

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**HASTES INSTRUMENTADAS COM CONTROLE AUTOMATIZADO
DO ESCARIFICADOR ATUANDO EM PROFUNDIDADES VARIÁVEIS**

THIAGO MARTINS MACHADO

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP
Agosto – 2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**HASTES INSTRUMENTADAS COM CONTROLE AUTOMATIZADO
DO ESCARIFICADOR ATUANDO EM PROFUNDIDADES VARIÁVEIS**

THIAGO MARTINS MACHADO

Orientador: Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP
Agosto – 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

M149h Machado, Thiago Martins, 1981-
Hastes instrumentadas com controle automatizado do es-
carificador atuando em profundidades variáveis / Thiago
Martins Machado. - Botucatu : [s.n.], 2013
x, 96 f. : ils. (algumas color.), tabs., grafs., fots.
color.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Fa-
culdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2013
Orientador: Kléber Pereira Lanças
Inclui bibliografia

1. Escarificador. 2. Agricultura de precisão. 3. Solos
- Compactação. 4. Máquinas agrícolas - Automação. I. Lan-
ças, Kléber Pereira. II. Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade
de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “HASTES INSTRUMENTADAS COM CONTROLE AUTOMATIZADO DO
ESCARIFICADOR ATUANDO EM PROFUNDIDADES VARIÁVEIS”

ALUNO: THIAGO MARTINS MACHADO

ORIENTADOR: PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS

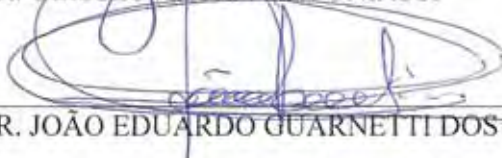
Aprovado pela Comissão Examinadora




PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS



PROF. DR. ULISSES ROCHA ANTUNIASSI



PROF. DR. JOÃO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS



PROF. DR. LUCIANO SHOZO SHIRATSUCHI



PROF. DR. PEDRO CASTRO NETO

Data da Realização: 14 de junho de 2013.

DEDICO

PARA

***FÁBIO E JANETI meus pais e minha irmã LARISSA,
meus incentivadores e fundamentais para minha formação.***

AGRADECIMENTOS

À Deus, com fé tudo é possível.

À Flávia Suelen Cianfa Santi pelo incentivo, carinho, paciência e companhia nos momentos mais difíceis da execução deste trabalho.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Ciências Agrônomicas Campus de Botucatu por meio do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, pela oportunidade do aprendizado e realização do Doutorado.

Ao professor Kléber Pereira Lanças, pela orientação, paciência, aprendizado, e as diversas oportunidades oferecidas durante o curso.

À Empresa STARA, por acreditar e investir no projeto.

Aos funcionários da STARA que ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, Cristiano Buss, Rafael Costa, Marcos Tomasi, Felipe Dedin e Anderson.

Aos funcionários da UNESP, Manoel, Balastrin pela amizade paciência e ajuda técnica no desenvolvimento do experimento.

Aos colegas da pós-graduação Diego, João, Barbara, Tiago, Fabrício, Indiamara e aos demais que ajudaram no projeto.

Aos professores Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra, Sérgio Hugo Benez, Marcos Antonio Martin Biaggioni e os demais professores do programa Energia na Agricultura.

À Falker pelo empréstimo do equipamento de mensuração da resistência a penetração do solo.

À Trelleborg do Brasil, por confiar no meu trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS.....	11
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
4.1 Compactação dos solos agrícolas	7
4.2 Métodos de avaliação da resistência do solo a penetração	10
4.3 Escarificação e Subsolagem	15
4.4 Dinâmica do solo agrícola na interação ferramenta-solo	18
4.5 Consumo de energia e desempenho de escarificadores e subsoladores	21
4.6 Uso de ferramentas de Agricultura de Precisão	23
5 MATERIAL E MÉTODOS	27
5.1 Pré-ensaio.....	27
5.1.1 Equipamentos	28
5.1.2 Material utilizado para coleta de amostras dos parâmetros de caracterização do solo.	29
5.1.3 Material utilizado para coleta de dados dos parâmetros de avaliação.....	30
5.1.4 Delineamento experimental.....	33
5.1.5 Descrição dos tratamentos.....	33
5.1.6 Instalação e condução do experimento	34
5.1.7 Métodos de determinação dos parâmetros de caracterização do solo.....	35
5.1.8 Métodos de determinação dos parâmetros de avaliação.....	36
5.1.9 Simulação dos dados	39
5.2 Desenvolvimento e construção das hastes instrumentadas.....	40
5.2.1 Ensaio de avaliação do sistema eletrônico em bancada	41

5.2.2	Calibração das hastes instrumentadas	42
5.2.3	Ensaio para avaliação dos equipamentos em campo	44
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
6.1	Pré-ensaio.....	51
6.1.1	Teor de água no solo	51
6.1.2	Índice de cone.....	52
6.1.3	Densidade do solo	52
6.1.4	Parâmetros de avaliação	53
6.1.5	Simulação em planilha eletrônica	54
6.2	Desenvolvimento e construção das hastes instrumentadas.....	56
6.3	Funcionamento	59
6.4	Ensaio para avaliação do sistema eletrônico em bancada.....	60
6.5	Calibração das hastes instrumentadas	61
6.6	Tempo de resposta	65
6.7	Ensaio para avaliação dos equipamentos em campo	66
6.8	Estatística descritiva	69
6.9	Mapas	70
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	74
8	CONCLUSÕES	75
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
	APÊNDICE	92

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ruptura do solo causada pelo cisalhamento devido à força aplicada pela ponteira. Fonte: Adaptado Lanças (2002).....	18
Figura 2. Gráfico da resistência do solo em relação à tensão cisalhamento. Fonte: adaptado Ripoli e Ripoli (2004).	19
Figura 3. Modelos de ruptura do solo. Fonte: adaptado Lanças (1987)	20
Figura 4. Trator John Deere 6600 e subsolador Jumbo Matic.....	28
Figura 5. Penetrômetro usado no experimento.....	29
Figura 6. Fluxômetro instalado no trator	30
Figura 7. Berço e a célula de carga.....	31
Figura 8. Geradores de pulsos “encoder”.	32
Figura 9. Controlador lógico programável “CLP.....	32
Figura 10. Rolo compactador.	34
Figura 11. Esquema da disposição dos tratamentos e blocos no campo	35
Figura 12. Desenho base do projeto com a localização dos equipamentos	41
Figura 13. a) GPS, b) dispositivo simulador, c) coletor de dados “Topper”.....	42
Figura 14. Esquema da disposição dos tratamentos e blocos no campo	43
Figura 15. Leituras de IC nas passagens do trator	44
Figura 16. Esquema de distribuição dos tratamentos.....	45
Figura 17. Escarificador Fox	47
Figura 18. a) Sensor de posição b) caixa controladora de fluxo de óleo.....	47
Figura 19. Distribuição dos sistemas eletrônicos e hidráulicos do escarificador	48
Figura 20. Avaliação em campo do tempo de resposta.....	48
Figura 21. Esquema de distribuição dos tratamentos e blocos.....	49
Figura 22. Desenho demonstrando os componentes do sistema automatizado.....	57
Figura 23. Desenho da haste com formato reto	57
Figura 24. Corte A-A, desenho da borda cortante da haste	58
Figura 25. Desenho da posição de trabalho do equipamento	58

Figura 26. Hastes instrumentadas montadas no trator e o escarificador	59
Figura 27. Coletor de dados Topper.....	59
Figura 28. Transferências dos dados via USB	60
Figura 29. Resistência mecânica do solo e índice de cone para camada 0-0,10m	62
Figura 30. Resistência mecânica do solo e índice de cone para camada 0,10-0,20m	63
Figura 31. Resistência mecânica do solo e índice de cone para camada 0,20-0,30m	63
Figura 32. Resistência mecânica do solo e índice de cone para as camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.....	64
Figura 33. Resistência mecânica do solo média e índice de cone médio para as camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.....	64
Figura 34. Mapa do índice de cone com dados do penetrômetro na profundidade de 0 a 0,10 m e pontos gerado pelas hastes instrumentadas somente em locais com valores maiores que 2MPa.....	71
Figura 35. Mapa do índice de cone com dados do penetrômetro na profundidade de 0,10 a 0,20 m e pontos gerado pelas hastes instrumentadas somente em locais com valores maiores que 2MPa.....	72
Figura 36. Índice de cone na profundidade de 0,20 a 0,30 m	72

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Descrição dos tratamentos.....	33
Tabela 2. Simulação de áreas compactadas e não compactadas trabalhadas com o subsolador.	40
Tabela 3. Descrição dos tratamentos.....	44
Tabela 4. Descrição dos tratamentos.....	45
Tabela 5. Descrição dos tratamentos.....	49
Tabela 6. Valores do teor de água no solo (kg kg^{-1}).....	51
Tabela 7. Índice de cone (IC)(MPa).....	52
Tabela 8. Densidade do solo (kg dm^{-3}).....	52
Tabela 9. Patinação (P) em %, velocidade média (VM) em Km h^{-1} , capacidade de campo efetiva (CCE) em ha h^{-1} , força média na barra de tração (FMBT) em N, potência média na barra de tração (PMBT) em kW, consumo horário de combustível (CHC) em L h^{-1} , consumo operacional de combustível (COC) em L ha^{-1} em função dos tratamentos avaliados no experimento.	53
Tabela 10. Simulação da escarificação a profundidade variável área (25 ha) e fixa(75 ha).....	55
Tabela 11. Simulação da escarificação a profundidade variável (50 ha) e fixa (50 ha)....	55
Tabela 12. Simulação da escarificação a profundidade variável (75 ha) e fixa (25 ha)....	56
Tabela 13. Teor de água no solo (kg kg^{-1}).....	61
Tabela 14. Índice de cone (MPa).....	65
Tabela 15. Teor de água no solo (kg kg^{-1}).....	65
Tabela 16. Tempo de subida do escarificador.....	66
Tabela 17. Tempo de descida do escarificador.....	66
Tabela 18. Cálculo do tempo de retardo.....	66
Tabela 19. Teor de água no solo (kg kg^{-1}).....	67

Tabela 20. Tabela 20. Patinagem (P) em %, velocidade média (VM) em Km h⁻¹, capacidade de campo efetiva (CCE) em ha h⁻¹, força média na barra de tração (FMBT) em N, potência média na barra de tração (PMBT) em kW, consumo	68
Tabela 21. Diferenças de desempenho do trator utilizando as hastes instrumentadas....	68
Tabela 22. Estatística descritiva para os valores de resistência mecânica (MPa) das hastes instrumentadas e valores de índice de cone (MPa) do penetrômetro.....	70

1 RESUMO

A compactação do solo é um problema que atinge a maioria das áreas agricultáveis do Brasil, sendo provocada por diversos fatores, tais como o excesso de carga e o tráfego intenso de máquinas, uso de pneus inadequados para a carga aplicada e pressões de inflação fora do recomendado, tráfego de máquinas no campo com o teor de água do solo não recomendado e vários outros problemas. Existem disponíveis vários modelos e sistemas de medição da compactação do solo no Brasil; porém, os sensores desses equipamentos necessitam de processamento e interpretação dos dados. O objetivo deste trabalho foi projetar e avaliar um protótipo de hastes instrumentadas para identificar as camadas compactadas dos solos agrícolas em tempo real e em profundidades variáveis. O equipamento foi desenvolvido para ser montado na parte frontal do trator “tendo o movimento vertical, para introdução no solo”, controlado pelo sistema hidráulico central do trator. As partes constituintes do protótipo frontal são o chassi, hastes, células de carga, coletor de dados, GPS, sensor de posição e controlador de fluxo de óleo que comanda o escarificador, acoplado na traseira do trator que é utilizado para descompactar o solo. O protótipo frontal do trator envia os dados de tensão do solo lidos pelas células de carga, sendo armazenados e sincronizados com os arquivos vindos do GPS e enviados por um coletor de dados, ao controlador de fluxo de óleo do escarificador, de acordo com os dados do sensor de posição, considerando o limite de tensão programado para que o escarificador atue, ou seja, penetre no solo na profundidade indicada, quando for maior ou igual a 2 MPa, promovendo a movimentação vertical do escarificador quando necessário. A calibração do equipamento foi realizada em uma área da pista de Ensaios do

NEMPA – Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agrícolas, utilizando como calibrador do aparelho detector de compactação, um penetrômetro no qual os valores de índice de cone (IC) foram inseridos no coletor de dados para comparação, tendo uma correlação de $R^2 = 0,79$ considerada aceitável para um primeiro protótipo. Após a calibração do equipamento foi realizado o ensaio de tempo de resposta entre o dado obtido pelo sensor frontal e os tempos de subida e descida do escarificador. Em seguida foi realizado o ensaio comparativo entre o sistema de escarificação tradicional, com profundidade fixa de 0,35m com o equipamento regular das hastes instrumentadas, com profundidade variável, sendo mensurados os seguintes parâmetros: consumo horário de combustível, consumo de combustível operacional, força na barra de tração, potência média, velocidade média, patinagem, capacidade de campo efetiva do trator e tempo de resposta do equipamento. Os resultados mostraram que, com equipamento comandando a operação de escarificação com profundidade variável, ou seja, em taxa variável, obteve-se uma redução de 26 % no consumo operacional de combustível ($L ha^{-1}$) e houve um aumento de 14% na capacidade de campo efetiva ($ha h^{-1}$). O sistema instrumentado produziu mapas que apresentaram a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo, com resolução, densidade de amostragem e capacidade operacional mais elevada quando comparada com levantamentos realizados com o penetrômetro de cone.

Palavras-chave: compactação, profundidade variável, escarificador.

INSTRUMENTED BLADES WITH AUTOMATED CONTROL OF CHISEL ACTING IN VARIABLE DEPTHS. Botucatu, 2013, 106p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: THIAGO MARTINS MACHADO

Adviser: KLÉBER PEREIRA LANÇAS

2 SUMMARY

The soil compaction is a problem that affects most of agriculture fields in Brazil, aggravated for many factors, for example excess weight in the traffic and intense traffic machinery, tires used inadequately for the load weight applied and calibration pressures not recommended, the machineries enters on the field with water content in soil not recommended, and there are others problems. There are several models and systems available to measure the compaction in the soil in Brazil, but the data of equipment sensors need to be interpreted and processed. The objective of this work was to design and evaluate a prototype to indentify the compacted layers in the agricultural soil in real time and on the go in various depths. The equipment was design to be mounted in front of the tractor with vertical movement, to be introduced in the soil, controlled by central hydraulic system of the tractor. The constituent parts of frontal sensor are chassis, tines, load's cells, electronic system to collect files, GPS, position sensors, and oil flow controllers that transfers the command to the chiseled that is mounted behind the tractor and is used to mobilize the soil. The frontal sensor of tractor feeds together with the GPS files the pressure files of the soil read by load cells and this files are stored and sent by one data collector and to controller's oil flow of chisel according by positions sensor considering the programmed limit to the moves of chisel. In other words introduce the soil in initial depth if the pressure is equal or bigger than 2 MPa for initiate the vertical movement of the chisel, when needed. The equipment's calibration was made in area from the NEMPA's test track - Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agrícolas - used as calibrator of the detector equipment of compaction a penetrometer and the Cone Index (IC) was inserted in the data collector for comparison with a correlation of $R^2 = 0,79$

considered acceptable for a first prototype. After the calibration it was realized the time response test between the data obtained by frontal sensor and the time of up and down from the chisel. Then was realized the comparative test between the traditional chiseling system using fixed depth in 0,35m with the regular equipment from the instrumented tines, with variable depth, measured in parameters of the fuel consumption per hour, operational fuel consumption, draw bar pull, power average, forward speed, slippage, effective field capacity from tractor and response time of the equipment. The results indicated that the equipment commanding the chiseling operation with variable depth, in other words in variable rate, promoted a 26% reduction in fuel operational consumption ($L ha^{-1}$) and increased effective field capacity in 14% ($ha h^{-1}$). The equipment's reactions proposed to change the depth of chiseling coincided with the local and the values obtained of mechanical force from the soil indicates by penetrometer presenting good precisions in the data. The instrumented system generated maps that presented spatial variable from mechanical resistance soil, with resolution, density of samples and high capacity operational when compared with sampling realized with penetrometer cone, indicating that there was overestimation of the condition of compaction by the equipment.

Keywords: compaction, variable depth, chisel

3 INTRODUÇÃO

O emprego de máquinas e implementos de maior massa tem buscado um maior rendimento operacional e proporcionado a utilização de máquinas mais pesadas, muitas vezes com peso excessivo, submetendo os solos a tensões cada vez mais elevadas, agravando os problemas de compactação.

Quando o solo apresenta uma compactação além dos limites toleráveis para a cultura, ocorre uma diminuição de produtividade, devido a vários fatores, tais como: impedimento físico para penetração do sistema radicular; problemas de germinação de sementes, baixa infiltração de água, baixa aeração, entre outros.

Algumas alternativas, em determinadas áreas, buscam meios para melhorar o aproveitamento do potencial dos solos e conseqüentemente, o aumento da produtividade, seriam através das aplicações de insumos de forma variável e precisa, utilizando ferramentas, ligadas à agricultura de precisão.

A agricultura de precisão surgiu como mais uma alternativa de melhoria na produção agrícola, sua aplicação vem crescendo nos países mais desenvolvidos. Trata-se de uma forma de manejo diferenciada do solo e da cultura, adequando as diferentes condições encontradas em cada parcela da lavoura. A agricultura de precisão se tornou viável, em escala comercial, com a disponibilização do GPS ou “Sistema de Posicionamento Global”, desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos como um sistema de navegação com o auxílio de sinais de satélites, deixando de ter importância apenas bélica ao fim da guerra fria, passando a ser utilizado na agricultura, como uma sofisticada ferramenta de

trabalho disponível, de grande utilidade para proporcionar uma acelerada expansão das técnicas de agricultura de precisão. Hoje em dia, a procura de sistemas de condução das culturas com menores impactos ambientais, que minimizem os problemas de erosão e lixiviação, levando os agricultores a utilizarem, cada vez mais, sistemas reduzidos de preparo do solo, ou cultivo mínimo, nos quais há uma menor movimentação do solo.

Atualmente o escarificador é o implemento de preparo de solo mais indicado, tanto para sistema de cultivo mínimo como em sistema tradicional, apesar de apresentar elevado consumo energético.

Os equipamentos nacionais (penetrômetros e penetrógrafos) disponíveis para a mensuração da compactação do solo são de baixa capacidade operacional e não dispõem de meios diretos de intervenção, sendo inviáveis em grandes propriedades, devido a grande quantidade de amostras ou coleta de dados necessárias.

Usando hastes instrumentadas, para fazer a leitura da resistência do solo, através das células de carga, com posição georreferenciada por GPS é possível determinar e intervir em tempo real com acurácia nas camadas compactadas, com isto, realizar a escarificação em profundidades variáveis em locais em que a compactação possa interferir na produtividade, evitando o desgaste prematuro dos equipamentos, consumo excessivo de combustível e apresentando como vantagens o aumento da capacidade operacional e a diminuição do tempo gasto na operação, racionalizando os custos.

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver e avaliar um protótipo de hastes instrumentadas, capaz de fazer a leitura de resistência do solo, em três diferentes camadas, em tempo real, comandando o escarificador a descompactar o solo quando necessário, bem como coletar informações para o mapeamento das camadas para fins gerenciais.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Compactação dos solos agrícolas

A compactação do solo ocasiona uma diminuição representativa do potencial produtivo das culturas, devido à compressão do solo não saturado, aumentando a sua densidade devido à redução do seu volume, pela expulsão de ar dos poros, conforme relatado por Dias Junior (1996). Segundo o mesmo autor quando o fenômeno da redução de volume ocorre com a expulsão de água dos poros do solo, este fenômeno passa a se chamar adensamento. Em ambos os casos esta redução de volume ocorre devido ao manejo inadequado do solo.

A compactação do solo, caracterizada pela redução do espaço poroso quando este é submetido a uma pressão externa, pode ser considerado um dos principais problemas de áreas intensamente mecanizadas e um dos fatores primordiais de degradação de sua estrutura (MOSADDEGHI et al., 2007).

Segundo Benedetti et al. (2010), a resistência do solo a penetração é altamente relacionada com o teor de água e densidade do solo.

De acordo com Chancellor (1977), o volume total de um solo é formado pelo volume de partículas minerais e por poros entre as partículas. Esse solo é considerado compactado quando a proporção de macroporos em relação à porosidade total é inadequada para o eficiente desenvolvimento da planta. O solo ideal é aquele que tem a porosidade total de 50%, sendo um terço, cerca de 17%, de macroporos ocupados pelo ar do

solo, e dois terços, cerca de 33%, de microporos responsáveis pela retenção de água (KIEHL, 1979).

Segundo Ripoli e Ripoli (2004), os fatores que influenciam e levam a uma maior ou menor compactação ou adensamento de um solo, basicamente, são: composição físico-química, matéria orgânica, teor de água e pressão aplicada no solo.

A compactação do solo afeta a dinâmica da água, do ar e do calor, e pode afetar a eficiência da utilização de água, fertilizantes e herbicidas pelas plantas em função do menor desenvolvimento radicular, culminando em decréscimo de produtividade (BEUTLER et al., 2007).

