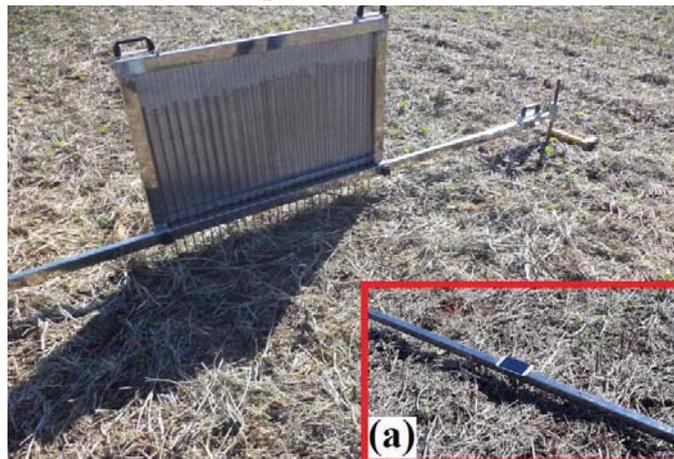
Fonte: O autor (2018).

Para a máxima profundidade de trabalho e máxima velocidade de deslocamento, a potência média na barra de tração apresentou resultados que mostram que a haste com ponteira alada é a que apresenta a maior demanda, concordando com Kees (2008), que afirma que hastes com ponteiros com asas requerem mais potência para serem tracionadas.

A Haste 3 foi a que apresentou a menor potência média nessa configuração, já a Haste 1, comercial, apresentou uma demanda 37 % maior e a Haste 4 uma demanda energética 58 % maior. A Haste 5 apresentou uma demanda de potência 15 % menor que a haste comercial.

4.6 Área de elevação de solo

O suporte do perfilômetro de varetas, como ilustrado na Figura 60, foi nivelado em todos os tratamentos, de modo a retratar a posição horizontal do solo. Para o nivelamento do perfilômetro foi utilizado um aplicativo de celular (a).

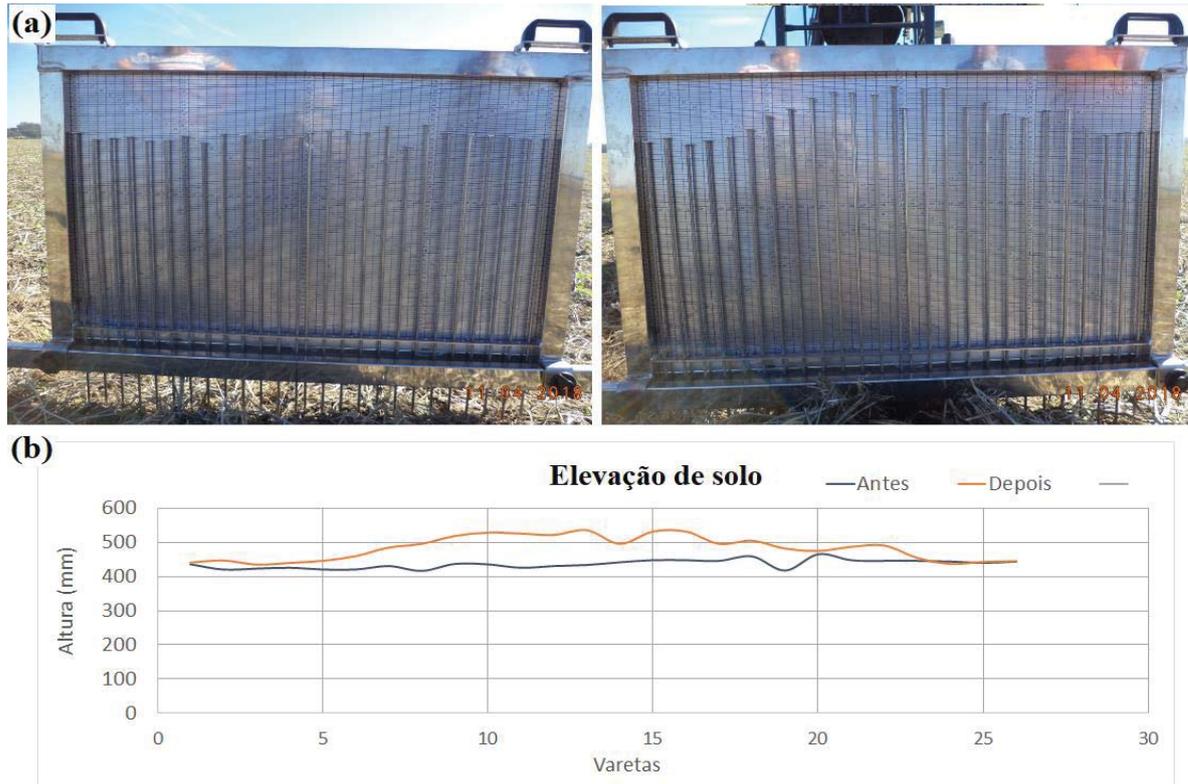
Figura 60 – Posicionamento e nivelamento do perfilômetro de varetas.

Fonte: O autor (2018).

Na Figura 61a está a sequência de medições feitas para a verificação da área de elevação vertical de solo para um dos tratamentos, Haste 1 a 3,0 km/h e 400 mm. Tanto a medição do perfil original do solo quanto a medição pós descompactação foram feitas no

mesmo ponto com o perfilômetro de varetas. Na Figura 61b, abaixo da ilustração das medições com o perfilômetro, está a digitalização dos dados que gerou um gráfico onde foi calculada a área de elevação de solo. A área entre a curva em vermelho denominada “Depois” e a curva em azul denominada “Antes” define a área de elevação vertical de solo para esse tratamento.