Estudos do processo de compactação do solo têm demonstrado que diferentes classes do solo apresentam comportamentos distintos quando submetidos ao processo de compactação, devido a vários fatores, tais como: energia de compactação, textura, teor de matéria orgânica, umidade (DIAS JUNIOR, 1996).

Horn et al. (1995) acrescentam que não somente a pressão estática causa compactação, mas também as forças dinâmicas causadas pela vibração do trator tracionando implementos, e pelo patinamento das rodas, promovendo alteração estrutural e reorganização das partículas do solo.

A movimentação de veículos e máquinas agrícolas, geralmente muito pesados e o preparo intensivo do solo, têm contribuído para a formação de camadas compactadas (CASTRO NETO, NAGOAKA e LANÇAS, 1999). Essas camadas, além de provocarem erosão superficial do solo, refletem na produtividade agrícola.

Para Streck et al. (2004), com a modernização da agricultura o peso das máquinas e dos equipamentos e a intensidade de uso do solo têm aumentado drasticamente. Esse processo não foi acompanhado por um desenvolvimento adequado às exigências de uma agricultura que deve tender continuamente à sustentabilidade, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo. Os mesmos autores avaliaram o efeito do tráfego de máquinas na alteração das propriedades físicas de um solo sob plantio direto e concluíram que o tráfego sobre o solo aumentou a densidade e a resistência do solo à penetração.

Segundo Silva et al. (2000), a compactação do solo é resultante do somatório de vários fatores relativos às máquinas agrícolas (tipo, largura e pressão de inflação

dos pneus, massa e carga por eixo) e o solo, os quais influenciam nas propriedades físicas e biológicas do solo e suas relações com o crescimento e produtividade das plantas.

A compactação do solo dificulta a penetração das raízes, a extração de água e o crescimento das plantas, afetando seu potencial produtivo (DEDECEK e GAVA, 2005), como a qualidade ambiental em razão do aumento do processo erosivo (KUMMELBEIN et al., 2008), culminando com a redução da produtividade (REICHERT et al., 2009).

Para Vasconcelos (2004) em solos compactados, a alta densidade prejudica o desenvolvimento radicular e da parte aérea, resultando em menor produtividade.

Na cultura da aveia, Ehlers et al. (1983) verificaram que o crescimento radicular decresceu linearmente com o aumento da resistência mecânica do solo à penetração.

Upadhyaya et al. (1999) relataram que a variabilidade de produtividade do tomate irrigado, seu rendimento foi determinado pela disponibilidade de umidade do solo. Segundo os mesmos autores a falta de umidade do solo, devido às características da baixa infiltração do solo, associado com aumento do nível de compactação e textura do solo, foram os principais motivos para a redução do rendimento.

Segundo Taylor e Beltrame (1980), o rompimento das camadas compactadas do solo traz como benefícios imediatos: a redução da densidade do solo, o aumento no volume dos macroporos e, ainda, permite um fluxo vertical mais rápido da água.

Para Cardoso et al. (2006), a presença de camadas compactadas no perfil do solo não afeta a produtividade de grãos, quando não há restrição hídrica.

Diversos autores verificaram que a resistência à penetração limite ao desenvolvimento de raízes de diversas plantas situa-se entre 1 MPa e 3,5 MPa (CANARACHE et al., 1984; MEROTTO e MUNDSTOCK, 1999; NESMITH et al., 1987; SENE et al., 1985).

De acordo com Torres e Saraiva (1999) as resistências à penetração, entre 3,5 e 6,5 MPa, aparentemente, são as mais corretas para considerar que um solo está com possíveis problemas de impedimento mecânico.

A variação desses valores críticos esta associada ao tipo de planta, teor de argila do solo, teor de água do solo, sistema de condução do experimento e ao sistema de manejo do solo e índice pluviométrico da região. Contudo, o valor de 2 MPa tem sido,

geralmente, utilizado como um valor de resistência a penetração limitante (HAKANSSON et al., 1988; SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998).

Segundo Trein et al. (2005), uma solução, para diminuir ou evitar a compactação do solo pelo tráfego de máquinas, é a adoção de um sistema controlado, ou seja, separar as zonas de tráfego das zonas em que há crescimento das plantas, concentrando a passagem de pneus em linhas delimitadas, sendo que desta forma uma área menor seria atingida, embora mais intensamente. Os autores enfatizam também que o sistema de tráfego controlado funciona bem em culturas que são estabelecidas em fileiras.

Diversas medidas para minimizar os efeitos nocivos da compactação têm sido sugeridas, como: aumento do diâmetro e largura dos pneus, rodados duplos, maior distribuição do peso da máquina, menor pressão de inflação dos pneus, restrição de tráfego em áreas com elevado teor de água, trafegar sobre camada de resíduos (LANÇAS e UPADHYAYA, 1997 ; SEIXAS et al., 1995), esteira de borracha (DOMIER et al., 1971; OSBORNE, 1971), entretanto Hakansson e Reeder (1994) relatam que sua utilização geralmente é de alto custo e geralmente só minimizam seus efeitos. Os autores recomendam evitar-se a compactação através da diminuição do carregamento mecânico sobre o solo.

4.2 Métodos de avaliação da resistência do solo a penetração

A presença de camada de solo compactada pode significar sérios problemas ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas em geral. Uma das formas de diagnóstico da sua presença é através do uso de penetrômetros ou penetrógrafos que exigem tempo considerável para a obtenção de dados, conforme relatado por Adamchuk e Molin (2006).

Segundo Torres e Saraiva (1999), o ideal seria que as medidas, para quantificar a resistência do solo, fossem feitas por métodos diretos, ou seja, por meio do próprio sistema radicular. Porém esses métodos são de difícil aplicação prática, principalmente na cultura de cana-de-açúcar, na qual se cultivam milhares de hectares. Esses autores concluíram que os penetrômetros, apesar de suas limitações, ainda são um meio importante para avaliar a resistência mecânica à penetração no solo.

Os métodos para avaliação da camada compactada do solo podem ser divididos, conforme Lanças (1996a), em três principais grupos: a) métodos visuais, subjetivos ou grosseiros: sulcos de erosão, fendas nos rastros dos rodados, crostas superficiais, raízes mal formadas, sistema radicular raso e espalhado, plantas com tamanhos menores que o padrão, emergência lenta da plântula, coloração deficiente, b) métodos precisos: este método envolve análise de laboratório: densidade do solo, percentagem de macroporos, condutividade hidráulica, c) métodos intermediários: avaliação da resistência a penetração do solo utilizando penetrômetros ou penetrógrafos.

Os penetrômetros são instrumentos que medem a resistência a penetração do solo em unidades de pressão (força por unidade de área) de um cone padronizados pela AMERICAM SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS – ASABE R313.3 (2009b), posicionado na extremidade de uma haste de metal, quando inseridos no interior do solo. Essa resistência à penetração está relacionada a resistência exercida pelo solo à penetração e crescimento das raízes e, portanto, pode ser utilizada como uma medida da compactação dos solos.

Segundo Rohm (1984), a penetração de uma haste no terreno é uma técnica utilizada há muito tempo para se obter medidas de resistência das camadas do solo. Engenheiros e arquitetos utilizavam a introdução de varas de madeiras ou hastes metálicas no solo já no início do século XIX com o objetivo de comparar locais a serem explorados, baseados na resistência oferecida pelo terreno à introdução de uma haste. A evolução deste processo rudimentar deu origem aos penetrômetros hoje usados principalmente na obtenção de informações da superfície em locais onde a amostragem ou outros tipos de determinações tornam-se difíceis ou até mesmo impossíveis, ou seja, economicamente inviáveis. Esses instrumentos podem ser divididos em dois grupos, de acordo com o tipo de penetração no interior do solo: a) estáticos, quando a penetração é realizada com velocidade constante, com um sistema hidráulico ou elétrico-eletrônico ou mesmo manual e b) dinâmicos ou penetrômetros de impacto onde a penetração é proporcionada por impactos de um corpo metálico. Os penetrômetros estáticos são os mais utilizados em ciência do solo e agronomia e são equipamentos caros e sofisticados quando em versões automáticas e no caso das versões manuais tem-se a dificuldade da inserção com velocidade constante. O segundo grupo, o dos dinâmicos de um modo geral, tem sido bem menos utilizado, em estudos agrônômicos, sendo

mais aplicados em avaliações de solos para fins de construção de estradas e geotécnica (VAZ et al., 2001).

De acordo com Bengough e Mullins (1990), a penetrômetria é considerada um método apropriado para avaliar a resistência á penetração de raízes no solo, mesmo considerando as diferenças marcantes existentes entre uma raiz e um cone metálico.

Para Lanças (1996b), a resistência á penetração é um indicativo intermediário da compactação não sendo uma medição física direta das condições do solo, uma vez que seu valor é variável em função de outros fatores, principalmente de teor de água e do tipo de solo.

O estado de compactação dos solos agrícolas, apesar de ser fortemente influenciado pelo teor de água do solo, pode ser associado, de forma simplificada, a um índice de resistência à penetração de um cone padronizado, denominado índice de cone, obtido por um penetrômetro de cone (CAPPELLI et al., 2001).

A ASABE (2009c) define índice de cone (IC) como sendo a força por unidade de área da base (kPa ou kgf cm^{-2}), necessária para empurrar o penetrômetro no solo, durante um pequeno deslocamento da ponta cônica e determinar que o início da leitura seja feito no instante em que a base do cone seja introduzida numa velocidade de penetração constante de 30 mm s^{-1} .

De acordo com Perumpral (1987), os penetrômetros vêm sendo empregados em grande escala no meio agrícola, para diversas aplicações, por serem de utilização fácil, rápida e barata, com fácil interpretação dos resultados, principalmente para a determinação da resistência do solo à penetração de raízes e detecção de camadas de solo compactadas.

No Brasil, na década de 80, o Planalsucar/IAA desenvolveu um penetrômetro de impacto, para uso na avaliação da compactação do solo (Stolf, 1991).

Williford et al. (1972) construíram um penetrógrafo hidráulico, montado em trator agrícola, para levantamento de campo. Os autores, após dois anos de trabalho em campo, concluíram que o tempo de aquisição dos dados de índice de cone foi de 25% do tempo utilizado por penetrógrafos manuais.

A automação da coleta de dados de resistência do solo à penetração é a opção mais adequada para o levantamento da compactação de solos, no âmbito da agricultura

de precisão; no entanto, penetrógrafos automáticos com sistema dedicado de aquisição de dados, não estão disponíveis no mercado nacional, sendo necessário desenvolvimento experimental para que um modelo comercial possa ser apresentado (BIANCHINI et al., 2001).

Estes aparelhos vêm apresentando diversas evoluções, conforme mostram Balastreire e Amaral (1994); Silva (1998) que desenvolveram equipamentos com aquisição eletrônica.

Já Lanças e Santos (1998) desenvolveram um penetrógrafo hidráulico-eletrônico, que usa como fonte de potência o sistema hidráulico do trator agrícola, através do engate rápido. O sistema de aquisição de dados é composto por um data-logger e acessórios, para receber as informações da célula de carga e do potenciômetro. Os autores constataram, ainda, diferenças significativas entre os dados obtidos pelo penetrógrafo manual e pelo hidráulico, atribuindo essas diferenças ao melhor controle de velocidade obtido no penetrógrafo hidráulico.

Lins (1999) realizou estudos em laboratório, utilizando-se de um penetrógrafo hidráulico que permitia a regulagem da velocidade de penetração do cone. Os ensaios foram conduzidos com velocidades de penetração entre 5 e 100 mm s⁻¹. Os resultados por eles obtidos demonstraram uma tendência crescente e significativa do índice de cone, com o aumento da velocidade de penetração, quando se mantiveram constantes a umidade e a densidade, em todas as colunas de solo ensaiadas.

Bianchini et al. (2001), desenvolveram um penetrógrafo, construído para operar de forma automática, com sistema dedicado de aquisição de dados, que podia armazenar até 187 arquivos e uma interface de comunicação, dispensando a conexão ao microcomputador ou “datalogger”. Verificou-se uma variação de velocidade menor do que 5% com relação à do padrão ASAE (30 mm s⁻¹), para índices de cone entre 500 e 5.684 kPa. O equipamento mostrou-se compacto, de fácil manuseio e com capacidade operacional de até um ensaio por minuto.

Cappelli et al. (2001) desenvolveram um Push Cone Eletrônico, equipamento usado para determinar Índice de Cone até 40 mm de profundidade. O push cone desenvolvido era constituído de três partes: dispositivo mecânico, circuito eletrônico e software. O equipamento apresentou bons resultados na calibração e nos testes de campo.

Reinert et al. (2007) desenvolveram um penetrômetro de cone com taxa constante de penetração. A quantificação da resistência era realizada com célula de carga, a distância de penetração no solo com potenciômetro, e a aquisição e o armazenamento de dados com placas eletrônicas. A concepção do equipamento, que empregava velocidade constante de penetração da haste no perfil do solo, possibilitou a aquisição de grande quantidade de dados com pequena variação de profundidade (5 mm), atingindo a profundidade máxima de 0,80 m. O equipamento foi eficaz na aquisição de dados de resistência mecânica do solo à penetração em profundidade.

Beutler et al. (2007) compararam os resultados obtidos com três penetrômetros, em três níveis de compactação. Determinou-se a resistência do solo à penetração com os penetrômetros de impacto, estático de anel dinamométrico e eletrônico de laboratório. Em solo compactado, o penetrômetro de impacto apresentou valores superiores de resistência à penetração, comparados aos penetrômetros de anel dinamométrico e eletrônico; porém, todos foram eficientes para caracterizar a compactação. Os resultados obtidos com os penetrômetros de anel dinamométrico e com o eletrônico foram semelhantes.

Alihamsyah et al. (1990) utilizaram um penetrômetro de cone para medir, horizontalmente, a resistência mecânica do solo em tempo real, que aumentou significativamente a densidade espacial da medida. Seu sistema utilizou uma haste com uma ponta cônica ligada a uma célula de carga.

Upadhyaya e Wulfsohn (1993), em função das dificuldades apresentadas para se obter as propriedades do solo “in situ”, construíram um aparelho instrumentado para obtenção dos parâmetros que mais se correlacionassem com a tração e a compactação. Esse aparelho, instalado no engate de três pontos do trator, foi desenvolvido para medir a resistência do solo à penetração (penetrômetro com célula de carga e potenciômetro para medir o deslocamento do cone através do solo), os parâmetros ligados ao recalque do solo obtidos através da utilização de diversos pratos para cravamento no solo, célula de carga para avaliar o esforço dispendio e potenciômetro para avaliar o deslocamento do prato com a carga. Os parâmetros ligados ao cisalhamento do solo foram medidos pela avaliação da força necessária (através de célula de carga) para cisalhar o solo utilizando pratos ranhurados, sendo o ângulo de torção atingido para que houvesse o cisalhamento do solo, medido por potenciômetros.

Glancey et al. (1989) projetaram um escarificador instrumentado para medir a resistência mecânica do solo em diferentes profundidades no campo. Seu projeto incluiu seis extensômetros de resistência elétrica montados diretamente atrás da borda cortante frontal e outros seis na parte traseira da haste, na mesma profundidade que os extensômetros frontais. Um sensor adicional foi instalado para medir as forças verticais que agem no escarificador.

Raper et al. (1999) criaram uma sonda de múltiplos penetrômetros de cone montada na parte traseira de um trator para automatizar o processo de amostragem e permitir o cálculo da média de cinco medidas simultâneas.

Rooney et AL. (2002) adicionaram um sensor de atrito e um sensor óptico para operar hidraulicamente um penetrômetro de cone.

Chukwu e Bowers (1999) desenvolveram um sensor para três camadas diferentes do solo baseados no equipamento e na utilização de ponteiras na posição horizontal desenvolvidos por Alihamsyah et al. (1991) dois autores.

Glancey et al. (1996) e Ehrhardt et al. (2001) utilizaram a força de tração de um implemento como indicador da resistência mecânica do solo, nesse caso, mensurada com as hastes do implemento rompendo o solo no sentido horizontal.

Sirjacobs et al. (2002) usaram um anel transdutor octogonal numa barra porta-ferramenta montada para medir forças horizontais e verticais, assim como o momento torçor produzido pela haste quando puxada através do solo. Uma haste instrumentada similar foi desenvolvida por Owen et al. (1987).

4.3 Escarificação e Subsolagem

Para a operação de descompactação do solo, escarificadores e subsoladores são os implementos mais usados, devido à maior capacidade de penetração e menor desagregação do solo, em relação aos arados e grades de discos (ARAÚJO et al., 2001).

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 com isto, menor alteração da estrutura do solo.

Escarificar o solo consiste em mobilizá-lo a uma determinada profundidade no máximo 0,30 m, tendo-se uma mínima mobilização superficial Machado (2005a). O segundo o mesmo autor, por não provocar a inversão do solo, a escarificação causa uma menor desagregação, sendo que os resíduos vegetais ficam depositados na superfície do solo, facilitando, assim, o controle da erosão, melhorando a infiltração e retenção de água, a estrutura e a porosidade do solo.

De acordo com Silveira (1988), escarificar significa romper o solo da camada arável de 15 a 30 cm com o uso de implementos denominados escarificadores. Esses são implementos de hastes que são utilizados no preparo primário do solo, e que apresentam vantagens sobre os implementos de discos pelo fato de não promoverem uma inversão da camada de solo obtendo-se, com isto, maior capacidade operacional e principalmente menor alteração da estrutura do solo.

Segundo Gadanha Júnior et al. (1991) e Lanças (2002), o escarificador é um implemento, cuja a função é promover a desagregação do solo, no sentido de baixo para cima, realizando mobilização até a profundidade de 0,35 m. É semelhante a um subsolador, porém trabalhando em profundidades menores e com espaçamento entre hastes também menor.

A escarificação mecânica tem sido sugerida para descompactação do solo em áreas de sistemas de plantio direto consolidado segundo Camara e Klein (2005), pois reduz a densidade do solo e melhora a condutividade hidráulica, a taxa de infiltração, tornando o solo mais favoráveis ao desenvolvimento das plantas.

Pierce et al. (1992) constataram efeito residual da escarificação em um solo franco arenoso, após dois anos, concluindo que este efeito pode diminuir, mas persiste por anos.

Ralisch (2001) estudou o efeito da escarificação sob um Latossolo Vermelho, de textura argilosa, tendo concluído que a operação de escarificação resulta em efeitos imediatos na redução da resistência do solo à penetração, porém os mesmos não

perduram por mais de um cultivo. Porém, Secco e Reinert (1997), comparando escarificadores em relação ao plantio direto, concluíram que o uso de escarificadores proporcionou uma maior porosidade total do solo e rugosidade superficial, e essas condições têm um efeito residual por pelo menos até 10 meses após o preparo.

Segundo Silva (2003), a escarificação é uma prática agrícola que pode ser utilizada para diminuir o estado de compactação em lavouras sob plantio direto, ocasionando incremento de rendimento de grão na cultura do milho.

Após dois anos da escarificação de um Latossolo Vermelho sob plantio direto, Vieira e Klein (2007) não observaram diferenças na densidade do solo, porém a taxa de infiltração de água ainda era maior no plantio direto, que recebeu escarificação.

Resultados apresentados por Rosa (2009), demonstraram que o solo escarificado por dois anos apresentou boas condições estruturais para o desenvolvimento das culturas, pois apresentou menor densidade na linha de tráfego e maior porosidade total.

Segundo a Asabe (2009a), o subsolador é um implemento de mobilização do solo que opera a profundidade superior a 0,35 m, suficientes para romper as camadas compactadas, para o crescimento das raízes e movimentação de água no solo.

Para Boller (2001), a subsolagem é uma operação que objetiva a descompactação do solo, quando a presença de uma camada compactada for superior à profundidade de 0,30 m.

A subsolagem e escarificação deve ser realizada de modo que as ponteiros do subsolador trabalhem de 0,05 a 0,10 m abaixo da camada compactada Lanças (2002), já Ripoli e Ripoli (2007) recomenda 0,05 m abaixo da camada compactada.

Os efeitos benéficos da subsolagem são normalmente temporários e a resistência à penetração retorna a seus valores originais em cerca de 2 a 4 anos, dependendo do tipo de solo e das práticas culturais predominantes Busscher et al. (2002). Segundo os mesmos autores esses efeitos são influenciados pelo volume acumulativo de precipitações, ocasionando o aumento da reconsolidação do solo. Em solos estruturados, a reconsolidação pode ser influenciada pela dinâmica da água no espaço poroso inter e intra-agregados e pode ser afetada também pelo selamento superficial ou pela estabilidade estrutural que pode modificar a quantidade de água que infiltra no solo.

4.4 Dinâmica do solo agrícola na interação ferramenta-solo

O princípio de funcionamento dos subsoladores e escarificadores é o de uma força, que aplicada por uma ponteira, promove um deslocamento do solo à sua frente e de baixo para cima, o que leva sua ruptura, por cisalhamento. Quando a tensão é máxima e o solo estando adensado, leva a uma ruptura em um ângulo de 45° Ripoli e Ripoli (2004).

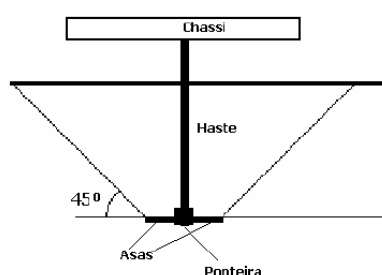


Figura 1. Ruptura do solo causada pelo cisalhamento devido à força aplicada pela ponteira.
Fonte: Adaptado Lanças (2002)

A fratura por cisalhamento, de corpos rígidos, pode ser aplicada aos solos utilizando a teoria proposta por Mohr-Coulomb (UPADHYAYA et al.,2009). A equação (1) pode ser dada por:

$$\tau = C + \sigma_n \text{ tang } \Phi \quad (1)$$

C = coesão do solo

Φ = ângulo de atrito interno

tang = coeficiente de atrito entre os materiais

σ_n = tensão normal

τ = tensão de cisalhamento

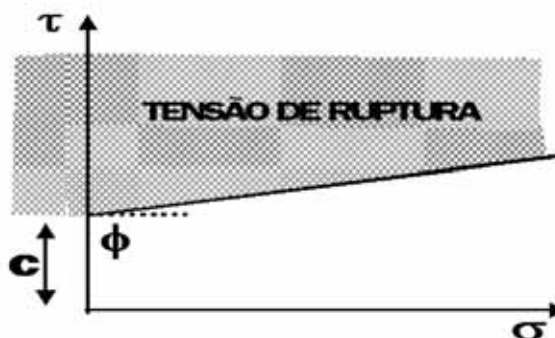


Figura 2. Gráfico da resistência do solo em relação à tensão cisalhamento. Fonte: adaptado Ripoli e Ripoli (2004).

Segundo Stanford (1981), a forma de ruptura do solo, provocada por uma haste estreita e rígida, pode ser classificada em: ruptura escoada ou dúctil e ruptura frágil. O autor afirmava ainda que, em função do teor de água, densidade do solo, velocidade de deslocamento e da inclinação da ferramenta, pode se determinar um coeficiente ou índice de ruptura, utilizando como limite entre os estados de ruptura do solo.

Conforme citado por Upadhyaya et al. (2009) os estudos conduzidos por Elijah e Weber (1971) não foi citado classificaram em quatro modelos de ruptura do solo:

- a) Ruptura em planos de cisalhamento: a tensão de cisalhamento do solo se propaga a partir da ponta da lâmina, em direção à superfície do solo, formando ângulos próximos de 45° com a horizontal. Com o movimento da ferramenta outros planos de ruptura surgem e o processo se repete. Esse tipo de ruptura possui carga cíclica, com picos máximos e mínimos.
- b) Ruptura escoada: não foram identificados planos distintos de ruptura do solo. Há uma compressão deste na direção horizontal e um alongamento na vertical. A espessura de corte do solo é perpendicular à direção de deslocamento, quanto mais elevada for, do que a aprofundidade de corte, haverá, uma mudança para fratura por planos de cisalhamento quando há aumento na velocidade da ferramenta.
- c) Ruptura curvada: apresenta características intermediárias entre os dois modelos anteriores, há escoamento do solo sobre a ferramenta e também começam a surgir planos de cisalhamento desde a ponta da ferramenta até a superfície do solo.

- d) Ruptura tensionada: blocos de solo são arrancados, a partir da ponta da ferramenta, com planos de cisalhamento se propagando para frente e para cima.

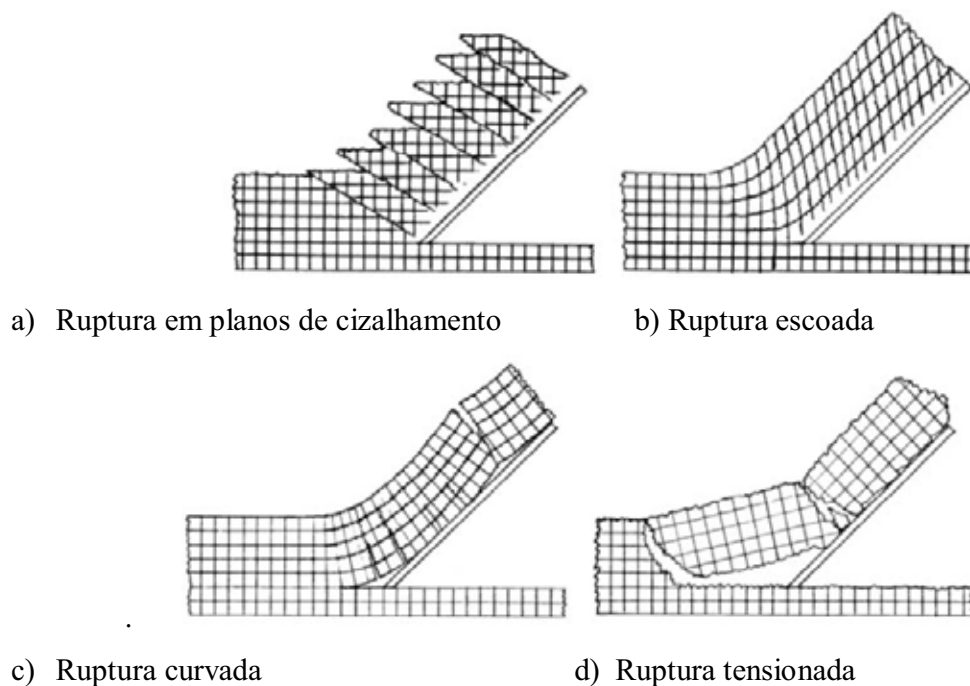


Figura 3. Modelos de ruptura do solo. Fonte: adaptado Lanças (1987)

A interação ferramenta/solo, segundo McKEYS (1989) comenta que existem dois modelos básicos de ruptura do solo: ruptura bidimensional e ruptura tridimensional do solo.

Segundo o mesmo autor a ruptura bidimensional do solo ocorre quando a largura da ferramenta de corte do solo é bem maior que a profundidade de corte (dez vezes maior ou mais). Quando a largura da ferramenta não excede esses limites, o modelo de ruptura do solo passa a ser tratado como Tridimensional. Nesta situação uma considerável quantidade de solo se movimenta lateralmente em relação à ferramenta, além do deslocamento frontal e vertical, que acontece no modelo bidimensional.

Godwin e Spoor (1977), desenvolveram modelos e realizaram experimentos de campo para prever o efeito da profundidade de corte, bem como da relação entre a largura e a profundidade, na força de tração exigida pela ferramenta.

A partir desses estudos surgiu o conceito de profundidade crítica, ou seja, a máxima profundidade, relativa a uma determinada largura da ferramenta, até a qual o solo se rompe totalmente para a frente, para cima e para os lados. Para profundidades maiores do que a crítica, conservando-se a largura da ferramenta, o solo não mais se rompe e passa a fluir horizontalmente através da ferramenta, ou seja, o rompimento do solo só acontece até a profundidade crítica.

Mouazen e Memène (1998), aplicando a teoria dos elementos finitos no estudo de subsoladores e escarificadores em condições de laboratório verificaram que o modelo teórico indicou que o ângulo da haste de 75° e o ângulo da ponteira de 15° exigiu menor força horizontal e vertical, desta forma com menor requerimento de energia.

Taylor e Beltrame (1980) indicaram a profundidade de subsolagem ideal situa-se dentro da faixa de 5 a 7 vezes a largura da ponteira. Segundo os mesmos autores profundidade maior que a crítica, mostraram a ocorrência de compactação nas camadas mais profundas e uma mobilização desuniforme do solo.

Spoor e Godwin (1978) recomendaram que a distância entre as hastes do subsolador deve variar entre 1,0 e 1,5 vezes a profundidade de trabalho, para ponteiras convencionais, já para ponteiras aladas esta faixa muda de 1,5 a 2,5 vezes.

Segundo Machado et al. (2005a), a profundidade e a distância entre as hastes do escarificador segue a mesma orientação do subsolador.

Araújo et al. (2001) afirmam que dentre as diversas características dos subsoladores e escarificadores, que devem ser consideradas para sua correta utilização, está a configuração das hastes. Na interação solo-ferramenta as variações geométricas da ferramenta que estão associadas a outros fatores externos, tais como: a velocidade de deslocamento da máquina, a profundidade de trabalho da ferramenta e as condições do solo, resultam em diferentes necessidades de esforço de tração e em diferentes reações do solo (PORTELLA, 1983).

4.5 Consumo de energia e desempenho de escarificadores e subsoladores

Santos (2010) avaliando o comportamento da cultura da melancia sob diferentes sistemas de preparo do solo (preparo convencional do solo, plantio direto e plantio

direto escarificado com uma, duas, três, quatro e cinco hastes de escarificação), observou que a força de tração, demanda de potência exigida na barra de tração, patinamento dos rodados e o consumo de combustível aumentaram em virtude da adição do número de hastes de escarificação na operação de preparo do solo.

Yshimine (1993) avaliou o desempenho operacional de um escarificador com haste parabólica, em dois Latossolos Vermelhos um de textura média, e outro de textura argilosa e um Nitossolo Vermelho. O pesquisador verificou que a área mobilizada de solo e a largura de corte foram maiores para os solos mais argilosos, apesar deles também terem apresentado maior demanda por força de tração.

Derpsch (1984) em estudos conduzidos em Latossolo roxo, com o objetivo de avaliar diferentes implementos de preparo do solo no que se refere a rendimento, gasto de combustível e efeito sobre o solo, após sete anos de plantio direto e preparo convencional concluíram que o preparo mínimo (plantio direto e escarificação) resultou na média dos anos em rendimento superiores ao preparo convencional. O consumo de combustível foi significativamente menor no caso do escarificador em relação ao preparo convencional com arado. O escarificador conseguiu quebrar com maior facilidade as camadas adensadas detectadas no solo, sem provocar “pé de arado”.

Fielke (1984) realizou avaliação do desempenho de vários tipos de ponteiros escarificadoras de 0,20 e de 0,175 m de largura. As velocidades utilizadas foram de 5,8 e 11 km h⁻¹ e as profundidades de trabalho foram de 0,08 e 0,10 m. O autor concluiu que houve uma diferença de 60% na força de tração entre ponteiros de estilos diferentes e que a redução de 45% na força de tração foi obtida modificando-se a ponteira; entretanto, o autor não cita as modificações geométricas realizadas.

Ferguson (1970) mensurou a força de tração de um escarificador com ponteira. Foram feitas diversas combinações de ponteiros para avaliar o efeito da força de tração em condições de solo compactado. O autor concluiu que a força média de tração na ponteira trabalhando a 0,10 m de profundidade, em solo não trabalhado anteriormente, variou de 3070 a 3973 N.

Lanças (1987) avaliando subsolador em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e velocidades de deslocamento, observou que a haste parabólica

apresentou o menor consumo específico e que variação da velocidade de deslocamento, não alterou a profundidade, largura de trabalho e a área mobilizada do solo.

Godwin et al. (1984) mostraram que a posição relativa das hastes na barra porta-ferramenta influencia significativamente os resultados obtidos na operação de subsolagem. A utilização de hastes superficiais trabalhando a frente das hastes profundas aumentou consideravelmente a área mobilizada do solo sem exigir um esforço tratorio muito superior.

Ao avaliar um subsolador com haste parabólica, nas profundidades de 0,30, 0,40 e 0,50 m, Bicudo (1990) verificou que as subsolagens realizadas a 0,50 m de profundidade provocaram aumento na força de tração, no consumo horário de combustível e na resistência específica operacional. Por outro lado, essa profundidade provocou valores menores de área útil trabalhada e de capacidade de campo efetiva.

Segundo Salvador et al. (2008), a realização da subsolagem depois dos sistemas de preparo periódico diminuiu 15% na potência na barra de tração e 16,5% no consumo de combustível.

4.6 Uso de ferramentas de Agricultura de Precisão

A pesquisa conduzida aproximadamente há 84 anos por Linsley e Bauer (1929) no campo experimental da Universidade de Illinois, comprovou a variabilidade espacial da acidez do solo, no qual coletaram 23 amostras em uma área de 40 acres, construindo um mapa de acidez, em que os autores obtiveram reduções significativas nos custos da produção de grãos, sem o comprometimento da produtividade, realizando a aplicação diferenciada de calcário em uma área experimental.

Devido a inexistência de equipamentos e ferramentas adequadas, os conceitos de gerenciamento localizado tiveram um ciclo muito curto e só foram viáveis em pequenas áreas, visto que as operações eram realizadas manualmente Guerra (2006).

No entanto, somente no final da década de 1980, com o desenvolvimento do GPS, quando na Europa foi gerado o primeiro mapa de produtividade e

nos EUA, fez-se a primeira adubação com doses variadas é que essa técnica se tornou viável, sendo predominantemente denominada de Agricultura de Precisão (AP) Molin (2009).

A AP compreende um conjunto de técnicas e metodologias que visam otimizar o manejo de cultivos e a utilização dos insumos agrícolas, proporcionando máxima eficiência econômica (MAPA, 2009).

A Agricultura de Precisão é um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial de propriedades do solo e das plantas encontradas nas lavouras e visa à otimização do lucro, sustentabilidade e proteção do ambiente (MOLIN, 2009).

A agricultura de precisão é um conjunto de tecnologias destinadas ao manejo de solos, culturas e insumos, que visa um melhor e mais detalhado gerenciamento do sistema de produção agrícola em todas as etapas, desde a semeadura até a colheita (EMBRAPA, 2011).

Para Reichert et al. (2007), conhecer os locais críticos de compactação em uma área auxilia o manejo específico, que pode ser realizado de forma a atuar somente nos locais afetados pelo problema, possibilitando assim a diminuição dos custos de operação e gasto de tempo com mão de obra.

Machado et al. (2005b) utilizando GPS, penetrômetro manual, construiu mapas de índice de cone, quando relacionados com a produtividade de milho, verificaram que a cada incremento de 1 MPa no índice de cone, a produtividade de milho decresceu em 840 kg. ha⁻¹.

Uma haste construída e equipada com extensômetros de resistência elétrica ("strain gages") e um potenciômetro foram projetados para se moverem para cima e para baixo, continuamente, ao ser puxada através do solo (MANOR e CLARK, 2001). Esse sistema foi desenvolvido para detectar a profundidade da camada de impedimento do solo.

Adamchuk et al. (2001) utilizaram uma haste lisa vertical com extensômetros de resistência elétrica strain gages dispostos em diferentes níveis na parte traseira da haste para registrar as forças horizontais do solo.

Andrade et al. (2001) usaram uma haste equipada com células de carga para medir a resistência mecânica do solo a uma profundidade de 0,60 m em incrementos de 0,075 m e, para tanto, utilizaram uma célula de carga separada para cada profundidade.

Girardello (2010) trabalhando com escarificador a taxa variável através de mapas das camadas compactadas concluiu que em zonas de baixa produtividade houve aumento da produtividade de soja comparada com escarificação fixa.

O cultivo com profundidades variáveis fornece a potencialidade de controlar a compactação de solo e a conservar energia requerida para o cultivo, de acordo com Morgan e Ess (1997).

Adamchuk et al. (2006) avaliou duas hastes com função de mapeamento da resistência do solo, sendo: a primeira uma haste instrumentada com Strain Gage e a segunda uma haste instrumentada com 5 células de carga. Os resultados de campo demonstraram que os dois sistemas apresentam uma baixa correlação com penetrômetro de cone, indicando mais estudos que deverão ser realizados para melhoria dos equipamentos.

Um sistema de mapeamento para a resistência mecânica do solo em três profundidades foi desenvolvido e testado, o sistema utilizou três hastes independentes de detecção, um Sistema de Posicionamento Global (GPS) e um sistema de aquisição de dados. A avaliação de campo mostrou que a comparação das medições, em solos e restos culturais diferentes, obtidas utilizando as hastes instrumentadas e o penetrômetro, resultaram em uma correlação aceitável. No mesmo experimento alterando a velocidade de deslocamento das hastes entre 0,45 a 2,24 m s⁻¹ não houve efeito significativo nas medições de solo quanto a resistência mecânica Siefken et al. (2005).

Adamchuk e Molin (2006) buscaram uma solução alternativa ao uso do penetrômetro, através de três hastes instrumentadas, acopladas a uma barra porta-ferramenta montada no engate de três pontos do trator, com um receptor de GPS e um sistema de aquisição de dados no qual gera mapas de resistência mecânica do solo ao longo do deslocamento de uma haste em três profundidades. O sistema mostrou ser mecanicamente simples e confiável. Os testes em campo demonstraram que o sistema podia produzir mapas que denotavam a variabilidade espacial da referida resistência nas áreas amostradas, com alta resolução, densidade de amostragem elevada e com capacidade operacional ainda mais elevada se comparada com levantamentos feitos com métodos convencionais.

Sánchez et al. (2007) desenvolveram e avaliaram um sensor de perfil de compactação em tempo real, composto de oito elementos de corte, projetados para fornecer informações sobre a resistência do solo ao corte para cada camada de 0,075 m até uma

profundidade total de 0,6 m, fornecendo dados para confecção de mapas de resistência a penetração.

O conceito de sensores para relacionar as propriedades físicas do solo, medições de compactação do solo, mapeamento simultâneo de resistência mecânica do solo, em diferentes profundidades e conteúdo de água tem mostrado ser uma abordagem promissora. Auxiliando significativamente o nosso conhecimento das variáveis físicas do solo e potencialmente, aumentar a eficiência da agricultura Adamchuk et al. (2008).

.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em quatro etapas: pré-ensaio avaliando o subsolador em profundidades variáveis em campo, desenvolvimento e construção das hastes instrumentadas, ensaio de avaliação do sistema eletrônico em bancada e ensaio para avaliação dos equipamentos em campo.

5.1 Pré-ensaio

O presente estudo, foi realizado em maio de 2011, na Fazenda Experimental da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Campus de Botucatu, estado de São Paulo. A área localizada geograficamente a: 22° 50' Latitude Sul, 48° 25' Longitude Oeste e altitude de 791 m.

O clima, segundo a classificação de Köppen (1948) citado por (CUNHA et al., 1999). sendo do tipo Cwa, clima temperado quente (mesotérmico) com uma estação seca, que vai de abril a agosto e a estação chuvosa que compreende os meses de setembro a março, sendo o mês de janeiro o mais chuvoso.

O solo da área experimental foi classificado, conforme a nomenclatura do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (1999), como Nitossolo Vermelho Distroférrico. A área estava compactada, por ser utilizada como pista de solo mobilizado para ensaio de máquinas, não apresentando restos vegetais.

5.1.1 Equipamentos

Durante a condução do experimento, foram utilizados os seguintes equipamentos:

Trator marca John Deere, modelo 6600 (Figura 4), tração dianteira auxiliar (4x2 TDA), 6 cilindros, potência máxima de 89 kW (121 cv), com 3924 N (400 kg) lastros metálicos no eixo dianteiro e no eixo traseiro 3825 N (390 kg) . Montado em pneus 18.4-26 com 26 psi e 23.1-30 com 24 psi todos com 75% de lastro líquido. Tendo uma distribuição de carga de 40 % eixo dianteiro e 60% eixo traseiro com peso total de 64696 N (6595 kg), com uma relação peso potência⁻¹ de 55 kg cv⁻¹. Vazão no sistema hidráulico de 66 L min⁻¹ a 2400 rpm.

Subsolador de arrasto da marca Jan, modelo “Jumbo Matic” (Figura 4), com cinco hastes subsoladoras, equipado com rodas de controle de profundidade acionadas por atuadores hidráulicos, discos de corte da palha da superfície com largura de trabalho de 2,80 m, distância entre hastes de 0,4 m, profundidade máxima de 0,40 m e massa total de 13734 N (1400 kg).



Figura 4. Trator John Deere 6600 e subsolador Jumbo Matic.

5.1.2 Material utilizado para coleta de amostras dos parâmetros de caracterização do solo.

5.1.2.1 Teor de água no solo

Para a coleta das amostras e determinação do teor de água no solo, usou-se o método gravimétrico padrão, sendo utilizadas cápsulas de alumínio identificadas, fita plástica, enxadão, balança digital de precisão de 0,01 g e estufa elétrica com temperatura de 110° C, durante 24 horas.

5.1.2.2 Resistência do solo á penetração

Na determinação da resistência do solo à penetração, foi utilizado o penetrômetro da marca “Falker” modelo PLG 1020 penetroLOG (Figura 5), com profundidade máxima de 0,60 m, a profundidade é controlada por um sensor tipo sonar que compõe calculo de velocidade de penetração, avisando ao usuário quando a velocidade está fora do padrão, tendo a opção de ser abortada a medição. O cone na ponta da haste tinha o padrão descrito pela “ASABE” (2009b), com ângulo de 30° e área basal de 130 mm².



Figura 5. Penetrômetro usado no experimento.

5.1.2.3 Determinação da densidade do solo

Utilizou-se o método do anel volumétrico para se determinar a densidade do solo, conforme descrito pela (EMBRAPA, 1997).

5.1.3 Material utilizado para coleta de dados dos parâmetros de avaliação

5.1.3.1 Consumo horário e operacional de combustível

Para medição do consumo horário de combustível foram utilizados dois fluxômetros volumétricos M-III, da FLOWMATE fabricado pela OVAL Corporation do Japão e distribuído no Brasil pela K&K do Brasil, modelo LSN41L8-M2, vazão de 1 mL pulso⁻¹, instalados um na saída do tanque de combustível e antes do sedimentador e o outro fluxômetro instalado no retorno para o tanque de combustível.