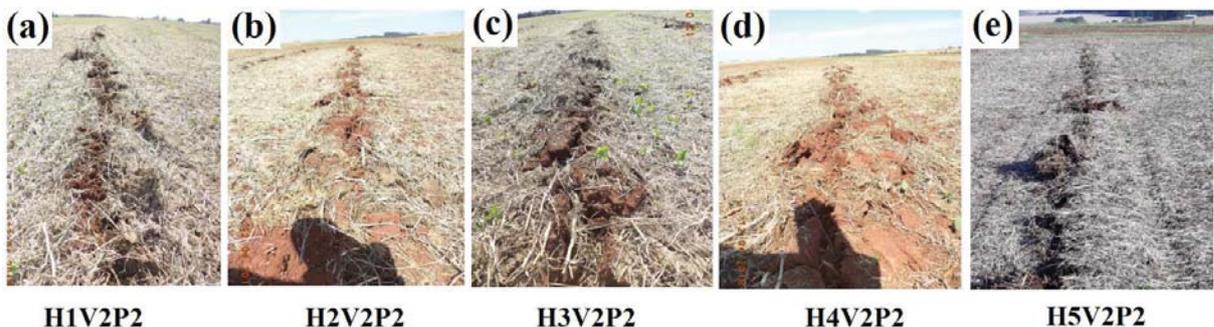
Figura 61 - Haste 1, Velocidade 3,0 km/h e Profundidade 400 mm.



Fonte: O autor (2018).

Na Figura 62 pode ser visto o perfil de solo após a descompactação para cinco tratamentos estudados, ou seja, as cinco hastes na maior velocidade e maior profundidade.

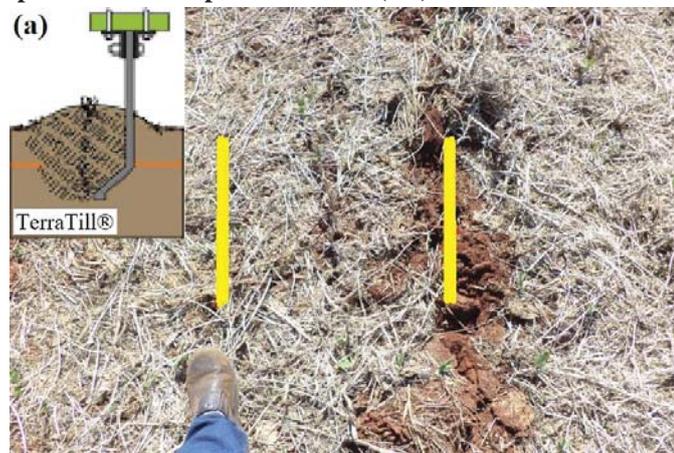
Figura 62 – Avaliação visual do distúrbio superficial de solo (incorporação da cobertura vegetal), para 6,0 km/h e 400 mm.



Fonte: O autor (2018).

Ao observar a Figura 62e verifica-se que a Haste 5 (H5) foi a que promoveu o menor distúrbio no solo, mantendo a cobertura vegetal original da superfície. A explicação para tal fenômeno pode ser vista na Figura 63. O fato de a ponteira estar desencontrada do ponto da entrada da haste no solo faz com que não haja um canal livre vertical para a incorporação de matéria orgânica superficial no solo. A posição da linha amarela no centro do sulco mostra onde a haste penetrou no solo e a linha amarela mais à esquerda mostra onde se encontra a ponteira da haste dentro do solo. Porém no caso da Haste 5 a parte inclinada está dentro do solo da superfície até o fundo do sulco, diferente da Figura 64a.

Figura 63 – Distúrbio superficial de solo para a Haste 5 (H5).



Fonte: O autor (2018).

Concordando com Kees (2008) e depois Weill (2015), a haste com inclinação lateral foi a que apresentou o menor distúrbio da superfície do solo. Tal afirmação também está apoiada em Barr et al. (2016), que afirmou que haste com inclinação lateral, quando comparada com haste reta, apresentaram menos distúrbio superficial do solo. Na Figura 64 pode ser visto que para a Haste 4 (H4) com ponteira alada o distúrbio de solo foi maior.

Figura 64 – Distúrbio superficial de solo na Haste 4 (H4).



Fonte: O autor (2018).

Porém, apesar de ser visualizada uma diferença visual no perfil de solo após a

mobilização, não foram observadas diferenças estatísticas a um nível de significância de 5 %, concordando com Bellé (2014). Na Tabela 11 está a estatística geral para a área de elevação de solo após a descompactação. A ausência de diferenças pode ser explicada por um coeficiente de variação um pouco elevado, acima de 30 %, o que é aceitável em trabalhos de experimentação agrícola.

Tabela 11 – Análise de variância para área de elevação de solo (m²), estatística geral.

FV	GL	SQ	QM	Fc
Haste	4	0.000247	0.000062	0.35
Velocidade	1	0.000053	0.000053	0.3
Profundidade	1	0.000032	0.000032	0.18
erro	13	0.002294	0.000176	
Total corrigido	19	0.00262		
CV (%) = 33.61				
Média geral: 0.039		Número de observações:		20
<u>Hastes</u>				
Tratamentos		Médias	Resultados do teste	
H3		0.0342	a	
H1		0.0383	a	
H2		0.0395	a	
H5		0.0403	a	
H4		0.0451	a	
Dms: 0.0295				
<u>Velocidades (km/h)</u>				
Tratamentos		Médias	Resultados do teste	
V3 (3,0 km/h)			0.0378	a
V6 (6,0 km/h)			0.0411	a
Dms: 0.0128				
<u>Profundidades (mm)</u>				
Tratamentos		Médias	Resultados do teste	
P400 (400 mm)			0.0382	a
P300 (300 mm)			0.0407	a
Dms: 0.0128				

Fonte: O autor (2018).

Já na interação profundidade x velocidade, foi verificada diferença estatística significativa a um nível de 5 % de significância. Um fato curioso observado foi que na profundidade de 300 mm a maior elevação de solo ocorreu para a velocidade 6,0 km/h, enquanto que para a profundidade de 400 mm a velocidade de 3,0 km/h foi a que apresentou a maior área de elevação de solo.

5 CONCLUSÕES

A ponteira tem muito mais influência nas forças atuantes sobre o conjunto haste/ponteira, visto que a ponteira, por estar mais à frente, enfrenta o solo totalmente compactado, já a haste, por sua vez, já encontra o solo mobilizado. Baseado nessa conclusão, ter uma faca de corte intercambiável à frente da haste, justifica-se apenas pelo fato de poder substituí-la devido ao desgaste com o atrito do solo, evitando a substituição de toda a haste.

Em relação à força média horizontal, conclui-se que para a configuração de maior demanda de esforço tratório, ou seja, 6,0 km/h e 400 mm, a Haste 3 foi a que apresentou o melhor desempenho.