Figura 6. Fluxômetro instalado no trator

5.1.3.2 Força de Tração na Barra

A determinação de força na barra de tração foi obtida através de uma célula de carga da marca Líder com capacidade de 100000 N e sensibilidade de $2,16 \text{ mV.V}^{-1}$, instalada em uma estrutura metálica (“berço”) entre o trator e o equipamento tracionado (Figura 7).

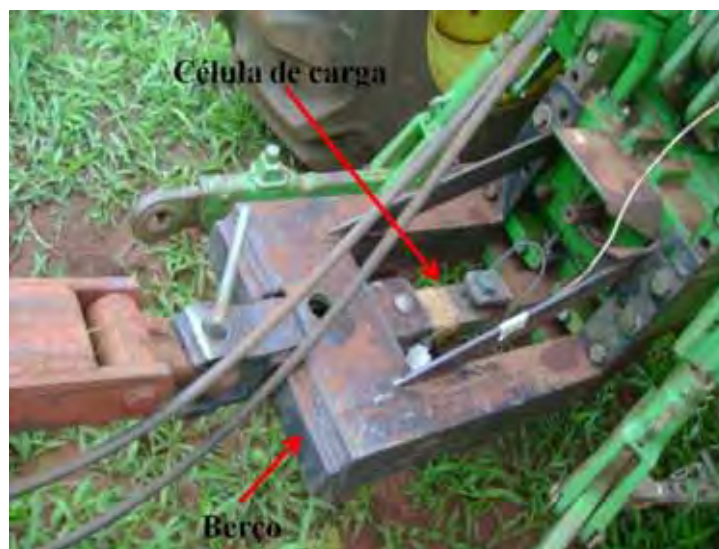


Figura 7. Berço e a célula de carga

5.1.3.3 Patinagem dos Rodados do Trator

A determinação da patinagem das quatro rodas do trator foi obtida utilizando-se geradores de pulsos, modelo GIDP-60-U-12V, com uma frequência de 60 pulsos por volta (Figura 8).



Figura 8. Geradores de pulsos “encoder”.

5.1.3.4 Sistema de Aquisição de Dados

Para aquisição de dados, foi utilizado um controlador lógico programável (CLP) marca Masquetto, com interface homem - máquina incorporado (IHM) para aquisição dos dados de força de tração instantânea e integrada, de rotação das quatro rodas do trator consumo e temperatura do combustível, permitindo a leitura e o armazenamento dos sinais enviados pelos sensores instalados nos rodados e no sistema de alimentação do trator conforme citado por Gabriel Filho et al. (2008).



Figura 9. Controlador lógico programável “CLP”

5.1.4 Delineamento experimental

O trabalho foi conduzido em delineamento experimental de blocos casualizados, com três repetições e cinco tratamentos. Desta forma, o universo amostrado foi composto de 15 parcelas experimentais, distribuídas em três blocos (B1, B2 e B3).

5.1.5 Descrição dos tratamentos

O experimento foi constituído de cinco tratamentos, sendo utilizada uma velocidade de deslocamento (5 km h^{-1}) do trator e três profundidades de trabalho do subsolador, as quais foram obtidas alterando-se a altura da roda de transporte, através do atuador hidráulico e também alterando profundidade do equipamento através dos furos de regulagem do rolo destorroador contando de baixo para cima: profundidade de 0,15 m primeiro furo, profundidade de 0,25 m segundo furo, profundidade de 0,35 m quinto furo. Os tratamentos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos.

Tratamentos	Profundidade de subsolagem (m)
T1	0,15
T2	0,25
T3	0,35
T4	0,35
T5	-



Figura 10. Rolo compactador.

Os tratamentos T1 a T3 a área já estava compactada pelo tráfego de máquinas na pista, sendo feita somente as regulagens no subsolador para cada tratamento conforme a Tabela 1.

Para o tratamento T4 a parcela foi previamente subsolada a 0,40 m e em seguida passada um vez o rolo compactador da marca Prata modelo 1000, (Figura 10) interligado em 3 partes de 9810N, para simular uma área com índice de cone abaixo de 2 MPa.

No tratamento T5 o trajeto da parcela foi realizado com o subsolador em posição de transporte, para simular um valor aproximado de um trator trafegando com as hastes instrumentadas. A velocidade foi definida em função do índice de patinação e velocidade do trator, operando com rotação no motor de 2400 rpm.

5.1.6 Instalação e condução do experimento

Cada parcela do experimento possuía 5 m de largura por 20 m de comprimento, sendo que, entre os blocos (B1 a B3) foi deixado um carreador com 20 m de comprimento a fim de permitir as manobras e estabilização dos equipamentos antes do início da aquisição dos dados.

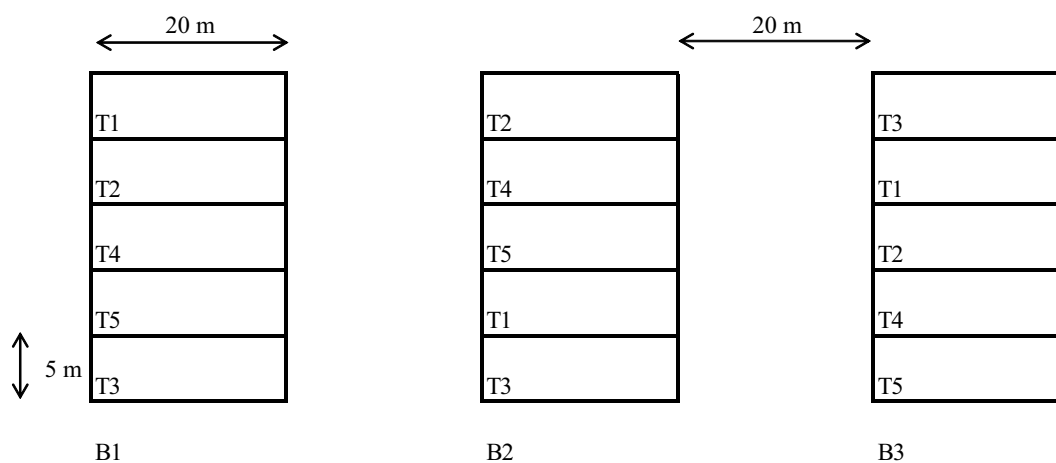


Figura 11. Esquema da disposição dos tratamentos e blocos no campo

5.1.7 Métodos de determinação dos parâmetros de caracterização do solo

5.1.7.1 Teor de água no solo

Foram coletadas uma amostra de solo, aleatoriamente em cada parcela, nas camadas de 0,10-0,20; 0,20-0,30 m, no momento da realização do ensaio. As amostras foram colocadas em cápsulas de alumínio, vedadas com fita plástica e transportadas ao laboratório, onde foram pesadas em balança digital de precisão de 0,01g e levadas à estufa elétrica, com temperatura 110° C por 24 horas.

Para a determinação do teor de água no solo, foi utilizado o método gravimétrico padrão, com base na massa de solo contida numa amostra sobre a massa da amostra seca em estufa à temperatura de 110° C por 24 horas (EMBRAPA, 1997).

5.1.7.2 Índice de cone

Determinou-se o ‘índice de cone (IC)’, antes da aplicação dos tratamentos, utilizando-se o penetrômetro descrito no subitem 5.1.2.2. Foram feitas, aleatoriamente, três amostragens em cada parcela experimental. Os valores da resistência do solo à penetração obtidos nos registros foram classificados (a cada 0,10 m) até 0,30 m de

profundidade. Os dados coletados foram enviados ao computador via cabo USB, a visualização dos dados foi realizada com auxílio do programa computacional penetroLOG.

5.1.7.3 Densidade do solo

As amostras foram retiradas nas camadas a cada 0,10 m até 0,30 m de profundidade, sendo três amostras por parcela. As amostras de solo foram antes da preparação do solo, acondicionadas em cápsulas de alumínio, lacradas com fita plástica até a sua chegada ao laboratório.

5.1.8 Métodos de determinação dos parâmetros de avaliação

As equações demonstradas de 2 a 7 foram estabelecidas segundo Gamero e Lanças (1996), ASAE (1999) e Mialhe (1974).

5.1.8.1 Consumo horário de combustível

Para avaliar o consumo horário de combustível do trator, utilizou-se do fluxômetro descrito no subitem 5.1.3.1 o qual foi instalado em um suporte próximo ao filtro de combustível do trator. Sendo registrado pelo CLP através de cabo que a cada uma unidade de pulso equivale a 1 mL de combustível que passou pelo fluxômetro. Contabilizando-se a quantidade de pulsos e o tempo gasto para percorrer cada parcela, o consumo horário de combustível foi calculado pela Equação 2.

$$\text{CHC} = \frac{\sum p.3,6}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde:

CHC = consumo horário de combustível (L h⁻¹);

$\sum p$ = somatório de pulsos, equivalente ao somatório de mL de combustível gasto para

percorrer a parcela experimental (mL);

Δt = tempo gasto para percorrer a parcela experimental (s);

3,6 = fator de conversão.

5.1.8.2 Consumo operacional de combustível

O consumo operacional de combustível ou combustível por unidade de área foi obtido da relação entre o consumo horário de combustível e a capacidade de campo efetiva, pela Equação 3.

$$Coc = \frac{CHC}{CCE} \quad (3)$$

Onde:

Coc = consumo operacional de combustível ($L ha^{-1}$);

CHC = consumo horário de combustível ($L h^{-1}$);

CCE = capacidade de campo efetiva ($ha h^{-1}$).

5.1.8.3 Potência média requerida na barra de tração do trator

A potência média exigida na barra de tração foi calculada em função da força de tração e da velocidade de deslocamento, utilizando a Equação 4.

$$Pm = \frac{Fm.Vm}{3,6} \quad (4)$$

Onde:

Pm = potência média requerida na barra de tração do trator (kW);

Fm = força de tração média requerida na barra de tração (kN);

Vm = velocidade média de deslocamento ($km h^{-1}$);

3,6 = fator de conversão.

5.1.8.4 Velocidade média de deslocamento do conjunto

A velocidade média de deslocamento foi mensurada, cronometrando se o tempo necessário para percorrer cada parcela de 20 m de comprimento, calculada de acordo com a Equação 5.

$$V_m = \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot 3,6 \quad (5)$$

Onde:

V_m = velocidade média (km h^{-1});

Δs = distância percorrida (m);

Δt = tempo decorrido (s);

3,6 = fator de conversão.

5.1.8.5 Patinagem dos rodados do trator

A mensuração da patinagem das quatro rodas do trator foi realizada utilizando sensores geradores de pulsos localizados no centro de cada uma das rodas, os quais realizam conversão de movimentos rotativos ou deslocamentos lineares em pulsos elétricos. A patinagem de cada rodado do trator foi determinada pela relação entre o número de pulsos da roda quando o trator operou sem carga na barra de tração e o número de pulsos da roda quando operou com carga na barra. Para o cálculo da patinagem, utilizou-se da Equação 6.

$$\text{Pat} = \left(\frac{NPC - NPS}{NPC} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

Pat = patinação das rodas (%);

NPC = número de pulsos da roda do trator operando com carga na barra de tração (subsolador);

NPS = número de pulsos da roda do trator operando sem carga na barra de tração.

5.1.8.6 Capacidade de campo efetiva

A capacidade de campo efetiva foi determinada pela relação entre a área útil de cada parcela trabalhada com respectivo tempo de percurso, Equação 7.

$$CCE = \frac{Atr}{\Delta t} \cdot 0,36 \quad (7)$$

Onde:

CCE = capacidade de campo efetiva (ha h⁻¹);

Atr = área útil da parcela trabalhada (m²);

Δt = tempo gasto no percurso da parcela experimental (s)

0,36 = fator de conversão

5.1.9 Simulação dos dados

Após o ensaio de campo, no qual variou-se as profundidades de subsolagem, foram simuladas varias áreas de um talhão com uma área total de 100 ha. A área (2) com a compactação maior que 2 MPa utilizou-se profundidade do subsolador fixa (0,35 m) e para as áreas (1) com compactação menor que 2 MPa o subsolador ficou em posição de transporte, para simular um sistema eletrônico interpretando que o solo não estava compactado (profundidade variável) e profundidade fixa a 0,35 m do subsolador para o sistema tradicional. Para realizar a simulação utilizou-se a planilha eletrônica Excel. Sendo realizada as seguintes simulações de áreas conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2. Simulação de áreas compactadas e não compactadas trabalhadas com o subsolador.

Simulação 1		Simulação 2		Simulação 3	
Compactação	Área (ha)	Compactação	Área (ha)	Compactação	Área (ha)
< 2 MPa)	(1) 25	< 2 MPa)	(1) 50	< 2 MPa)	(1) 75
> 2 MPa)	(2) 75	> 2 MPa)	(2) 50	> 2 MPa)	(2) 25
Área total (ha)	100	Área total (ha)	100	Área total (ha)	100

Os dados referentes ao IC médio nas profundidades de 0,10 a 0,30m foram calculados, valores médios dos tratamentos T1 a T3, (Tabela 1) para o subsolador trabalhando a 0,35 m em áreas com IC maior que 2 MPa. Para o trabalho do subsolador em modo transporte utilizou-se os valores de IC do tratamento T4, (Tabela 1) em áreas com IC menor que 2 MPa. Já capacidade de campo efetiva, consumo de combustível efetivo foram usados os valores dos tratamentos T3 e T4 (profundidade fixa). Para a área de compactação maior que 2 MPa e o tratamento T3 e T5 (profundidade variável) para área com IC menor 2 MPa, descritos na Tabela 1 e subitem 5.1.5.

5.2 Desenvolvimento e construção das hastes instrumentadas

A construção das hastes instrumentadas, foi realizada em parceria com empresa Stara desenvolvendo a parte mecânica e eletrônica do equipamento. O projeto foi desenvolvido para ser fixado na parte dianteira do trator, baseado no sistema “Front Linkage” sistema de engate de três pontos usado na dianteira dos tratores na Europa.

O desenho base (Figura 12) do qual foram sendo aprimoradas as ideias de funcionamento, consistia em sistema de leitura de dados (hastes com células de carga), sistema de aquisição (CLP), sistema de posicionamento (GPS) e sistema de controle hidráulico (controlador de fluxo de óleo) do escarificador.

Os programas computacionais utilizados foram primeiramente Autocad para os desenhos iniciais e Solid Works para desenhos mais avançados.

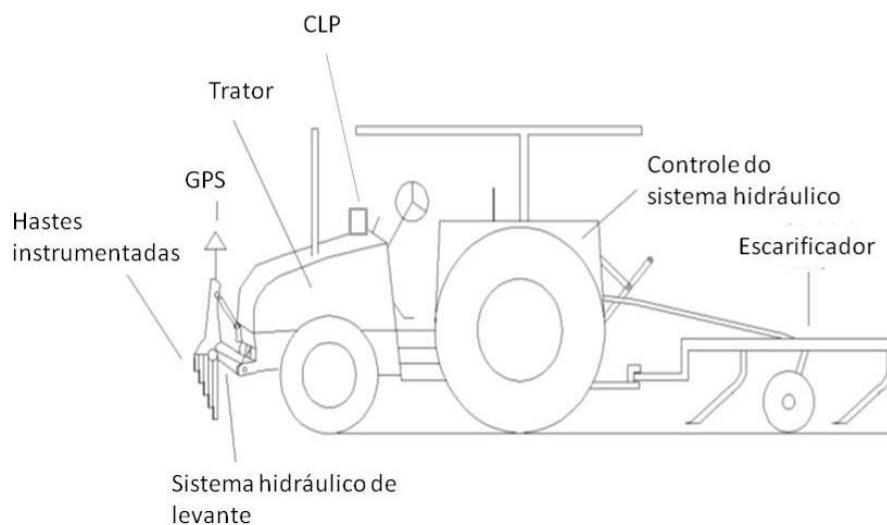


Figura 12. Desenho base do projeto com a localização dos equipamentos

Após a definição do projeto, foi construído o primeiro protótipo, sendo o sistema composto de leitura de resistência do solo por cisalhamento, por hastes instrumentadas, montadas em um chassi com quadro articulado hidraulicamente na parte frontal do trator. Composto também por um sistema de aquisição, posicionamento, armazenamento dos dados, controle de altura e vazão do sistema hidráulico do escarificador.

5.2.1 Ensaio de avaliação do sistema eletrônico em bancada

O sistema eletrônico foi ensaiado antes das avaliações de campo em um simulador (Figura 13) na fabrica da Stara, a qual simulava condições semelhantes às encontradas no campo. Para simulação do funcionamento do sistema foram utilizados: simulador marca Stara, coletor de dados fabricante Stara modelo Topper (Figura 13) e GPS marca NovATEL modelo 701GG com funcionamento em frequência de 5Hz, banda L1/CA com correção eDIF. O sistema simulava leitura das três células de carga, sinais do sensor de posição de altura do escarificador, que eram incrementados aos dados do GPS que eram enviados ao coletor. Durante os ensaios dos equipamentos eletrônicos, foram avaliados para verificar a compatibilidade entre os sistemas, o modo de armazenamento a sequencia gravação. O ensaio durou quatorze horas e trinta e nove minutos interruptos.



Figura 13. a) GPS, b) dispositivo simulador, c) coletor de dados “Topper”.

5.2.2 Calibração das hastes instrumentadas

As calibrações das hastes foram realizadas em uma área de coordenadas geográficas 22°51’ Latitude Sul, 48°26’ Longitude Oeste e altitude 830 m, localizada na Fazenda Experimental Lageado da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Campus de Botucatu – SP.

O solo da área experimental foi classificado, conforme a nomenclatura do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (1999), como Nitossolo Vermelho Distroférrico.

O experimento constituiu-se de 4 tratamentos delineados em blocos ao acaso, com 3 repetições, totalizando 12 parcelas. Cada parcela foi locada em nível e constituía-se de uma área de 100 m² (5 x 20 m) sendo os 20 metros iniciais e finais reservados para estabilização das células de carga.

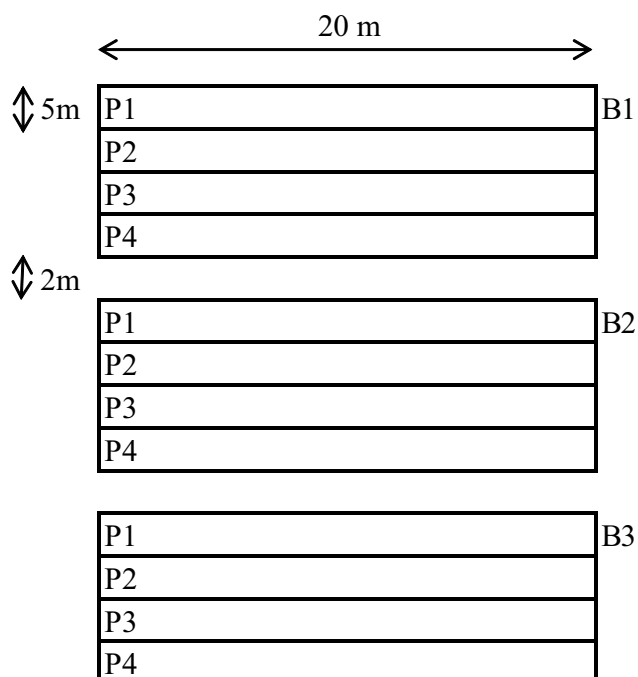


Figura 14. Esquema da disposição dos tratamentos e blocos no campo

5.2.2.1 Descrição dos tratamentos para calibração das hastes

A área na qual foi realizado o experimento foi totalmente subsolada a 0,40 m com auxílio do subsolador descrito no subitem 5.1.1 e um trator New Holland modelo 7040 de 132 Kw de potência com peso total de 88290N (9000kg) sendo a distribuição de massa 60% eixo traseiro e 40% eixo dianteiro, montado sobre pneus diagonais 18.4-26 e 24.5-32 com pressão de inflação de 24 psi.

Após a subsolagem, para induzir a compactação foi utilizado o trator NH 7040 descrito acima (Figura 10). A compactação foi realizada por meio da passagem dos rodados do trator (tratamentos P1 a P3), perfazendo toda a superfície da parcela, de forma que os pneus comprimissem o solo. O número de vezes que o trator trafegou sobre a mesma passagem variou conforme o tratamento. O tratamento P4 foi realizada a compactação através de uma passagem do rolo compactador descrito no subitem 5.1.5.

Tabela 3. Descrição dos tratamentos

Tratamentos	Número de passadas	Velocidade (km.h ⁻¹)
P1	2	6
P2	4	6
P3	6	6
P4	1 (rolo compactador)	6

Após a indução da compactação, foram retiradas amostras para determinação do teor de água no solo, sendo realizadas uma amostra por parcela nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30 m. Em seguida foi mensurada a resistência a penetração com a utilização do penetrômetro (Figura 15) descrito no subitem 5.1.2.2. Em cada parcela foram efetuadas 10 amostragens aleatoriamente no rastro das passadas.

Com os resultados das médias de cada parcela e tratamento, os dados foram inseridos no coletor de dados no qual eram calibradas as 3 hastes em movimento numa distância de 20 m em contato com o solo na profundidade de 0,30 m, antes de iniciar a coleta de dados na parcela.

**Figura 15.** Leituras de IC nas passagens do trator

5.2.3 Ensaio para avaliação dos equipamentos em campo

O ensaio foi realizado na área identificada no subitem 5.2.2, sendo mensurado o tempo de resposta das hastes para comandar o escarificador.

Na avaliação do tempo de resposta do equipamento, as hastes instrumentadas foram enumeradas em: haste 1 de 0,1 m, haste 2 de 0,2 m, haste 3 de 0,3 m.

Antes do ensaio a área foi subsolada a profundidade de 0,40 m, utilizando os mesmos equipamentos do subitem 5.1.1.

5.2.3.1 Descrição dos tratamentos para o tempo de resposta

Foram demarcadas 6 parcelas de (5x70m) paralelas uma a outra. Em cada parcela foi induzida a compactação com a utilização do trator descrito no subitem 5.1.1. foram efetuadas 2, 4 e 6 passadas no mesmo trajeto. No intervalo entre as passadas de 10m foi deixada uma área de estabilização com a utilização, sem tráfego, a qual foi subsolada a 0,40 m. Os tratamentos estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Descrição dos tratamentos

Tratamentos	Número de passadas	Velocidade (km.h ⁻¹)
SB	0	-
2P	2	6
4P	4	6
6P	6	6

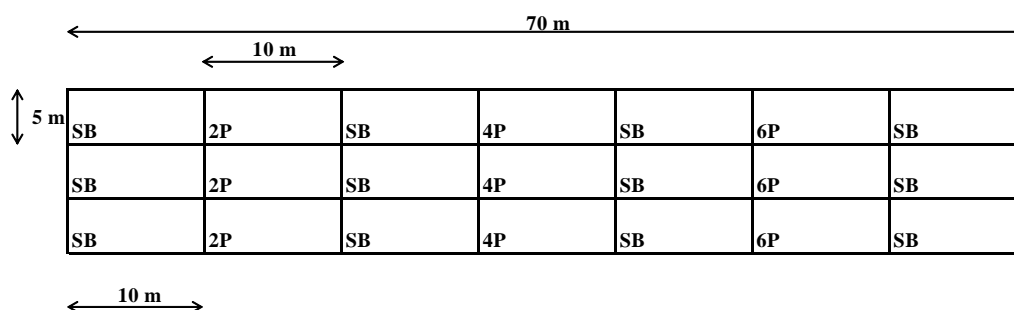


Figura 16. Esquema de distribuição dos tratamentos

Ao trafegar com as hastes instrumentadas previamente calibradas, montadas no trator descrito no subitem 5.1.1 usando a marcha A 1 a 1500 rpm, foi mensurado o tempo de resposta do sistema com o uso de um cronômetro . Medindo tempo de descida e subida do escarificador em movimento. O escarificador utilizado foi modelo Fox marca Stara (Figura 19) com 9 hastes (utilizando 5) com espaçamento entre hastes de 0,30 m composto de 2 rolos niveladores 1,4 m e discos de corte da palhada, com peso total de 2500 kg, equipado com rodas de controle de profundidade, acionadas hidraulicamente através de mangueiras ligadas os terminais de engate rápido do trator.

O sistema de taxa variável de profundidade era composto por um sensor de posição de altura da marca Elobau modelo 424A1712001 (Figura 18a), sendo utilizado para essa finalidade um coletor de dados modelo Topper marca Stara (Figura 13c) que tem as funções de armazenar e comandar o controlador de fluxo de óleo marca Hydac modelo HBF, com a função (Figura 18b) baixar e levantar o escarificador. A interligação entre o e sistema hidráulico foi realizado por placas eletrônicas “sistema eletrônico de ligação” fixadas no chassi do escarificador (Figura 19).

Quando os valores mostrados no display do coletor de dados eram iguais ou maiores que 2 MPa era acionado o cronômetro marca Technos modelo DC453/8P, marcando os tempos de descida da posição de transporte até a profundidade de 0,15 m para tratamento 2P e quando as hastes passavam para o tratamento SB no qual os valores de IC eram menores que 2 MPa, indicados no coletor de dados marcava-se os tempos de subida do escarificador. Para as outras profundidades 0,25 m com tratamento 4P e 0,35 m com tratamento 6P utilizou-se a mesma metodologia inicial para marcação dos tempos de reação. Para calibrar o tempo de retardo, utilizou a media de velocidade sem carga e com o escarificador a 0,35 m de profundidade descontando se o tempo médio de subida e descida do escarificador. Após a obtenção dos valores era inserido o valor do tempo de retardo no coletor de dados.



Figura 17. Escarificador Fox



Figura 18. a) Sensor de posição b) caixa controladora de fluxo de óleo



Figura 19. Distribuição dos sistemas eletrônicos e hidráulicos do escarificador



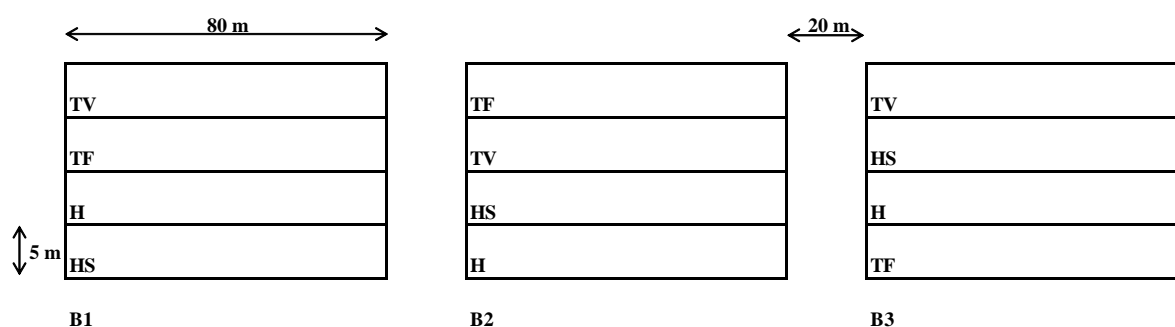
Figura 20. Avaliação em campo do tempo de resposta

5.2.3.2 Avaliação do sistema completo em campo

O experimento foi realizado, constituiu-se de 5 tratamentos delineados em blocos (B1, B2 e B3) ao acaso, com 3 repetições, totalizando 15 parcelas. Cada parcela locada em nível, constituía-se uma área de 400 m² (5 x 80 m). Os tratamentos estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5. Descrição dos tratamentos

Tratamentos	Profundidade da escarificação (m)	Velocidade sem carga (km h ⁻¹)
PV - Profundidade variável	Variável	1,62
PF - Profundidade fixa	0,35 m	1,62
H - Trator + haste instrumentada baixada + escarificador erguido	-	1,62
HS - Trator sem haste instrumentada + escarificador erguido	-	1,62

**Figura 21.** Esquema de distribuição dos tratamentos e blocos

A área foi previamente subsolada a 0,40 m, em seguida foi utilizado um rolo compactador descrito no subitem 5.1.5 para homogeneização da área e indução da compactação. Após a passagem do rolo compactador foram realizadas as mensurações de resistência a penetração utilizando um penetrômetro eletrônico descrito no subitem 5.1.2.2, com 10 pontos por parcela sendo referenciados por um GPS de navegação da marca Garmin modelo GPSmap 62s com frequência de 0,5 Hz.

Os dados foram descarregados no laptop e visualizados através do programa penetroLOG. Em seguida os dados foram interpolados pelo método Krigagem através do programa SStoolbox nas profundidades 0,10; 0,20 e 0,30 m.

Os dados coletados pelas hastes instrumentadas eram armazenados em um coletor de dados no qual era inserido um pen drive na porta USB para o descarregamento dos dados em formatos DBF e PDF. Os arquivos só possuíam coordenadas centrais referentes

ao local, para determinação dos pontos com valores maiores que 2 MPa foi utilizado o programa TrackMaker que através de coordenadas UTM foi feita a transferência das coordenadas centrais.

Os métodos utilizados para determinação do teor de água no solo, e métodos de determinação dos parâmetros de avaliação estão descritos nos subitens 5.1.2.1 e 5.1.8. As hastes instrumentadas foram calibradas em movimento, vinte metros antes do início da parcela, para estabilização das células de carga. Os ensaios respeitaram sempre o mesmo sentido.

5.2.3.3 Tratamento estatístico dos dados

Os resultados obtidos de regressão linear foram analisados pelo programa Excel, outras análises por meio do programa “Minitab”, que foram tabulados e submetidos à análise de variância e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para os parâmetros avaliados serão apresentados na forma de Tabelas, Figuras e Gráficos.

Quanto à sequência de apresentação dos resultados e das discussões foram os valores obtidos: no pré-ensaio, desenvolvimento e construção das hastes instrumentadas, ensaio para avaliação do sistema eletrônico em bancada e ensaio para avaliação dos equipamentos em campo.

6.1 Pré-ensaio

6.1.1 Teor de água no solo

Na Tabela 6 são apresentados os valores de teor de água no solo, amostrados durante o pré-ensaio nos intervalos de 0,10 m até a profundidade de 0,30 m.

Tabela 6. Valores do teor de água no solo (kg kg^{-1})

Profundidade (m)	Tratamentos			Média (kg kg^{-1})
	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	
0,00 – 0,10	19,10	19,10	19,20	19,13
0,10 – 0,20	19,50	19,50	19,50	19,50
0,20 – 0,30	20,20	20,10	20,20	20,16
Média	19,60	19,56	19,63	

Na Tabela 6, verifica-se que nos três blocos do experimento os teores de água no solo mantiveram-se com grau de uniformidade. Esta constatação é importante, uma

vez que os dados de demanda energética são muito dependentes do teor de água do solo presente no momento da operação.

Avaliando o desempenho de subsoladores em solos argilosos, Sasaki e Gonçalves (2005) verificaram que o desempenho operacional apresentou correlação direta com o teor de água presente no solo.

6.1.2 Índice de cone

Para caracterizar o solo utilizado no experimento, quanto a indicativos de compactação, determinou-se a resistência à penetração pelo índice de cone cujos valores são indicados na Tabela 7.

Tabela 7. Índice de cone (IC)(MPa)

Profundidade (m)	Tratamentos					Média (MPa)
	T1	T2	T3	T4	T5	
0,00 – 0,10	2,20	2,70	2,30	0,90	2,70	2,16
0,10 – 0,20	3,00	3,20	2,60	1,60	3,20	2,72
0,20 – 0,30	3,60	3,20	3,50	1,40	3,20	2,98
Média (MPa)	2,93	3,03	2,80	1,30	3,03	

6.1.3 Densidade do solo

Os valores médios, obtidos para a densidade do solo nas profundidades de 0 a 0,10 m; 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,30 m, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Densidade do solo (kg dm^{-3})

Profundidade (m)	Tratamentos					Média (kg dm^{-3})
	T1	T 2	T 3	T4	T5	
0,00 – 0,10	1,31	1,33	1,34	1,28	1,35	1,32
0,10 – 0,20	1,35	1,36	1,35	1,27	1,38	1,34
0,20 – 0,30	1,37	1,38	1,39	1,27	1,40	1,36
Média (kg dm^{-3})	1,34	1,35	1,36	1,27	1,37	

6.1.4 Parâmetros de avaliação

Os resultados da variação da velocidade média de deslocamento e da capacidade de campo efetiva da operação de mobilização do solo são apresentados na Tabela 9, onde observou-se que a capacidade de campo efetiva é função direta da velocidade de deslocamento, e que ambas as variáveis tiveram o mesmo comportamento.

Tabela 9. Patinagem (P) em %, velocidade média (VM) em Km h⁻¹, capacidade de campo efetiva (CCE) em ha h⁻¹, força média na barra de tração (FMBT) em N, potência média na barra de tração (PMBT) em kW, consumo horário de combustível (CHC) em L h⁻¹, consumo operacional de combustível (COC) em L ha⁻¹ em função dos tratamentos avaliados no experimento.

Tratamento	P (%)	VM (Km h ⁻¹)	CCE (ha h ⁻¹)	FMBT (N)	PMBT (kW)	CHC (L h ⁻¹)	COC (L ha ⁻¹)
T1	3,15 c	4,78 a	0,96 a	9226 d	12,25 d	13,02 d	13,59 c
T2	8,90 b	4,42 b	0,88 b	23645 b	29,03 b	17,11 b	19,32 b
T3	23,32 a	3,45 c	0,69 c	42190 a	40,42 a	22,19 a	32,17 a
T4	6,37 b	4,51 b	0,90 b	21778 c	27,29 c	16,15 c	17,87 b
T5	2,36 c	4,94 a	0,99 a	1724 e	2,36 e	10,42 e	10,53 d

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os resultados obtidos, mostraram que o aumento da profundidade influenciou significativamente no aumento da patinagem, força média na barra de tração, potência média na barra de tração, consumo operacional de combustível, diminuição da velocidade média e capacidade de campo efetiva.

Com o aumento da profundidade de operação de 0,15 m para 0,25 m e 0,25 m para 0,35 m houve diminuição da capacidade campo efetiva em 7,3 % (15-25) e 21,5 % (25-35) respectivamente.

Gamero (2008) afirmou que o aumento da profundidade de trabalho implica na redução da velocidade média de deslocamento, capacidade operacional efetiva e conseqüentemente aumento da patinação dos rodados. Os resultados obtidos pelo mesmo autor demonstraram que o aumento da profundidade da operação, de 0,25 m para 0,35 m promovem um aumento de 101,6% no consumo operacional de combustível.

Verificou-se na Tabela 9 que as profundidades de operação influenciaram o consumo operacional de combustível com o aumento da profundidade de operação de 0,15 m para 0,25 m aumentou o consumo em 42,1 % e de 0,25 m para 0,35 m de profundidade, o aumento foi de 66,5 %.

Fulton et al. (1996) medindo densidade do solo e índice de cone do solo em grade de pontos referenciados, concluíram que o consumo de combustível pode ser reduzido a 50%, em local específico do cultivo em comparação com subsolagem no campo inteiro.

6.1.5 Simulação em planilha eletrônica

Realizando as simulações demonstradas nas Tabelas 10 a 12 com os dados referentes ao pré-ensaio constatou-se que a economia de tempo de trabalho com profundidade variável (PV) em relação a profundidade fixa (PF) variou de 1,85% para uma área de 25 ha (PV) e 6,34% para uma área 75 ha (PV).

Para consumo de combustível a redução variou de 6,42% a 25,69% utilizando (PV) em relação a (PF).

A partir dos resultados simulados verificou-se que era viável investir e construir um sistema de hastes instrumentadas com a finalidade de comandar o escarificador em profundidade variável. No qual realizaria as operações de mensuração da camada compactada, mapeamento dos locais compactados e comando do escarificador em atuar somente em camadas compactadas.

Raper (1999) estimou que o custo de energia da subsolagem poderia ser reduzido em 34% com sistema de profundidade variável de cultivo, em comparação com a técnica de cultivo uniforme de profundidade atualmente empregado pelos agricultores

Tabela 10. Simulação da escarificação a profundidade variável área (25 ha) e fixa(75 ha)

Talhão de 100 ha dividido: Área 1 (ha) Área 2 (ha)				
25 75				
Tratamento	Prof.(m)	IC (MPa)	IC (MPa)	
PV	0,15	0,90	2,47	
PF	0,15	0,90	2,47	
PV	0,25	1,60	3,00	
PF	0,25	1,60	3,00	
PV	0,35	1,40	3,37	
PF	0,35	1,40	3,37	
		Área 1	Área 2	
		CCE	CCE	Diferença
Tratamento	(ha h ⁻¹)	(ha h ⁻¹)	Total (h)	(%)
PV	0,99	0,69	133,95	-1,85
PF	0,90	0,69	136,47	
		COC	COC	Diferença
Tratamento	(L ha ⁻¹)	(L ha ⁻¹)	Total (L)	(%)
PV	10,53	32,17	2675,88	-6,42
PF	17,87	32,17	2859,50	

Tabela 11. Simulação da escarificação a profundidade variável (50 ha) e fixa (50 ha)

Talhão de 100 ha dividido: Área 1 (ha) Área 2 (ha)				
50 50				
Tratamento	Prof.(m)	IC (MPa)	IC (MPa)	
PV	0,15	0,90	2,47	
PF	0,15	0,90	2,47	
PV	0,25	1,60	3,00	
PF	0,25	1,60	3,00	
PV	0,35	1,40	3,37	
PF	0,35	1,40	3,37	
		Área 1	Área 2	
		CCE	CCE	Diferença
Tratamento	(ha h ⁻¹)	(ha h ⁻¹)	Total (h)	(%)
PV	0,99	0,69	122,97	-3,95
PF	0,90	0,69	128,02	
		COC	COC	Diferença
Tratamento	(L ha ⁻¹)	(L ha ⁻¹)	Total (L)	(%)
PV	10,53	32,17	2134,76	-14,68
PF	17,87	32,17	2502,00	

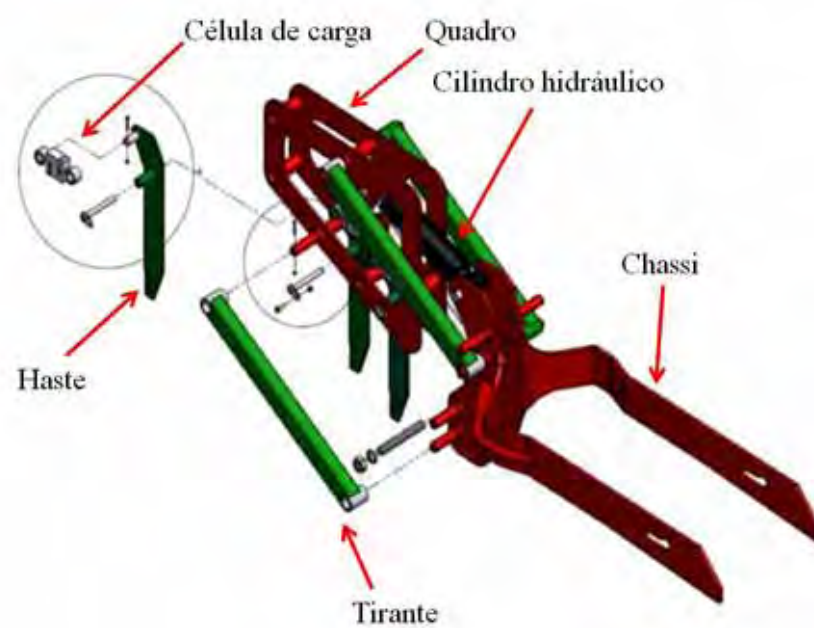


Figura 22. Desenho demonstrando os componentes do sistema automatizado

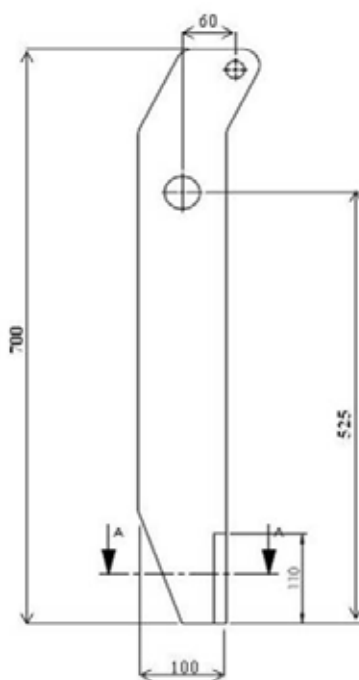


Figura 23. Desenho da haste com formato reto

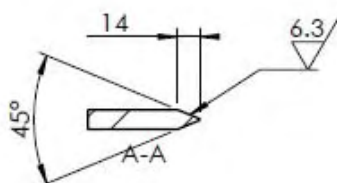


Figura 24. Corte A-A, desenho da borda cortante da haste

O quadro no qual as hastes foram fixadas ao chassi por 4 tirantes de aço SAE 1020 tubulares com 60 mm que tem o controle de altura regulado por um cilindro hidráulico de curso de 400 mm de capacidade carga de 3 toneladas, que é responsável pelo movimento de subida e descida do equipamento (Figura 25), ligado por mangueiras acopladas nos terminais de engate rápido localizados na traseira do trator.

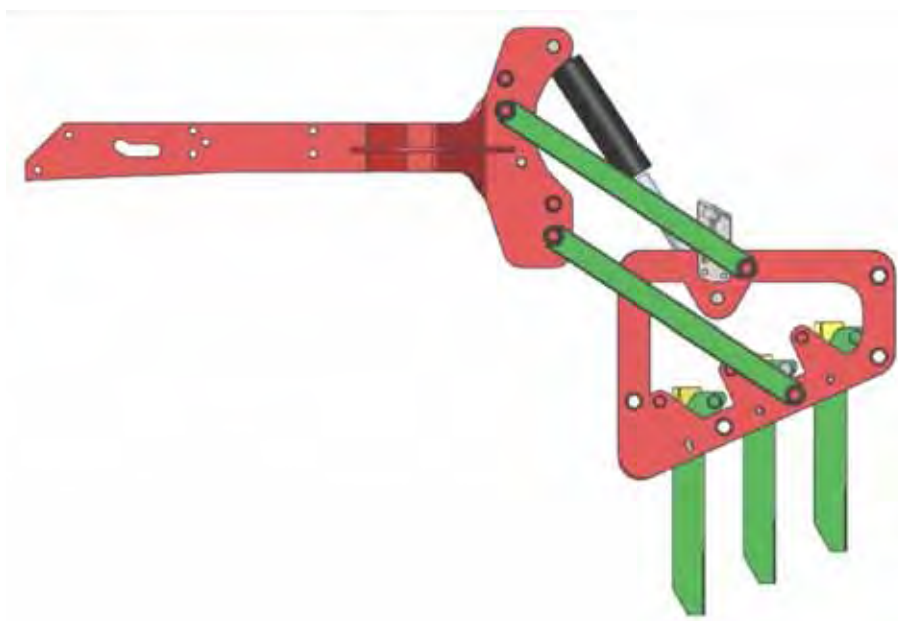


Figura 25. Desenho da posição de trabalho das hastes instrumentadas



Figura 26. Hastes instrumentadas montadas no trator e o escarificador

6.3 Funcionamento

Os dados do GPS, em arquivos de formato NMEA (GGA), são incrementadas aos dados de pressão mensurados pelas células de carga (MPa) e altura (m) pelo sensor de posição descrito no subitem 5.2.3.2 . Sendo utilizado para essa finalidade um coletor de dados (Figura 27) que tem as funções de armazenar e comandar o controlador de fluxo de óleo descrito no subitem 5.2.3.1 que tem como função de baixar e levantar o escarificador.