A demanda de potência na Haste 3 foi 28 % menor que na Haste 1 (comercial), já a Haste 2 demandou 10 % menos potência que a Haste 1. Portanto nota-se uma grande melhora nas hastes protótipo em relação a haste comercial escolhida para estes experimentos.

Influenciada pela ponteira alada, a Haste 4 apresentou a maior carga vertical (puxando a haste para baixo) entre todas as hastes estudadas, a Haste 1 a menor.

Como já era esperado, a máxima força horizontal foi verificada na haste com ponteira alada para a velocidade de 6,0 km/h e profundidade de 400 mm.

Apesar de não serem encontradas diferenças estatísticas entre as áreas de elevação de solo entre as hastes, verificou-se que a Haste 5 foi a que promoveu o menor distúrbio do solo na superfície, mantendo grande parte da cobertura orgânica original. Por outro lado, observou-se que a haste H4 com ponteira alada apresentou o maior distúrbio de solo.

Aliando a menor incorporação da cobertura vegetal, com uma redução de 15 % de demanda de potência em relação a haste comercial (H1), a Haste 5 apresentou os melhores resultados de uma forma geral.

5.1 Trabalhos futuros

Em decorrência dos resultados encontrados nesta pesquisa, sugere-se dar sequência nos estudos com a configuração da haste H5, variando os ângulos de inclinação lateral da mesma e fazendo testes com inclinações da pá móvel traseira, que neste estudo manteve-se paralela à haste e seu efeito não foi estudado.

Para complementar este estudo sugere-se um experimento agrônomo onde se realizem as análises de área de solo descompactada, empolamento e conversão energética (força de tração pela área de solo descompactada).

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA IBGE NOTÍCIA. **PIB avança 1,0 % em 2017 e fecha ano em R\$ 6,6 trilhões.** Publicado em 10/04/2018. Disponível em <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/20166-pib-avanca-1-0-em-2017-e-fecha-ano-em-r-6-6-trilhoes.html>. Acesso em: Maio 2018.

AGRA, N. G., SANTOS, R. F. D. **Agricultura brasileira: situação atual e perspectivas de desenvolvimento.** Anais do XXXIX Congresso da Sociedade brasileira de Economia e Sociologia Rural. Recife, PE, Brasil, 2001.

BARR, J. B.; DESBIOLLES, J. M. A.; FIELKE, J. M. **Minimising soil disturbance and reaction forces for high speed sowing using bentleg furrow openers.** Biosystems Engineering - ELSEVIER, v. 151, p. 53-64. November 2016.

BECK, J. C. P. **Projeto, Construção e análise de Células de carga de Placa e de Anel.** Dissertação de Mestrado, PPGEMM – UFRGS, 1983.

BELLÉ, M. P.; ALONÇO, A. D. 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*, v. 18, p. 551-558, 2014.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. D.; CENTURION, M. A. P. D. C.; LEONEL, C. L.; FREDDI, O. D. S. **Compactação do solo por tráfego de máquinas e intervalo hídrico ótimo na produtividade de soja.** *Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.43, n.11, p. 1591-1600, Novembro, 2008.

BORDIGNON, J. **Projeto, Construção e validação de transdutores para medição de esforços em semeadoras-adubadoras.** Dissertação para obtenção do título de mestre em Engenharia. UFRGS, Porto Alegre – RS. Junho, 2005.

BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. **Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico.** *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.6, n.2, p.331-336, 2011.

CAMARA, F. T. D. **Desempenho operacional de uma máquina para preparo reduzido do solo.** Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal. 65 p., Julho, 2006.

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

CAMARGO de, O. A.; ALLEONI, L.R.F. **Considerações para manejo do solo.** 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/C7/Index.htm>. Acesso em: 16/11/2016.

CAMARGO de, O. A.; ALLEONI, L.R.F. **Efeitos da compactação em atributos do solo.** 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <<http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C4/Comp4.htm>>. Acesso em: 16/11/2016.

CARBONERA, L. **Comparação entre diferentes penetrômetros para diagnósticos de compactação de solo.** Projeto de iniciação científica. Esalq – USP. Piracicaba – SP, 2007.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. **Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.41, n.11, p.1663-1674, Novembro, 2006.

COMPAGNON, A.M. ; FURLANI, C.E.A. ; OSHIRO, K.A. ; SILVA, R.P. ; CASSIA, M.T. **Desempenho de um Conjunto Trator-Escarificador em Dois Teores de Água do Solo e Duas Profundidades de Trabalho.** Engenharia na Agricultura, Viçosa - MG, V.21 N.1, p. 52-58, Janeiro/Fevereiro, 2013.

DENARDIN, J. E.; SANTI, A.; FAGANELLO, A.; D'AGOSTINI, L. R. **Conservação do solo e da água no Brasil: Preceitos e ações no ensino, pesquisa e extensão.** Boletim Informativo da SBCS, Maio – Agosto, 2014.

DRESHER, M. S.; ELTZ, F. L. F.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; DRESHER, G. L. **Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em latossolo vermelho sob plantio direto.** *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 36, p. 1836-1844, 2012.

EWEN, B. M. **Effect of paraplowing on soil properties and crop yield under irrigated management.** A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the Department of Soil Science, University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 2015.

FERNANDES, B. B. **Efeito do teor de água na avaliação da compactação do solo causada pelo tráfego agrícola e seu reflexo nos atributos físicos do solo.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Ciências Agrônômicas - Campus de Botucatu 87 p., 2015.

FILHO, A. C.; BONACIM, J. L. G.; CORTEZ, J. W.; CARVALHO, C. **Mobilização de um latossolo vermelho acriférrico em função de sistemas de preparo do solo.** *Biosci. J.*, Uberlândia, v. 24, n. 3, p. 1-7, Julho-Setembro, 2008.

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

FREITAS, B. F. D. **Projeto de máquina de preparo de solo com “paraplow rotativo” para modernização da agricultura familiar.** Relatório final de iniciação científica. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 20 p., Julho, 2014.

GAMERO, C.A. **Desempenho operacional de um subsolador de hastes com curvatura lateral (“PARAPLOW”), em função de diferentes velocidades de deslocamento e profundidade de trabalho.** 2008. 72 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2008.