Figura 27. Coletor de dados Topper

O coletor foi programado para comandar o controlador de fluxo de óleo para erguer o escarificador quando a carga for menor que 2 MPa e descer ou subir dependendo da profundidade, quando a carga exercida na célula de carga ultrapasse 2 MPa. O sistema foi baseado em estudos em que Taylor et al. (1966) considera como valor limitante ao crescimento radicular das plantas de 2 MPa.

Os dados armazenados no coletor de dados contendo informações altitude, profundidade e pressão das hastes no solo. Gerados em arquivos no formato SHP, DBF, SHX e PDF sendo descarregados via USB (Figura 28). No formato PDF apresenta um resumo dos arquivos com latitude e longitude, com uma coordenada central da área, desenho do mapa para locais com mais de 2 MPa. Outros dados gerenciais como: horas ligado, horas aplicando, rendimento da máquina, rendimento de trabalho, área aplicada, área feita, transpasse, profundidade mínima, média, máxima e pressão mínima, média e máxima de cada haste em contato com o solo (Apêndice 1 ao 4)



Figura 28. Transferências dos dados via USB

6.4 Ensaio para avaliação do sistema eletrônico em bancada

Durante o ensaio, os dados foram armazenados em arquivos SHP, DBF, SHX e PDF. O arquivo em DBF era apresentado na forma de planilha, possuindo as

informações de resistência do solo nas camadas de 0,10m; 0,20m; 0,30m, altitude e velocidade. Já no arquivo no formato PDF, era mostrado um mapa para os locais que apresentassem resistência a penetração maior 2 MPa, sendo mostrada uma coordenada central, horas ligado, horas aplicando, rendimento da máquina, rendimento de trabalho, área aplicada, área feita, transpasse, profundidade mínima, média, máxima e pressão mínima, média e máxima de cada haste em contato com o solo.

6.5 Calibração das hastes instrumentadas

Os valores referentes ao teor de água no solo nos diferentes tratamentos estão demonstrados na Tabela 13.

Tabela 13. Teor de água no solo (kg kg^{-1})

Profundidade (m)	Tratamentos				Média (kg kg^{-1})
	P1	P2	P3	P4	
0,00 – 0,10	20,19	19,33	20,60	21,60	20,43
0,10 – 0,20	21,20	21,10	22,10	22,40	21,70
0,20 – 0,30	23,22	22,80	23,40	22,60	23,00
Média	21,53	21,07	22,03	22,20	

Analisando a correlação das hastes no solo, obteve-se uma correlação geral com $R^2=0,79$ (Figura 32) e uma correlação geral média com $R^2=0,90$ (Figura 33). A correlação mais elevada foi na profundidade de 0,10 a 0,20 m com $R^2= 0,89$ e a mais baixa com $R^2=0,79$ na profundidade de 0 a 0,10m (Figuras 30 e 29).

O equipamento demonstrou uma correlação geral aceitável, apesar das diferenças de correlações entre as hastes. Resultados semelhantes foram encontrados por outros autores, no qual avaliaram hastes instrumentas.

Siefken et al. (2005) projetaram e ensaiaram hastes instrumentadas semelhantes, em vários tipos de solos e cobertura vegetal obtiveram uma correlação geral média com $R^2=0,76$ sendo a correlação mais baixa na camada de 0,20 a 0,30 m com $R^2=0,61$ e a mais alta na camada de 0 a 0,10 m com $R^2=0,80$.

Sanches et al. (2007) obtiveram uma correlação com $R^2=0,95$ entre o IC e um sistema de transdutores para leitura do perfil de compactação do solo.

Adamchuk et al. (2006) compararam dois sistema de leitura de resistência do solo em tempo real em relação ao índice de cone obtido com penetrômetro. Obtendo uma correlação de $R^2=0,32$ para o sistema de lamina vertical com leitura por strain gage (extensômetro elétrico de resistência) e para o sistema composto por células de carga obteve um $R^2=0,46$.

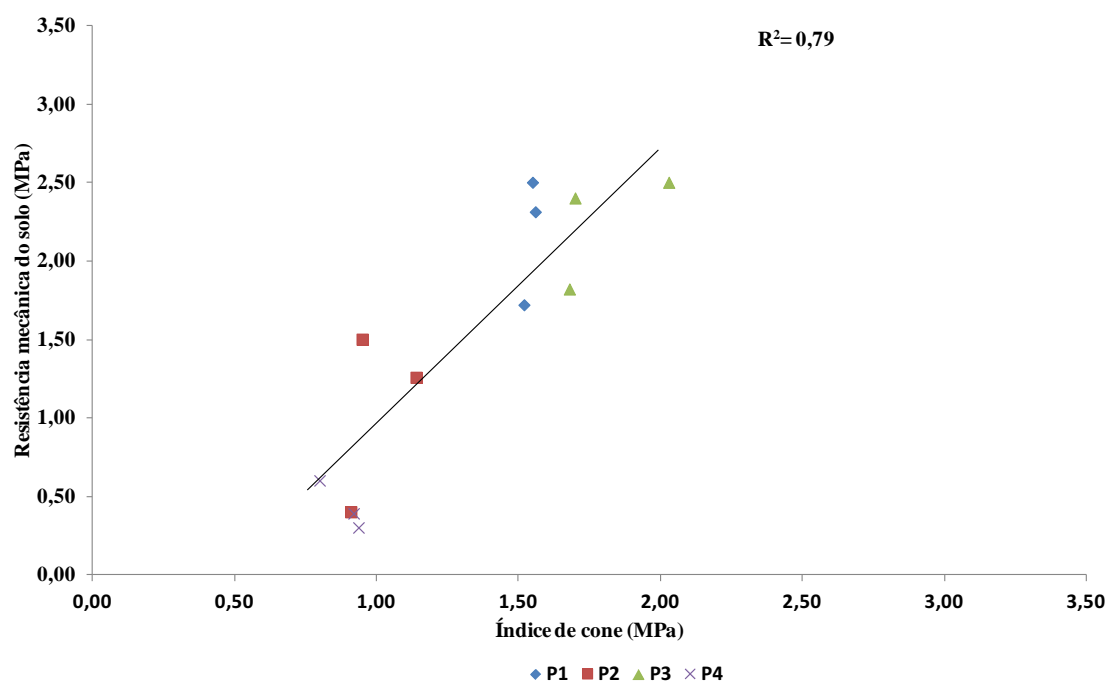


Figura 29. Resistência mecânica do solo e índice de cone para camada 0-0,10m

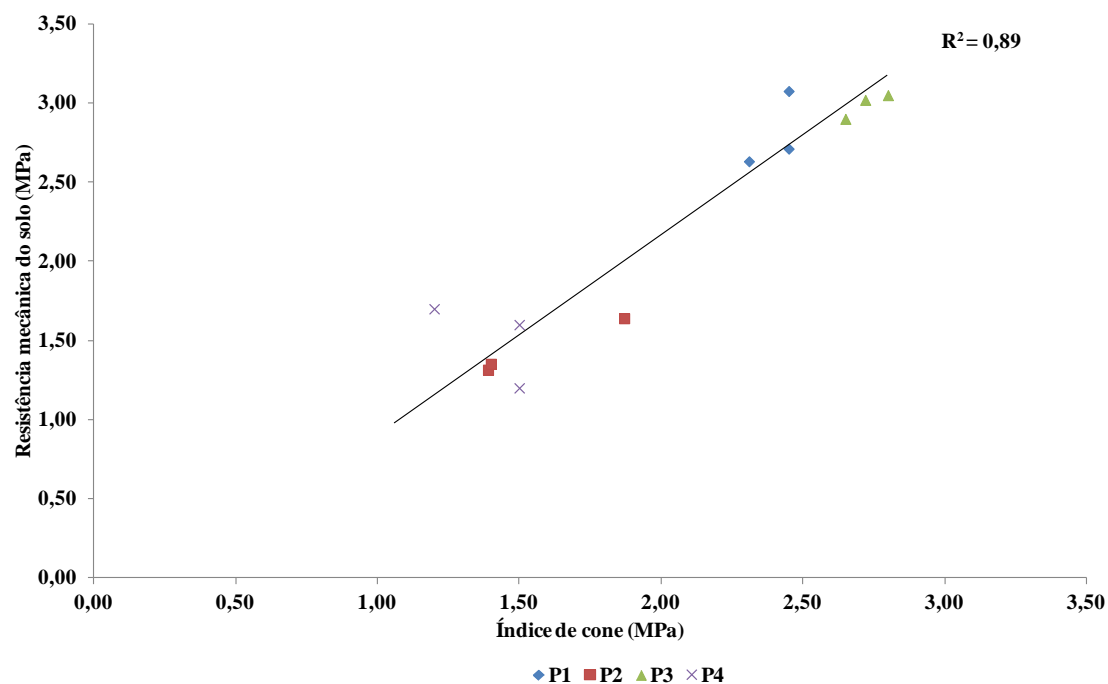


Figura 30. Resistência mecânica do solo e índice de cone para camada 0,10-0,20m

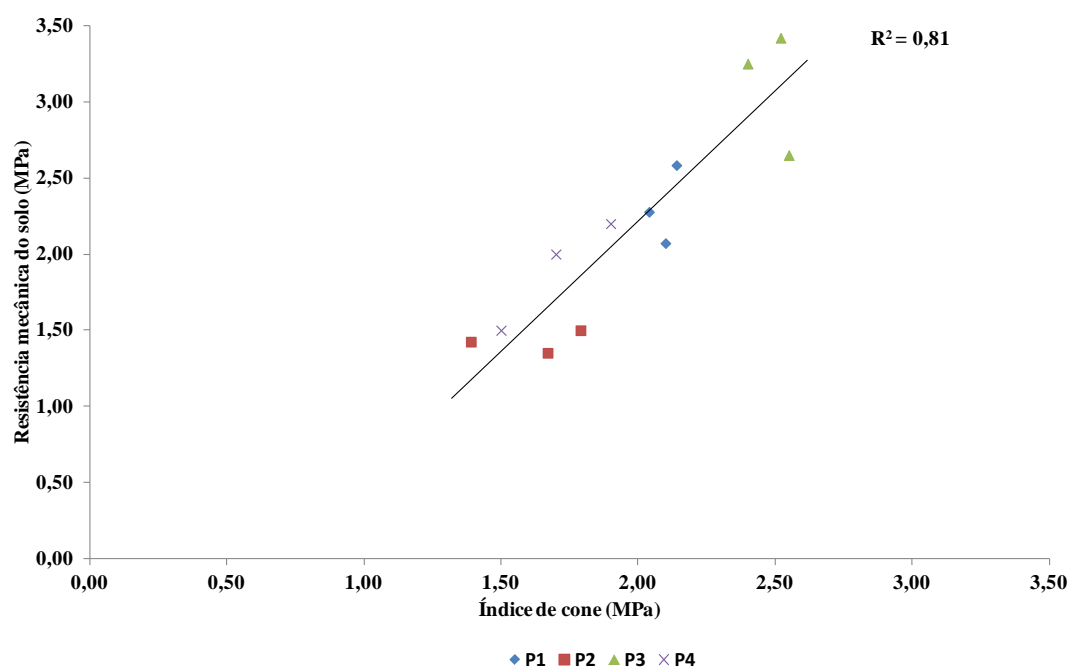


Figura 31. Resistência mecânica do solo e índice de cone para camada 0,20-0,30m

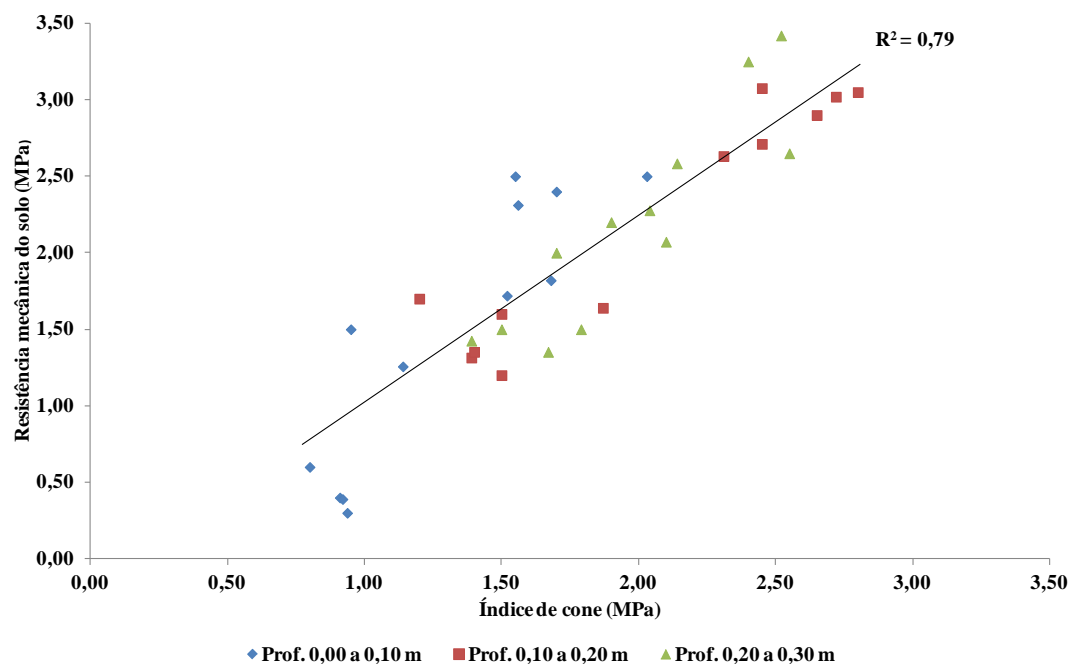


Figura 32. Resistência mecânica do solo e índice de cone para as camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

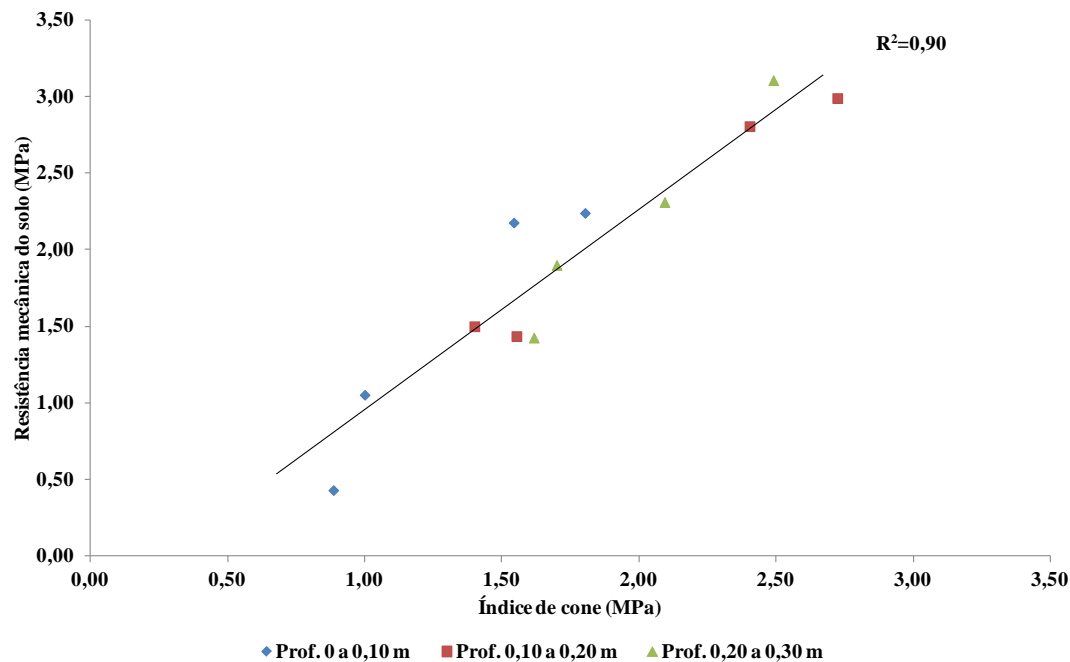


Figura 33. Resistência mecânica do solo média e índice de cone médio para as camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

6.6 Tempo de resposta

Os valores do IC e teor de água no solo, para caracterização da área do experimento estão demonstradas nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14. Índice de cone (MPa)

Tratamentos	IC (MPa)		
	0,10 m	0,20 m	0,30 m
SB (área subsolada)	1,22	1,54	1,74
2P – (2 passadas)	2,24	1,75	1,88
4P – (4 passadas)	2,44	2,32	1,95
6P – (6 passadas)	2,62	2,23	2,45

Tabela 15. Teor de água no solo (kg kg⁻¹)

Profundidade (m)	Tratamentos				Média (kg kg ⁻¹)
	SB	2P	4P	6P	
0,00 – 0,10	19,10	19,10	19,20	19,80	19,30
0,10 – 0,20	19,50	19,50	19,50	20,50	19,75
0,20 – 0,30	20,20	21,10	20,20	21,20	20,67
Média (%)	19,60	19,90	19,63	20,50	

O teor de água no solo teve pouca variação no perfil do solo. O IC dos tratamentos mostraram-se adequados para realização do ensaio para obter o tempo de resposta de acionamento do escarificador.

O tempo para levantar o escarificador da profundidade de 0,25 m até a posição de transporte e descer até 0,25 m o tempo manteve-se constante em 5 segundos (Tabela 17). O maior tempo foi de 8 segundos gasto para subir o escarificador da profundidade de 0,35 m até a posição de transporte (Tabela 16). E o menor tempo gasto foi baixar da posição de transporte até a profundidade de 0,15 m (Tabela 17).

Tabela 16. Tempo de subida do escarificador

Tempo de subida até a posição de transporte (s)		
Profundidade 0,15 m	Profundidade 0,25 m	Profundidade 0,35 m
3	5	8

Tabela 17. Tempo de descida do escarificador

Tempo de descida da posição de transporte (s)		
Profundidade 0,10 m	Profundidade 0,20 m	Profundidade 0,30 m
2	5	7

Tabela 18. Cálculo do tempo de retardo

Velocidade (km h ⁻¹)	Distância (m)	Tempo (s)	Tempo médio para subida do escarificador (s)	Tempo médio para descida do escarificador (s)	Tempo médio de descida e subida (s)	Tempo de retardo (s)
1,60	8,30	18,68	5,33	4,67	5,00	13,68
1,32	8,30	22,64	5,33	4,67	5,00	17,64
1,46	8,30	20,66	5,33	4,67	5,00	15,66

Na Tabela 18 mostrou-se o tempo de retardo de 15,66 segundos que foi inserido no coletor de dados, para calibrar os tempos de descida e subida do escarificador. Antes do início do ensaio comparativo entre o sistema fixo e variável.

6.7 Ensaio para avaliação dos equipamentos em campo

Na Tabela 19, são apresentados os valores médios dos teores de água no solo da área 2, coletados no dia da realização do ensaio.

Tabela 19. Teor de água no solo (kg kg^{-1})

Profundidade (m)	Tratamentos				Média (kg kg^{-1})
	PV	PF	H	HS	
0,00 – 0,10	14,21	17,52	16,35	16,52	16,15
0,10 – 0,20	21,79	23,63	20,63	21,32	21,84
0,20 – 0,30	22,55	25,28	23,65	22,55	23,50
Média (%)	19,60	19,90	19,63	20,50	

Verificou-se que os valores de velocidade média e capacidade de campo efetiva foram 13,63% e 14,28% maiores para o tratamento (PV) em comparação com (PF). E conseqüentemente a patinagem foi reduzida em 59,01% e o consumo de combustível operacional em 26,08 %, sendo valores significativos (Tabela 20). Os dados são próximos aos obtidos por Gorucu et al. (2001) que obtiveram 28,4% de economia de combustível, ensaiando o sistema de subsolagem variável na profundidade de 0,25 m a 0,45 m e comparado com sistema fixo com profundidade de 0,45 m.

Raper et al. (2005) verificaram redução no consumo de combustível da ordem de 43% e 27%, quando a profundidade de subsolagem foi de 0,25 e 0,35 m, respectivamente, comparado à profundidade de 0,45 m.

De acordo com Salvador et al. (2008) o menor patinamento das rodas motrizes proporciona menor compactação do solo, menor desgaste dos pneus e dos mecanismos de transmissão, como também reduz os gastos adicionais de combustíveis.