GIRARDELLO, V.; AMADO, T.; ERTEL, C.; GARLET, L. **Benefícios do tráfego controlado de máquinas.** *A Granja*, Edição 785, p. 34-37, Maio, 2014.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; MIZIEWICZ, P.; SMITH, E. K. **Tráfego controlado de máquinas agrícolas: a experiência inglesa e perspectivas de adoção no Sul do Brasil.** *Revista Plantio Direto*, Edição 137-138, p. 42-50, Setembro - Dezembro de 2013.

GODWIN, R. J. **An Extended Octogonal Ring Transducer for use in Tillage Studies.** *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.20, p. 347-352, 1975.

GOEDEL, F. **Projeto e execução de uma célula de carga multiaxial.** Trabalho final de Graduação, curso de Engenharia Mecânica, UPF. Passo Fundo, 2006.

GRANTE – Grupo de Análise e Projeto Mecânico. **Apostila de extensometria.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Julho, 2004.

GREAT PLAINS MANUFACTURING. **Products and Implements: United States.** Disponível em: <https://www.greatplainsag.com/en/products/709/sub-soiler> . Acesso em Janeiro de 2018.

GROTTA, D. C. C.; LOPES, A., FURLANI, C. E. A.; BRANQUINHO, K. B.; REIS, G. N. D.; SILVA, R. P. D. **Subsolador: avaliação do desempenho em função da velocidade de trabalho e espaçamento entre hastes.** *Acta Scientiarum. Agronomy*. Maringá, Maringá, v. 26, no. 1, p. 21-26, 2004.

GTS DO BRASIL. **Descompactador Terrus** Disponível em: <http://www.gtsdobrasil.ind.br/produtos-manejo-de-solo-descompactador-terrus>. Acesso em Dezembro de 2017.

GUADAGNINI, P. H.; ROCHA, F. S. D.; BARLETTE, V. E. **Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força.** *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol. 5, N°. 4, Dezembro, 2011.

JAN, Implementos Agrícolas S/A. **Jumbo Matic Buster.** Manual de instruções. 1º Edição. Março, 2008.

KEES, G. **Using subsoiling to reduce soil compaction.** USDA Forest Service Technology and Development Program Missoula, MT 5E52F74 Soil Tilth Restorer. Julho, 2008.

KICHLER, C. M.; FULTON, P. R. J.; RAPER, 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.** In: *Asabe Annual International Meeting*, Minneapolis, 2007. Proceedings. St. Joseph: ASABE, 2007. Paper Number: 071028, 2007.

KLEIN, V. A. **Desenvolvimento de haste para escarificação em área sob sistema plantio direto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade de Santa Maria, 79 p., 1990.

KLEIN, V. A. **Física do solo. 3º Edição.** UPF Editora. 263 p., 2014.

KLEIN, V. A.; BASSEGIO, M.; MADALOSSO, T. **Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado.** *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2475-2481, Dezembro, 2009.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. **Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água.** *Engenharia Agrícola*, v. 18, n. 2, p. 45-54, 1998.

LANÇAS, K. P. **Subsolador: desempenho em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e velocidade de deslocamento.** Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 112p., 1987.

LANÇAS, K. P. **Subsolagem ou escarificação.** *Revista Cultivar Máquinas*. Setembro-Outubro, 2002, p. 34-37.

MACEDO, D. X. S.; MONTEIRO, L. D. A.; SANTOS, V. C. D. **Compactação, escarificador e subsolador.** LIMA, Universidade Federal do Ceará. Maio, 2016.

MACHADO, R.L.T.; MACHADO, A. L.T.; TURATTI, A.L., REIS, A. V. & ALONÇO, A. dos S. **Avaliação do Desempenho de Escarificador em Planossolo.** *Revista Brasileira de Agrociência*, v.2, nº 3, pg. 151-154, Set.-Dez., 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.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. V.19, n. 11, p.1121-1125, Paraíba, 2015.

MAHL, D.; SILVA, R. B. D.; GAMERO, C. A.; SILVA, P. R. A. **Resistência do solo à penetração, cobertura vegetal, e produtividade do milho em plantio direto escarificado.** *Acta Scientiarum Agronomy*. Maringá, v. 30, supl. p. 741-747, 2008.

MICHALSON, E. L.; PAPENDICK, R. I.; CARLSON J. E. **Conservation Farming in the United States: Methods and Accomplishments of the STEEP Program.** CRC Press. 256 p., 1998.

MONTANHA, G. K. **Avaliação de um escarificador em função dos tipos de haste e profundidade de trabalho.** UNESP – Botucatu (Tese de Doutorado). Botucatu – SP, 2013.

NAVARINI, L. L. **manejo do solo e utilização de bioestimulantes na cultura do trigo (*triticum aestivum L.*).** Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Medicina Veterinária e Agronomia da Universidade de Passo Fundo (UPF) – RS, 96 p., Março, 2010.

NUNES, M. R.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S.; SCHEUNEMANN, T. **Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida.** *Pesq. Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.49, n.7, p.531-539, Julho, 2014.

PIDGEON, J. D. **“Paraplow” – A New Approach to Soil Loosening.** ASAE Paper N° 83-2136, ASAE, St. Joseph, MI. 1983.

PORTELLA, J. A.; FAGANELLO, A.; SATTTLER, A. **Desempenho operacional de hastes subsoladoras.** EMPBRAPA TRIGO, 1994.

RAPER, R. L. **Agricultural traffic impacts on soil.** *Journal of Terramechanics.* v. 42. p. 259–280, Julho/Outubro, 2005.

RAPER, R. L. **Subsoiling.** Encyclopedia of soils in the environment. p. 69-76, 2005.

RAPER, R. L. & SHARMA, A.K. **Using Soil Moisture to Determine When to Subsoil.** Proc. of 25th Annual Southern Conservation Tillage Conference for Sustainable Agriculture. Auburn, AL, June ,2002.

RAPER, R. L.; REEVES, D. W.; SHAW, J. N.; SANTEN, E. V.; MASK, P.L. **Using Site-Specific Subsoiling to Minimize Draft and Optimize Corn Yields.** American Society of Agricultural and Biological Engineers. Transactions of the ASAE, Vol. 48, p. 2047-2052. Michigan, USA, 2005.