Tabela 20. Tabela 20. Patinagem (P) em %, velocidade média (VM) em Km h⁻¹, capacidade de campo efetiva (CCE) em ha h⁻¹, força média na barra de tração (FMBT) em N, potência média na barra de tração (PMBT) em kW, consumo

Tratamento	P (%)	VM (km h ⁻¹)	CCE (ha h ⁻¹)	FMBT (N)	PMBT (kW)	CHC (L h ⁻¹)	COC (L ha ⁻¹)
PV	2,66 b	1,50 a	0,32 ab	4137 b	1,75 b	5,18 b	16,04 b
PF	6,49 a	1,32 b	0,28 b	21660 a	8,25 a	6,26 a	21,70 a
H	2,13 b	1,50 a	0,32 ab	3116 b	1,33 b	4,85 bc	14,98 b
HS	1,69 b	1,57 a	0,33 a	2420 b	1,05 b	4,48 c	13,55 b

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Nota-se que houve uma diminuição de 80,90% na FMBT e 78,78% na PMBT comparando o tratamento PV em relação a PF.

Já Gorucu et al. (2001) obtiveram 42,8% de economia de energia entre a subsolagem de profundidade variável comparada a fixa.

Raper et al. (2005) tiveram uma redução na força da barra de tração de 59% na profundidade de 0,25 m e 35% para profundidade 0,35 m em comparação a profundidade de 0,45 m.

Estudando o desempenho energético de subsoladores, Kichler et al. (2007) observaram que ocorreu aumento no consumo de combustível de 20% e incremento na força de 120% quando se aumentou a profundidade de 0,23 m para 0,35 m.

Tabela 21. Diferenças de desempenho do trator utilizando as hastes instrumentadas

Tratamentos	P (%)	VM (km h ⁻¹)	CCE (ha h ⁻¹)	CHC (L h ⁻¹)	COC (L ha ⁻¹)
H	2,13	1,5	0,32	4,85	14,98
HS	1,69	1,57	0,33	4,48	13,55
Diferença (%)	26,04	-4,46	-3,03	8,26	10,55

Os resultados demonstrados na Tabela 21, indicaram incremento no valor de 10,55% no consumo operacional, 8,26% no consumo horário e 26,04% na patinagem

com o uso das hastes instrumentadas em trabalho. E diminuição de 4,46 % na velocidade média e 3,03% na capacidade de campo operacional.

Analisando os resultados da Tabela 20 observou-se que a diferença entre tratamento H e HS não são significativos. Portanto não há diferença estatística entre o sistema com haste instrumentada e sistema sem as hastes com o escarificador em posição de transporte, demonstrando que projeto das hastes instrumentadas obtiveram uma boa performance referente ao desempenho.

6.8 Estatística descritiva

Os valores coletados valores pelo sistema de aquisição de dados estão demonstrados na Tabela 22.

O CV mais elevado foi demonstrado na camada de 0 a 0,10m e o mais baixo na camada de 0,10 a 0,20m (Tabela 22). Os resultados são semelhantes aos encontrados por Adamchuk e Molin (2006) no qual a camada 0 a 0,10 m apresentou maior CV em relação as demais camadas .

Segundo Pimentel (2009), nos experimentos de campo, se o coeficiente de variação for inferior a 10% são considerados de alta precisão, de 10 a 20%, são considerados de média precisão, de 20 a 30% boa precisão e acima de 30% baixa precisão.

As hastes instrumentadas apresentaram um CV de baixa precisão na camada de 0 a 0,10m e boa precisão de 0,10 a 0,30 m sendo resultados semelhantes aos dados coletados pelo penetrômetro.

Tabela 22. Estatística descritiva para os valores de resistência mecânica (MPa) das hastes instrumentadas e valores de índice de cone (MPa) do penetrômetro.

Profundidade (m)	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Desvio Padrão	C.V (%)
Hastes instrumentadas					
0 a 10	0,20	4,00	2,35	1,25	53,34
10 a 20	0,90	2,60	1,86	0,50	26,68
20 a 30	0,80	2,10	1,83	0,46	25,00
Penetrômetro					
0 a 10	0,48	2,40	1,57	0,71	45,37
10 a 20	0,94	2,33	1,56	0,44	28,54
20 a 30	0,82	1,98	1,65	0,44	26,46

6.9 Mapas

O mapa da Figura 34 demonstra o local no qual o sistema em profundidade variável entrou em ação, juntamente com o mapa de IC gerado pelos dados coletados pelo penetrômetro na área de todos os tratamentos.

Os mapas demonstrados nas Figuras 34 a 36 são referentes ao IC nas profundidades de 0 a 0,10 m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,30m. Observa-se que os locais apresentados com valor maior que 2 MPa nas figuras 34 e 35 as hastes instrumentadas em alguns locais conseguiram mapear essas zonas de compactação.

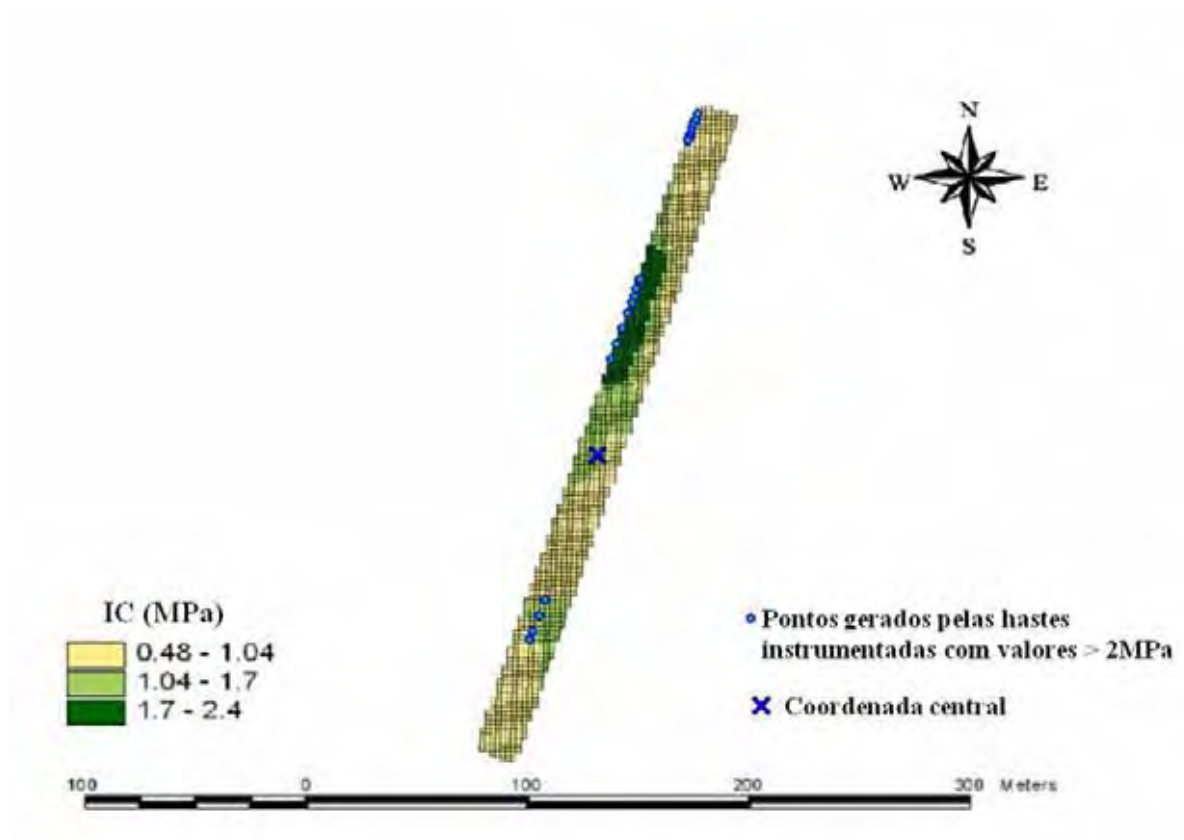


Figura 34. Mapa do índice de cone com dados do penetrômetro na profundidade de 0 a 0,10 m e pontos gerados pelas hastes instrumentadas somente em locais com valores maiores que 2MPa

Os dados dos mapas de IC e os gerados pelas hastes instrumentadas não foram correlacionados, devido o sistema apresentar somente coordenadas centrais da área impossibilitando a análise. Mesmo a área tendo sido compactada por rolo compactador uniformemente, apresentou IC superior a 2 MPa na profundidade de 0,10 m e 0,20 m em alguns locais.

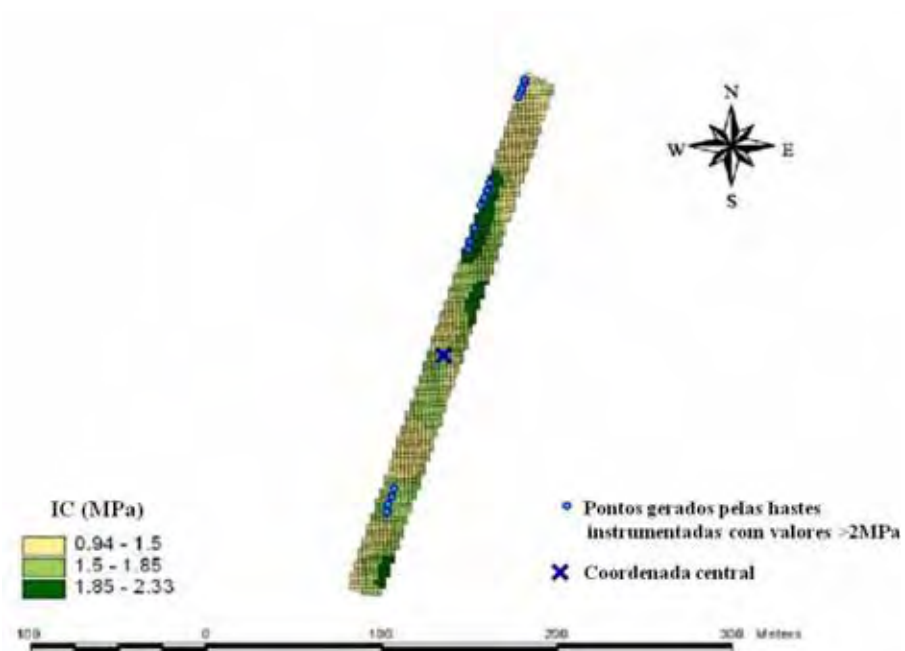


Figura 35. Mapa do índice de cone com dados do penetrômetro na profundidade de 0,10 a 0,20 m e pontos gerado pelas hastes instrumentadas somente em locais com valores maiores que 2MPa

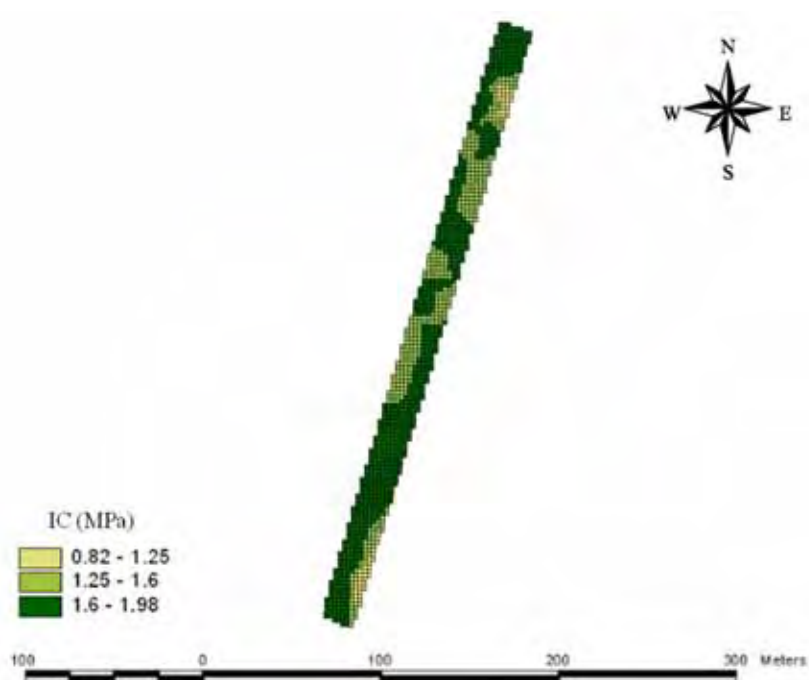


Figura 36. Índice de cone na profundidade de 0,20 a 0,30 m

Na Figura 36 o sistema automatizado não identificou camadas maiores que 2 MPa, portanto o coletor de dados não identificou a coordenada central e não gravou trajeto. Os dados coletados pelo penetrômetro também não identificaram camadas com valores maiores que 2 MPa.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este item tem por finalidade a reflexão sobre este trabalho, quanto ao projeto e ao experimento a fim de contribuir para evolução do sistema futuramente, em alguns aspectos, sendo descritos abaixo:

O projeto precisa melhorar, em aspectos de robustez do equipamento na parte mecânica, permitindo ao sistema fazer curvas e desarme automático das hastes para obstáculos indesejados.

No sistema eletrônico, incrementar a gravação de coordenadas juntamente com os dados coletados para fins gerenciais.

Incrementar o consumo de combustível com coordenadas oriundas do sistema GPS para confecção de mapas de consumo.

Avaliar a questão econômica de viabilidade do equipamento em comparação com o sistema de profundidade fixa.

8 CONCLUSÕES

O sistema instrumentado produziu mapas que representaram a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo, com resolução, densidade de amostragem e capacidade operacional mais elevada quando comparada com levantamentos realizados com o penetrômetro de cone.

As hastes realizaram as leituras de resistência mecânica do solo semelhantes ao penetrômetro, tendo uma correlação aceitável com $R^2 = 0,79$, considerada boa para um primeiro protótipo.

O sistema automatizado montado no trator em condição de trabalho não apresentou diferença significativa de consumo operacional de combustível e capacidade de campo operacional em relação ao trator rebocando o escarificador em posição de transporte.

O escarificador trabalhando em profundidade variável, obteve uma redução de 26% no consumo operacional de combustível e um aumento de 14% na capacidade de campo efetiva comparado com o escarificador de profundidade fixa.

O sistema pode ser adaptado, com pequenas alterações para subsoladores, aumentando as dimensões do equipamento frontal de detecção da compactação do solo em maiores profundidades.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMCHUK, V.I.; HEMMAT, A.; MOUAZEN, A. M. Soil compaction sensor systems-current developments. **ASABE**, St Joseph, 2008. 10 p. (ASAE Paper No. 083994)

ADAMCHUK, V.I.; MOLIN, J. P. Hastes instrumentadas para mensuração da resistência mecânica do solo. **Revista Engenharia Agrícola**. V. 26, n.1, 2006. Disponível em: <<http://www.sbea.org.br>>. Acesso em: 4 jan. 2009.

ADAMCHUK, V.I.; MORGAN, M.T.; SUMALI, H. Application of a strain gauge array to estimate soil impedance on-the-go. Transactions of the **ASAE**, St Joseph, v.44, n.6, p.1377-83, 2001.

ADAMCHUK, V.I.; SUDDUTH, K. A.; INGRAM, T.J.; CHUNG, S.O. Comparison of two alternative methods to map soil mechanical resistance on-the-go. **ASABE**, St Joseph, 2006. 11 p. (ASAE Paper No. 061057)

ALIHAMSYAH, T.; HUMPHRIES, E.G.; BOWERS JR, C.G. A technique for horizontal measurement of soil mechanical impedance. Transactions of the **ASAE**, St Joseph, v.33, n.1, p.73-7, 1990.

ALIHAMSYAH, T.; HUMPHRIES, E. G. On the go mechanical impedance measurement In: Automated Agricultural for the 21st Century. Proceedings of the 1991. **ASAE Symposium ASAE**, St. Joseph, MI, USA, p. 300-306, 1991.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE. Agricultural machinery management. In: **ASAE standards 1999**: Standards Engineering Practices Data. St. Joseph, 1999. p.359-366. (ASAE D497.4 JAN98).

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASABE** EP291.3: Terminology and definitions for soil tillage and soil-tool relationships. St. Joseph, MI, 2009a. 4 p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASABE** EP542: Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. St. Joseph, MI, 2009b. 3 p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASABE** S313.3: Soil Cone Penetrometer. St. Joseph, MI, 2009c. 2 p.

ANDRADE, P.; ROSA, U.; UPADHYAYA, S.; JENKINS, B.; AGUERA, J.; JOSIAH, M. Soil profile force measurements using an instrumented tine. St. Joseph: **ASAE**, 2001. 10 p. (ASAE Paper No. 011060)

ARAÚJO, A.G.; CASÃO JÚNIOR, R.; SIQUEIRA, R. **Mecanização do plantio direto: Problemas e soluções**. Paraná: 2001, p.1-18. (Instituto Agrônômico do Paraná. Informativo de Pesquisa, 137).

BALASTREIRE, L.A.; AMARAL, J.R. Desenvolvimento e construção de um penetrógrafo eletrônico. Campinas: **SBEA**, 1994. 12p. (Paper n.94/4-281).

BIANCHINI, A.; MAIA, J.C.S.; MAGALHÃES, P.S.G.; CAPPELLI, N.; UMEZU, C.K. Penetrógrafo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.332-336, 2001.

BENEDETTI, M. M.; DUARTE, I. N. ; MELO, H. B. J.; BORGES, E. N. Resistência do solo à penetração em um latossolo Vermelho distrófico típico sob diferentes usos. **Enciclopedia biosfera**, centro científico conhecer, Goiania, v.6, n.11,p 1-9, 2010.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth response. **J. Soil Sci.**, 41:341-358, 1990.

BEUTLER, A N.; CENTURION, J F.; SILVA, A P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 146-151, 2007.

BICUDO, S.J. **Subsolador: algumas relações entre profundidade de trabalho, largura e número de hastes**. 1990. 130 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1990.

BOLLER, W. Desenvolvimento da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em diferentes condições de cobertura e de preparo do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.21, n.2, p.167-73, 2001.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; FREDERICK, J.R. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil and Tillage Research**,v.68, p.49-57, 2002.

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**, Viçosa, v. 29, n.5,p.789-796, 2005.

CANARACHE, A.; TRANDAFIRESCU, T.; COLIBAS, I.; HOROBEANU, I.; PATRU, V.; SIMOTA, H. e TRANDAFIRESCU, T. Effect of induced compaction by wheel traffic on soil physical properties and yield of maize in Romania. **Soil & Tillage Research**, v. 4, p. 199-213, 1984.

CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K.; CAMPOS, R. F. Push cone eletrônico de baixo custo para estudo da resistência mecânica ao desenvolvimento radicular das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, V. 5, n. 3, p. 525-529, 2001.

CARDOSO, E.G.; et al. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n.3, p. 493-501, 2006.

CASTRO NETO, P.; NAGOAKA, A. K.; LANÇAS, K. P. Agricultura de precisão: Sistema de processamento de dados para elaboração de mapas de isocompactação. In: Simpósio em Energia na Agricultura, 1999, Botucatu. **Anais....** Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 1999. v.2, p. 449-453.

CHANCELLOR, W.J. **Compaction of soil by agricultural equipment**. Berkeley: University of California, Division of Agricultural Sciences, 1977. 53 p.

CHUKWU, E.; BOWERS, C. G. Instantaneous multiple depth soil mechanical impedance sensing from a moving vehicle. **ASAE Annual meeting**, 1999, Paper n. 993109.

CUNHA, A. R., KLOSOWSKI, E. S.; GALVANI, E.; ESCOBEDO J. F.; MARTINS, D. Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu. **Anais...** Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 1999. p. 487-491.

DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na profundidade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, v.29, n.3,p.383-390, 2005

DERPSCH, R. Histórico, requisitos, importância e outras considerações sobre plantio direto no Brasil. In: DERPSCH, R. **Semana de plantio direto no Brasil**, Fundação Cargill, Piracicaba, 1984, 12p.

DIAS JUNIOR, M. de S. **Notas de aula de física do solo**. Lavras: UFLA, 1996.168p.

DOMIER, K. W.; FRIESEN, O.H.; TOWNSEND, J.S. Traction characteristics of two-wheel drive, four-wheel drive and crawler tractors. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 14, n.3, p. 520-522,1971.

EHLERS, W.; KOPKE, F.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.3, p.261-75, 1983.

EHRHARDT, J.P.; GRISSE, R.D.; KOCHER, M.F.; JASA, P.J.; SCHINSTOCK, D.J.L. Using the Veris electrical conductivity cart as a draft predictor. St. Joseph: **ASAE**, 2001. 15 p. (ASAE Paper No. 011012).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Ciência do solo. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. EMBRAPA, 1999. Rio de Janeiro, CNPS, 1999.412 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. EMBRAPA Instrumentação. **Agricultura de precisão um novo olhar**. EMBRAPA, 2011. São Carlos, 2011. 334p.

FERGUSON, W. Same draught measurements of scarifier shares. **Journal of Agricultural Engineering Research**. London, v2, n.1, p.194-199, 1970.

FIELKE, J.M. Scarifier and combine share testing using comparison dynamometers. Conference on Agricultural Engineering, Bundaberg, 1984. **Agricultural engineering innovation**, 6p.

FULTON, J.P.;WELLS, L.G.; SHEARER, S.S.; BARNHISEL R.I. Spatial variation of soil physical properties: A precursor to precision tillage. Presented at the 1996 ASAE Annual International Meeting, Paper No.96-1012, **ASAE**, 2950 St. Joseph, MI 49085-9659, USA.