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 de Ciência do solo. n.5. p.49-134, 2007.

REINERT, D. J., REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo.** Universidade Federal de Santa Maria. 18 p. 2006.

RICHART, A.; FILHO, J. T.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. **Compactação do solo: causas e efeitos.** *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 26, n. 3, p. 315-338, Julho/Setembro, 2005.

RIQUETTI, N. B.; BENEZ, S. H.; SILVA, P. R. A. **Demanda energética em diferentes manejos de solo e híbridos de milho.** *Revista Energia na Agricultura.* Botucatu, vol. 27, n.2, Abril-Junho, p.76-85, 2012.

SALVADOR, N.; BENEZ, S. H.; MION, R. L. **Demanda energética na subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo.** *Ciência Rural*, Santa Maria, v.39, n.9, p. 2501-2505, Dezembro, 2009.

SANTOS, J. C. D.; NETO, F. C. R; JUNIOR, J. M. C; WANDERLEY, R. A. **Desempenho de um escarificador com dois tipos de ponteiros e três espaçamentos entre hastes.** *Ciência & Engenharia* v.24, n. 2., p. 143-151, Julho – Dezembro, 2015.

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

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

SILVA, R. M. D. **Projeto, Construção e Validação de uma Célula de Carga Para Medição de Esforços em Ferramentas de Preparo de Solo.** Trabalho final de graduação II. Universidade Passo Fundo, 2010.

SILVA, S. G. C.; SILVA, A. P. D.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; SÁ, J. C. D. M. **Temporary effect of chiseling on the compaction of a rhodic hapludox under no-tillage.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, p. 547-555, 2012.

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, 10 p., Maio, 2015.

SOUZA, W.R. **Subsolador: Influência de parâmetros geométricos na distribuição das forças.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Mecanização Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 113 p., 1989.

SPOOR, G.; GODWIN, R. J. **An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines.** Journal of Agricultural Engineering Research, Bedfordshire, v.23, p.243-258, 1978.

SPRZEDAJEMY. **Głębosz Howard Paraplow 5 zębów zabezpieczenia sprężynowe kv.** Disponível em: <https://sprzedajemy.pl/glebosz-howard-paraplow-5-zebow-zabezpieczenia-sprezynowe-kv-dabie-2-e30984-nr49285502> Acesso Agosto (2018).

STARA, S/A. **FOX - Escarificação e descompactação ideal para plantio direto.** Disponível em: <http://www.stara.com.br/produto/fox/> . Acesso em Janeiro de 2018.

TABALDI, F. M.; AMADO, T. J. C.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J.; HORBE, T.; HANSEN, F. D.; KUNZ, J.; GIRARDELLO, R.C. **Escarificação Mecânica Localizada no Sistema de Plantio Direto com manutenção de cobertura vegetal na superfície do solo.** Projeto Aquarius, 2009.

UPADHYAYA, S. K.; SANCHEZ, P. A.; SAKAI, K.; CHANCELLOR, W. J.; GODWIN, R. J.; **Published in Advances in Soil Dynamics**, Volume 3, Chapter 3, Parts I & II, p. 273-359 (Copyright 2009 American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2009.

WEBER, A. L. **Extensometria (Instrumentação).** UCS – Departamento de Engenharia Mecânica. Caxias do Sul, 2008.

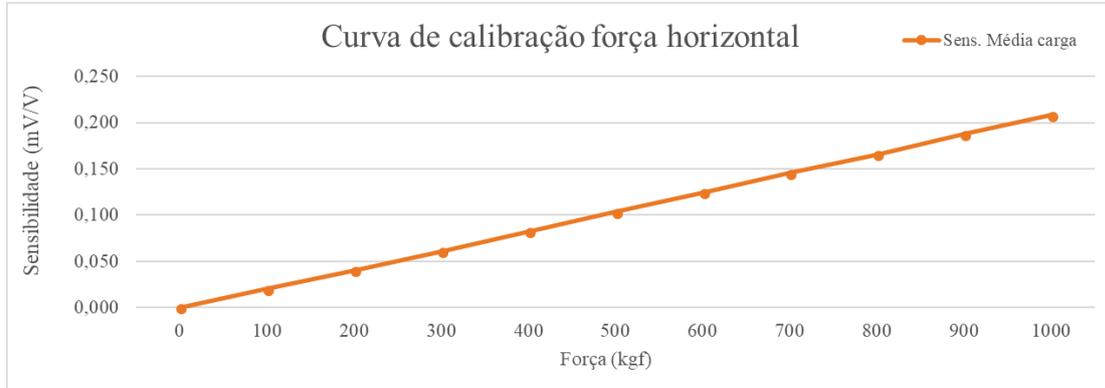
WEILL, A. **A guide to successful subsoiling.** CETAB+, Victoriaville, 43 p., 2015.

WHEELER, P. N.; GODWIN, R. J. **Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20 km/h.** Journal Of Agricultural Engineering Research. Vol.63(3), p. 243-249. Mar., 1996.

WIKIPÉDIA. **Não-Me-Toque.** Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Não-Me-Toque> . Acesso em Agosto de 2017.

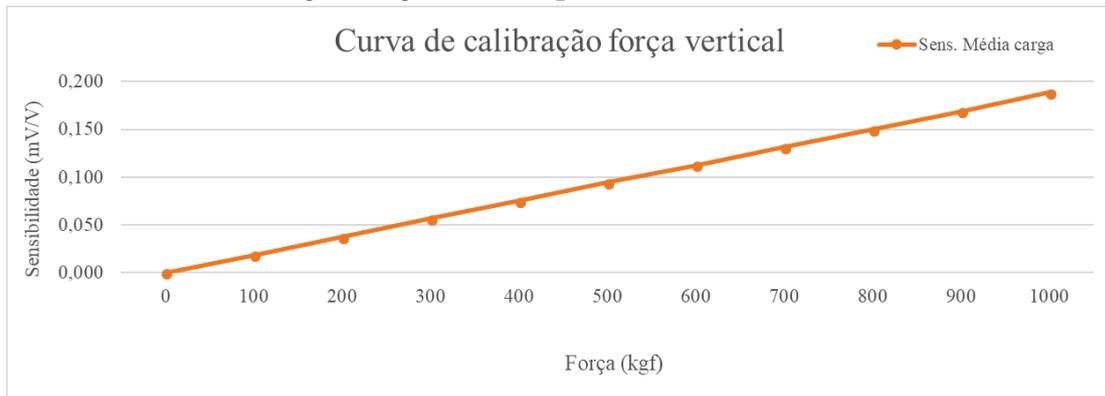
APÊNDICE A – Curva de calibração célula de carga octogonal 1.

A.1 Curva de calibração força Horizontal pura.



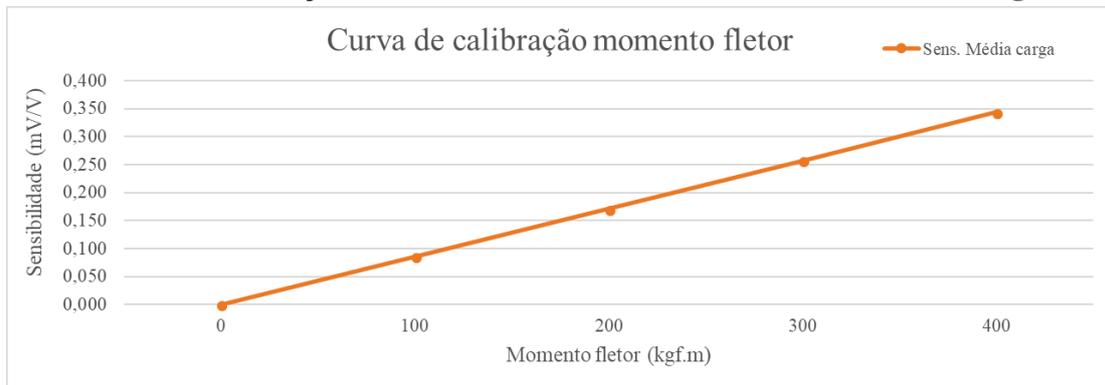
Fonte: O autor (2018).

A.2 Curva de calibração força Vertical pura.



Fonte: O autor (2018).

A.3 Curva de calibração momento fletor em torno do centro do anel octogonal.



Fonte: O autor (2018).

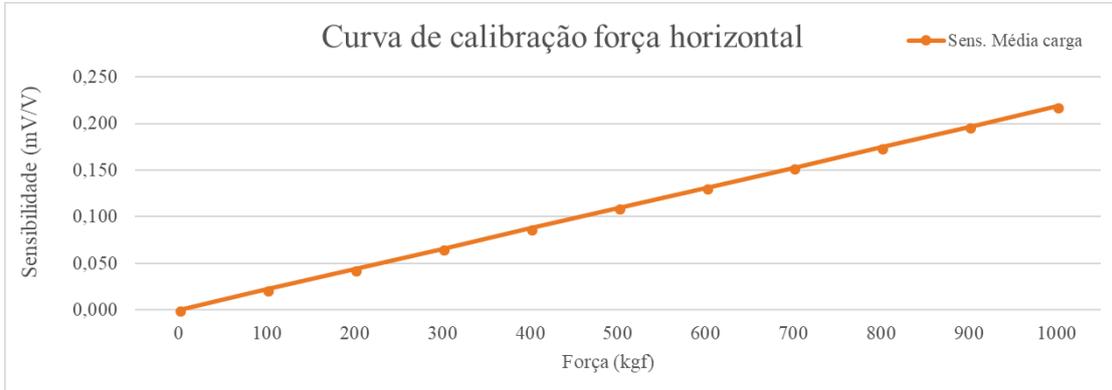
A.4 Equação final com compensação *crossstalk* (interferência entre canais).

Equações da célula 1	
Força Horizontal	$(4524,04 \times \text{Canal 1 horizontal}) + (-153,97 \times \text{Canal 2 Vertical}) + (1548,34 \times \text{Canal 3 Momento})$
Força Vertical	$(-47,99 \times \text{Canal 1 horizontal}) + (-5243,05 \times \text{Canal 2 Vertical}) + (-56,52 \times \text{Canal 3 Momento})$
Momento Fletor	$(-6,11 \times \text{Canal 1 horizontal}) + (238,92 \times \text{Canal 2 Vertical}) + (-611,88 \times \text{Canal 3 Momento})$

Fonte: O autor (2018).

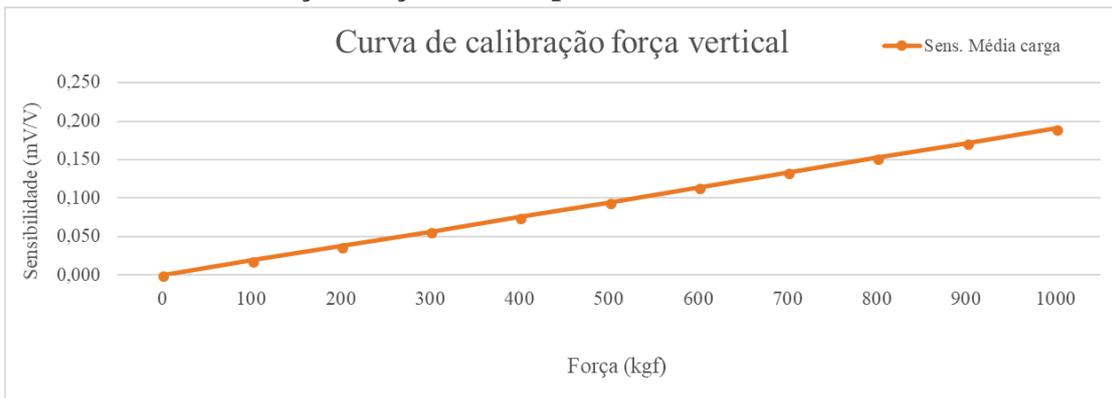
APÊNDICE B – Curva de calibração célula de carga octogonal 2.

B.1 Curva de calibração força Horizontal pura.