GABRIEL FILHO, A.; LANÇAS, K. P.; GUERRA, S. P. S.; PAULA, C. A.; MONTEIRO, L. A. UMEB – Unidade móvel para ensaio na barra de tração. *Engenharia Agrícola*, v. 28, n. 4, p. 782-789, 2008.

GADANHA JÚNIOR, C. D.; MOLIN, J. P.; COELHO, J. L. D.; YAHN, C. H.; TOMIMORI, S.M. A. W. **Máquinas e implementos agrícolas do Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1991. 468p.

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

GAMERO, C. A.; LANÇAS, K. P. Ensaio e certificação das máquinas de mobilização periódica do solo. In: MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas: ensaio e certificação**. Piracicaba: FEALQ,p.463-514, 1996.

GILL, W.R.; VANDENBERG, G.E.V. **Soil dynamics in tillage and traction**. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1968. 511 p.

GIRARDELLO, V.C. **Qualidade física de um latossolo sob plantio direto submetido à escarificação de sítio específico e o rendimento da soja**. 2010. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

GLANCEY, J.L.; UPADHYAYA, S.K.; CHANCELLOR, W.J.; RUMSEY, J.W. An instrumented chisel for the study of soil tillage dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.14, n.1, p.1-24, 1989.

GLANCEY, J.L.; UPADHYAYA, S.K.; CHANCELLOR, W.J.; RUMSEY, J.W. Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.37, n.1, p.47-65, 1996.

GODWIN, R.J.; SPOOR, G.; SOOMRO, M.S. The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 30, p. 47-56. 1984.

GODWIN R.J, SPOOR G **Soil failure with narrow tines**. J Agric Eng Res 22: 1977, p 213-228.

GORUCU, S.; KHALILIAN, A.; HAN, Y.J.; DODD, R.B.; WOLAK, F.J.; KESKIN, M. Variable depth tillage based on geo-referenced soil compaction data in coastal plain region of South Carolina. St. Joseph: **ASAE**, 2001. 11 p. (ASAE Paper No. 01-1016)

GUERRA, S. P. S. **Desenvolvimento de um sistema informatizado de menor custo para aquisição e armazenamento de dados de sensores analógicos e receptor GPS. 2006**. 118p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

HAKANSSON, I.; REEDER, R.C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 29,p.277-304, 1994.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 239-282, 1988.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p.23-36, 1995.

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

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KUMMELBEIN, J.; PETH, S.; HORN, R. Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. **Soil and Tillage Research**, v.99, n.2, p.139-148, 2008.

LANÇAS, K. P. **Desempenho operacional de pneus radiais em função da pressão de inflação, da lastragem e do deslizamento das rodas de tratores agrícolas**. 1996a. 170 f. Tese (Livre Docência em Mecânica Aplicada) – Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu.

LANÇAS, K. P. **A compactação do solo Agrícola. Monografia**, Botucatu-SP, 1996b, 22 p.

LANÇAS, K.P.; SANTOS, C.A. **Penetrômetro hidráulico-eletrônico equipado com DGPS para avaliação da compactação do solo**. In: BALBUENA, R.H. et al. Ingeniería rural y mecanización agraria en ámbito Latinoamericano. La Plata: UNLP. p. 570-576. 1998.

LANÇAS, K. P. **Subsolador: desempenho em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e número de hastes**. 1988. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1988.

LANÇAS, K. P. **Subsolador: desempenho em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e velocidade de deslocamento**. Botucatu, 1987. 112p. Dissertação

(Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1987.

LANÇAS, K. P. Subsolação ou escarificação. **Cultivar Máquinas**. Pelotas. v.1, n.14, p.34-37, 2002.

LANÇAS, K.P.; UPADHYAYA, S.K. Pneus radiais para tratores: guia para seleção correta da pressão de inflação. **Energia na Agricultura Boletim Técnico**, n.1, p.1 – 33, 1997.

LINS, S. M.L. **Modelagem matemática na estimativa da densidade de um Latossolo Vermelho Escuro, textura argilosa, pelo índice de cone**. Campinas: UNICAMP, 1999, 161p. Tese Doutorado.

LINSLEY, C. M., BAUER, F. C. **Test your soil for acidity**. University of Illinois, College of Agriculture and Agricultural Experiment Station. Circular 346. 16p. 1929.

MACHADO, A.L.T.; REIS, A.V.; MORAES, M.L.B.; ALONÇO, A. dos S. **Máquinas para preparo do solo, semeadura, adubação e tratamentos culturais**. 2 ed. Pelotas, RS: Ed. Univ. UFPEL, 2005a. 253p.

MACHADO, T.M.; SHIRATSUCHI, L.S.; CAROLINO DE SÁ, M.A.; CORAZZA, E.J. Correlação entre índice de cone e produtividade de milho utilizando ferramentas da agricultura de precisão. In: **3º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão, 2005**, Sete Lagoas. **Anais...** Sete Lagoas, 2005b. p.1-4.

MANOR, G.; CLARK, R.L. Development of an instrumented subsoiler to map soil hard-pans and real-time control of subsoiler depth. St. Joseph: **ASAE**, 2001. 17 p. (ASAE Paper No. 011022)

MCKEYS, E. Agricultural engineering soil mechanics. **Elsevier**, Amsterdam, 1989. 291 p

MEROTTO J. R. A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 23, p. 197-202, 1999.

MIALHE, L. G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1974. 301p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUARIA E ABASTECIMENTO. **MAPA**. Agricultura de precisão. Brasília: MAPA/ACS.2009. 32p. (Bol. Tec.)

MOLIN, J. P. O que é agricultura de precisão? In: MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUARIA E ABASTECIMENTO. **Agricultura de precisão**. Brasília: MAPA/ACS.2009. 32p. (Bol. Tec.)

MORGAN, M.; ESS, D. The precision-farming guide for agriculturists. Moline: **John Deere Publishing**, 1997. 117 p

MOSADDEGHI, M. R.; KOOLEN, A. J.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M. A.; LERINK, P. Comparisons of different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structure soils. **Journal of Terramechanics**, v.44, n.1, p.53-63, 2007.

MOUAZEN, A.M.; NEMÉNYI, M. Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil. **Soil Tillage Res.**, v.14, p.1-15,1999.

NESMITH, D. S.; RADCLIFFE, D. E.; HAFGROVE, W. L.; CLARK, R. L. e TOLLNER, E. W. Soil compaction in double wheat and soybean on Ultissol. **Soil Science Society American Journal**, v. 51, p. 183-186, 1987.

OSBORNE, L.E. **A field comparison of the performance of two-and four-wheel drive and track laying tractors**. Journal of Agricultural Engineering Research, karaj, v. 16, n.46, p.46-61, 1971.

OWEN, G.T.; DRUMMOND, H.; COBB, L.; GODWIN, R.J. An instrumented system for deep tillage research. Transactions of the **ASAE**, St. Joseph, v.30, n.6, p.1578-82, 1987.

PERUMPRAL, J.V. Cone penetrometer application - A review. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.30, n.4, p.939-944, 1987.

PIERCE, F. J.; FORTIN, M. C.; STATON, M. J. Immediate and residual effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil physical properties and corn performance. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 24, n. 2, 1992, p. 149 - 165.

PIMENTEL, G. F. **Curso de Estatística Experimental**. 15.ed. Piracicaba: Degaspari, 2009. 451p.

PORTELLA, J.A. **Um estudo preliminar de forças atuantes de elementos rompedores de semeadoras comerciais**. 1983. 69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Mecanização Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1983.

RALISCH, R. Avaliação de um solo argiloso sob plantio direto de uma escarificação na evolução da resistência do solo a penetração In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30, Foz do Iguaçu, 2001. **Anais...** Foz do Iguaçu: CONBEA, 2001. CD-ROM

RAPER, R.L.; REEVES, D.W.; SHAW, J.N.; VAN SANTEN, E.; MASK, P.L. Site-specific subsoiling benefits for cotton production. St. Joseph: **ASABE**, 2005. ASAE Paper 051025.

RAPER, R.L. Site-specific tillage for site-specific compaction: Is there a need?. Proceedings of the **International Conference of Dryland Conservation/Zone Tillage**, Beijing, China, 1999.

RAPER, R.L.; WASHINGTON, B.H.; JARRELL, J.D. A tractor-mounted multiple-probe soil cone penetrometer. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.15, n.4, p.287-90, 1999.

REICHERT, J.M. et al. **Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação , Efeitos, Limites críticos e Mitigação** In: TÓPICOS EM CIÊNCIA DO SOLO. Volume V, p. 50-106. 2007.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils.**Soil and Tillage Research**, v.102, n.2, p.242-254, 2009.

REINERT, D.J.; COLLARES, G.L.; REICHERT, J.M. Penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo: desenvolvimento e teste de funcionalidade. **Revista Engenharia Agrícola** v. 27, n.1,p.304-316. 2007.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba. 2004. V.1. 302 p.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Plantio de cana-de-açúcar: Estado da arte**. 2. ed. Piracicaba, 2007. v. 1. 198p .

ROSA, V.T. **Tempo de implantação do sistema plantio direto e propriedades físico-mecânicas de um Latossolo**. 2009. 101p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

ROHM, S. A. **Considerações sobre penetrômetros dinâmicos leves aplicados na construção e avaliação de pavimentos de baixo custo**. 1984. 109 p. Dissertação de mestrado EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos.

ROONEY, D.J.; DUDKA, M.; CHEYNE, M.; SAMUELSON, J.R. The soil information system. St. Joseph: **ASAE**, 2002. 11 p. (ASAE Paper No. 021092)

SALVADOR, N; BENEZ, S.H; MION, R. L. Consumo de combustível na operação de subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo.

Revista Engenharia Agrícola, v.28, n.2, p. 256-262. 2008.

SASAKI, C. M.; GONÇALVES, J. L. M. Desempenho operacional de um subsolador em função da estrutura, do teor de argila e de água em três latossolos. *Scientia Forestalis*.

Piracicaba: IPEF, 2005. n 69, p.115-124.

SECCO, D.; REINERT, D.J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-escuro sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n.5, p. 52- 61, 1997.

STANFORD, J.V. The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed.

Journal of Agricultural Engineering Research, v.24, p.41-55, 1981.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 229-235, 1991.

SÁNCHEZ, P. A, UPADHYAYA, S. K, JENKINS, B. M. Development, construction, and field evaluation of a soil compaction profile sensor. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 50, n.3, p. 719-725, 2007.

SANTOS, M.S. **Parâmetros mecânicos de tração em sistemas de cultivo de melancia**. 2010. 97p. Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

SENE, M; VEPRASKAS, M. J; NADERMAN, G. C.; DENTON, H. P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 422-427, 1985.

SEIXAS, F.; McDONALD, T.P.; STOKES, B.J.; RAPER, R.L. Effect of slash on forworder soil compaction. In: **COUNCIL ON FOREST ENGINEERING ANNUAL MEETING**, 18., Cashiers, p.77-86. 1995.

SIEFKEN, R.J.; ADAMCHUK, V.I.; EISENHAUER, D.E.; BASHFORD, L.L. Mapping soil mechanical resistance with a multiple blade system. **ASABE**, St. Joseph, v.21, n.1, p.15-23, 2005.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1775- 1781, 1994.

SILVA, M.L.L. Melhoramento eletrônico e hidráulico de um penetrógrafo para aplicação em laboratório e campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Lavras: UFLA/SBEA, 1998. V.4, p.409-411, 445p.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 192 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Susceptibilidade a compactação de um latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.4, p. 239-249, 2000

SILVEIRA, G.M. **O preparo do solo: implementos corretos**. Rio de Janeiro: Globo,1988. 243p.

SIRJACOBS, D.; HANQUET, B.; LEBEAU, B.; DESTAIN, M.F. On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.64, p.231-42, 2002.

SPOOR, G.; GODWIN, R.J. An experimental investigation in the dup haseming of by rigid times. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 23, p. 243 - 58.1978.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 4, n.3, p. 775 – 760, mai/jun. 2004.

TAYLOR, J.C.; BELTRAME, L.F.S. Por que, quando e como utilizar a subsolagem. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.33, n.320, p.34-44, maio/junho 1980.

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

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58 p.

TREIN, C. R.; LEVIEN, R.; SOUZA, L. F. C. Tráfego controlado. **Revista Cultivar Máquinas**, n.41, p.22-25, 2005.

VASCONCELOS, A.C.M de. **Dinâmica do desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar e características físico-hídricas e químicas dos ambientes de produção**. Americana: Adonis, 2004. 31p. (Projeto Rhizocana: relatório de pesquisa)

VAZ, C.M.P.; BASSOI, L.H.; HOPMANS, J.W. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. **Soil & Tillage Research**, v. 60, p. 35-42, 2001.

UPADAHYAYA S. K.; ROSA, U.A.; EHSANI, M.; KOLLER, M.; JOSIAH, M.; SHIKANAI, T. Precision Farming in a Tomato Production System. Paper No. 991147. 1999 **ASAE/CSAE** Annual International Meeting.

UPADHYAYA, S. K.; D. WULFSOHN. Traction prediction using soil parameters obtained with an instrumented analog device. **Journal of Terramechanics** 30(2). 1993.p 85-100.

UPADHYAYA, S. K.; SANCHEZ, P.A.; SAKAI, K.; CHANCELLOR, W.J.; GODWIN, R.J. Tillage. In: UPADHYAYA, S. K.; CHANCELLOR, W.J.; PERUMPRAL, J.V.; WULFSOHN, D.; WAY, T.R. In advances in soil dynamics. St. Joseph. **ASABE**. 2009. p. 273-359.

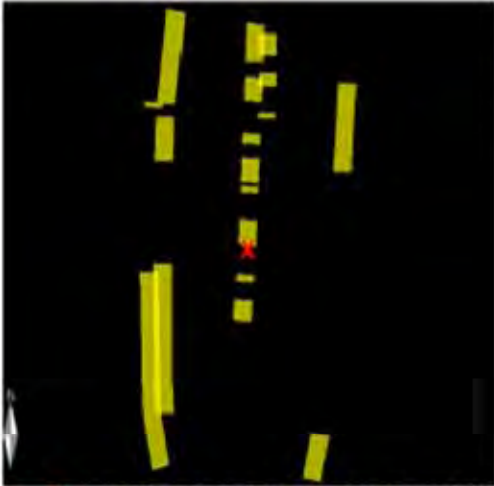
VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 31:1271-1280, 2007.

YSHIMINE, P. **Avaliação de algumas forças que atuam em um subsolador utilizado no preparo de solo agrícola**. Botucatu, 1993. 94 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1993.

WILLIFORD, J.R.; WOOTEN, O.B.; FULGHAN, F.E. Tractor mounted field penetrometer. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.15, n.2, p.226-227, 1972.

APÊNDICE

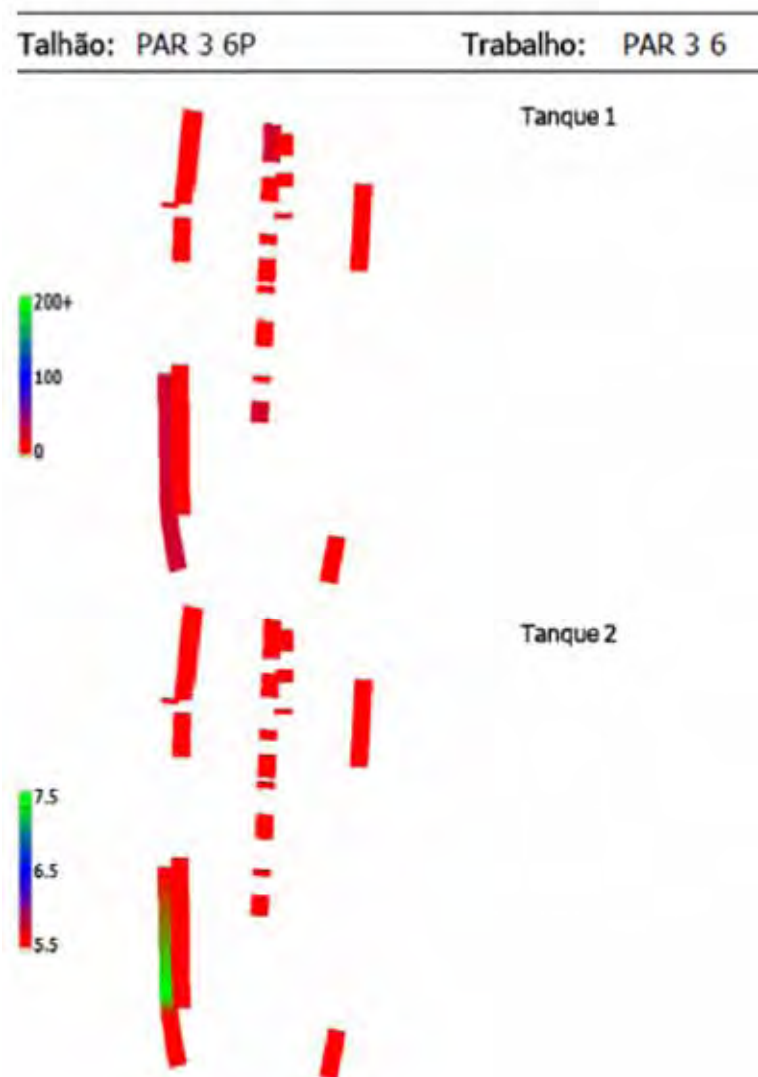
Apêndice 1. Resumo dos dados gerados pelo Topper

Talhão: PAR 3 6P		Trabalho: PAR 3 6	
		Atuador: Escarificador	
		Versão: 0.1.64.2	
X 22° 51' 19.5988" S 48° 26' 10.7855" O			
Horas Ligado	01:09:37		
Horas Aplicando	00:07:34 = 10.87%		
Rend. Máquina	1.33 ha/hr		
Rend. Trabalho	0.15 ha/hr		
Area Aplic.	0.17 ha		
Area Feita	0.17 ha		
Transpasse	2.66 %		
Tx Mínima	10.00 cm		
Tx Média	14.77 cm		
Tx Máxima	29.70 cm		
Tx Mínima	0.00 MPa		
Tx Média	7.50 MPa		
Tx Máxima	7.50 MPa		
Tx Mínima	0.00 MPa		
Tx Média	25.70 MPa		
Tx Máxima	25.70 MPa		
Tx Mínima	0.30 MPa		
Tx Média	2.70 MPa		
Tx Máxima	2.70 MPa		

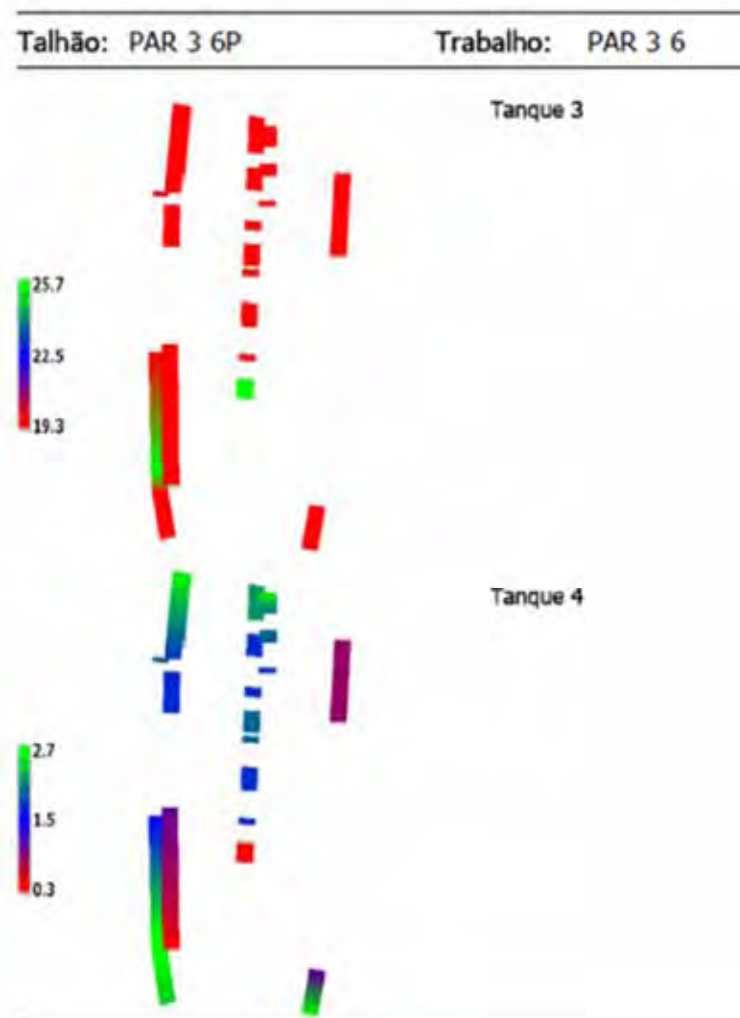
27/11/2023 14:53:27
Página 5 de 5



Apêndice 2. Profundidade de trabalho (tanque 1) e resistência a penetração (tanque 2 de 0,0 m a 0,10 m)



Apêndice 3. Resistência a penetração (tanque 3 de 0,10 a 0,20 m) e resistência a penetração (tanque 4 de 0,20 m a 0,30 m)



Apêndice 4. Altitude

Talhão: PAR 3 6P**Trabalho: PAR 3 6**

Altitude