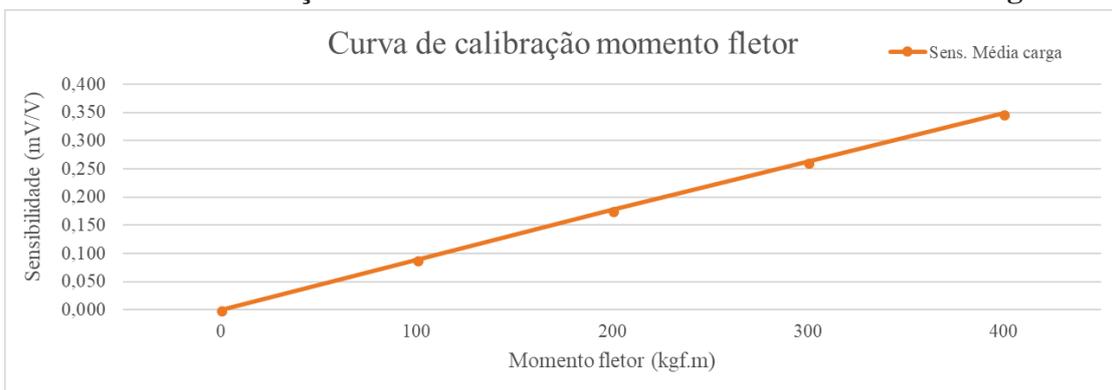
Fonte: O autor (2018).

B.2 Curva de calibração força Vertical pura.



Fonte: O autor (2018).

B.3 Curva de calibração momento fletor em torno do centro do anel octogonal.



Fonte: O autor (2018).

B.4 Equação final com compensação crosstalk (interferência entre canais).

Equações da célula 2	
Força Horizontal	$(4569,52 \times \text{Canal 1 horizontal}) + (-194,43 \times \text{Canal 2 Vertical}) + (1062,62 \times \text{Canal 3 Momento})$
Força Vertical	$(24,13 \times \text{Canal 1 horizontal}) + (-5264,8 \times \text{Canal 2 Vertical}) + (41,33 \times \text{Canal 3 Momento})$
Momento Fletor	$(-2,47 \times \text{Canal 1 horizontal}) + (242,44 \times \text{Canal 2 Vertical}) + (-600,12 \times \text{Canal 3 Momento})$

Fonte: O autor (2018).

APÊNDICE C – Análise de Variância para a interação Hastes x Velocidade (Força Horizontal média (kgf)).

FV	GL	SQ	QM	Fc
Haste	4	2128275.36	532068.84	10.02
Velocidade	1	576072.31	576072.31	10.85
Haste*Velocidade	4	557150.87	139287.71	2.62
erro	190	10086004.79	53084.23	
Total corrigido	199	13347503.34		

CV (%) = 22.89

Média geral: 1006.7 Número de observações: 200

Interação Haste x Velocidade

FV		GL	SQ	QM	Fc
Haste	/1	4	1418887.48	354721.87	6.68
Haste	/2	4	1266538.75	316634.68	5.96
Erro		190	10086004.79	53084.23	

Codificação usada para o desdobramento da Velocidade: Velocidade 3; Velocidade 6

Velocidade 3,0 km/h

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
H2	825.71	a
H5	836.91	a
H3	952.00	a b
H4	999.92	a b
H1	1150.64	b

Dms: 200.71

Velocidade 6,0 km/h

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
H3	931.13	a
H2	956.36	a b
H5	1042.87	a b c
H1	1140.73	b c
H4	1230.78	c

Dms: 200.71

Interação Velocidade x Haste

FV		GL	SQ	QM	Fc
Velocidade	/1	1	982.08	982.08	0.01
Velocidade	/2	1	170681.16	170681.16	3.21
Velocidade	/3	1	4357.65	4357.65	0.08
Velocidade	/4	1	532986.48	532986.48	10.04
Velocidade	/5	1	424215.81	424215.81	7.99
Erro		190	10086004.79	53084.23	

...Apêndice C (continuação).

Haste 4

Codificação usada para o desdobramento Haste: Haste 1; Haste 2; Haste 3; Haste 4; Haste 5

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
-------------	--------	---------------------

V3 (3,0 km/h)	999.92	a
V6 (6,0 km/h)	1230.78	b

Haste 5

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
-------------	--------	---------------------

V3 (3,0 km/h)	836.91	a
V6 (6,0 km/h)	1042.87	b

Dms: 143.71

Fonte: O autor (2018).

APÊNDICE D – Análise de Variância para a interação Hastes x Profundidade (Força horizontal média (kgf)).

FV	GL	SQ	QM	Fc
Haste	4	2128275.36	532068.84	15.83
Profundidade	1	4383227.53	4383227.53	130.44
Haste*Profundidade	4	451809.25	112952.31	3.36
erro	190	6384191.19	33601.0	
Total corrigido	199	13347503.34		

CV (%) = 18.21

Média geral: 1006.7 Número de observações: 200

Interação Haste x Profundidade

FV	GL	SQ	QM	Fc
Haste /1	4	859696.13	214924.03	6.39
Haste /2	4	1720388.47	430097.11	12.8
Erro	190	6384191.19	33601.0	

Codificação usada para o desdobramento Profundidade: Profundidade 300; Profundidade 400.

Profundidade 300 mm

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
H3	765.02	a
H2	775.09	a
H5	826.46	a
H1	917.21	a b
H4	1009.55	b

Dms: 159.69

Profundidade 400 mm

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
H2	1006.98	a
H5	1053.32	a
H3	1118.11	a b
H4	1221.15	b c
H1	1374.17	c

Dms: 176.12

Interação Profundidade x Haste

FV	GL	SQ	QM	Fc
Profundidade /1	1	2088124.41	2088124.41	62.14
Profundidade /2	1	537752.91	537752.91	16.0
Profundidade /3	1	1246760.79	1246760.79	37.1
Profundidade /4	1	447766.76	447766.76	13.32
Profundidade /5	1	514631.91	514631.91	15.31
Erro	190	6384191.19	33601.0	

...Apêndice D (continuação).

Codificação usada para o desdobramento Haste: Haste 1; Haste 2; Haste 3; Haste 4; haste 5

Haste 1

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
P300 (300 mm)	917.21	a
P400 (400 mm)	1374.17	b

Haste 2

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
P300 (300 mm)	775.09	a
P400 (400 mm)	1006.98	b

Haste 3

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
P300 (300 mm)	765.02	a
P400 (400 mm)	1118.11	b

Haste 4

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
P300 (300 mm)	1009.55	a
P400 (400 mm)	1221.15	b

Haste 5

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
P300 (300 mm)	826.46	a
P400 (400 mm)	1053.32	b

Dms: 114.34

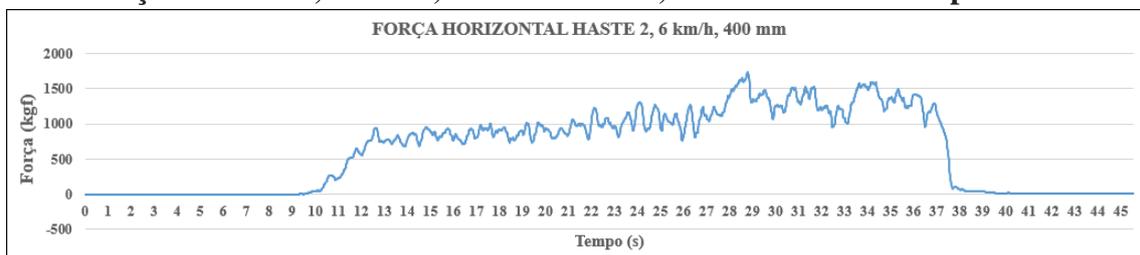
Fonte: O autor (2018).

APÊNDICE E – Medições Força Horizontal para 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.

E.1 – Força horizontal, Haste 1, velocidade de 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.



E.2 – Força horizontal, Haste 2, velocidade de 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.



E.3 – Força horizontal, Haste 3, velocidade de 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.



E.4 – Força horizontal, Haste 4, velocidade de 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.



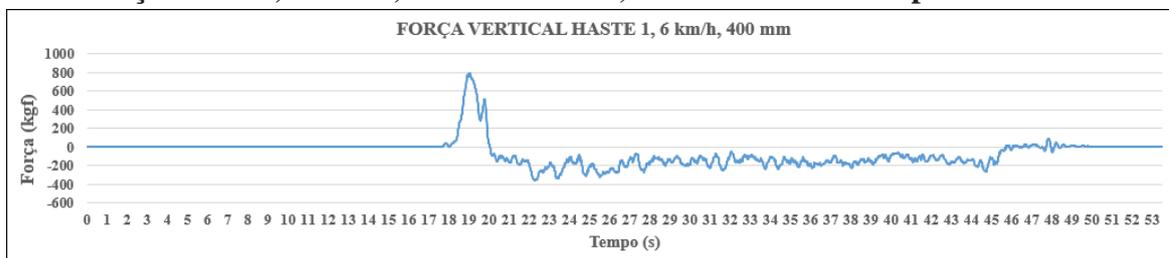
E.5 – Força horizontal, Haste 5, velocidade de 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.



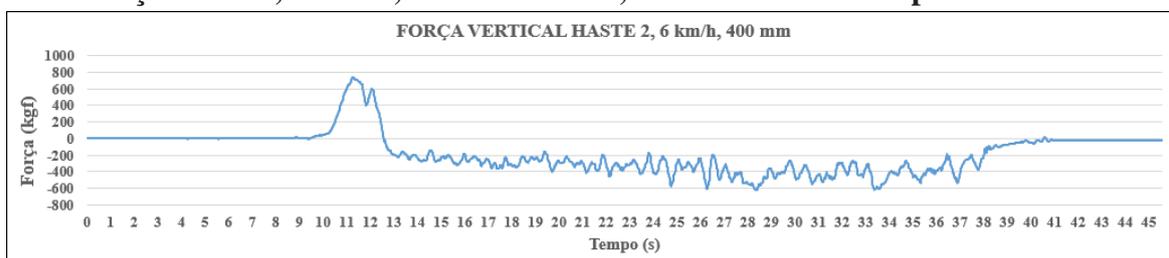
Fonte: O autor (2018).

APÊNDICE F – Medições Força Vertical para 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.

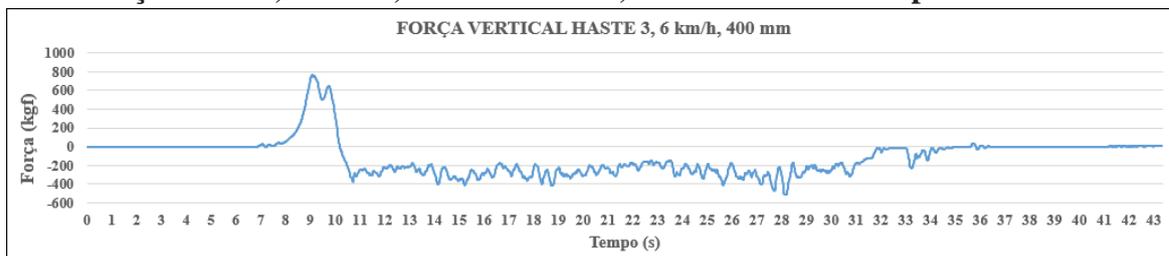
F.1 – Força vertical, Haste 1, velocidade de 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.



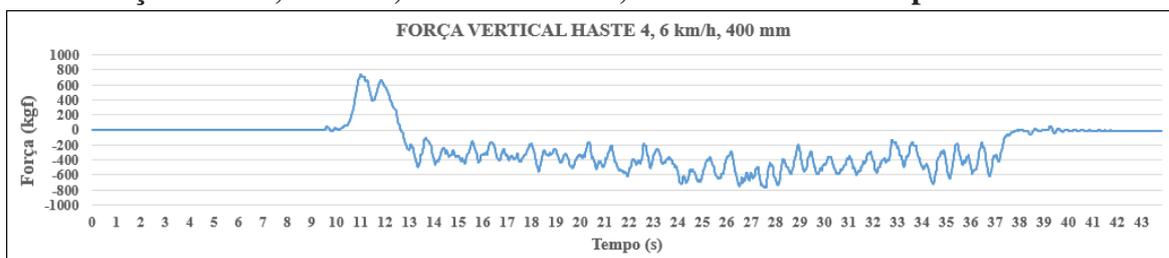
F.2 – Força vertical, Haste 2, velocidade de 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.



F.3 – Força vertical, Haste 3, velocidade de 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.



F.4 – Força vertical, Haste 4, velocidade de 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.



F.5 – Força vertical, Haste 5, velocidade de 6,0 km/h e 400 mm de profundidade.



Fonte: O autor (2018).