

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

**RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO AO TRÁFEGO DE PNEUS
RADIAIS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA DO
TRATOR**

Aline Spaggiari Alcântara

Engenheira Agrônoma

2017

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO AO TRÁFEGO DE PNEUS
RADIAIS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA DO
TRATOR**

Aline Spaggiari Alcântara

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani
Co-orientador: Prof. Dr. Afonso Lopes**

Dissertação apresentada à
Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias – UNESP, Campus de
Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do título
de Mestre em Agronomia (Ciência do
Solo).

2017

Alcântara, Aline Spaggiari
A347r Resistência mecânica do solo ao tráfego de pneus radiais em
função da relação peso/potência do trator/ Aline Spaggiari Alcântara. –
– Jaboticabal, 2014
v, 51 p.: il.; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017
Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani
Coorientador: Afonso Lopes
Banca examinadora: Carlos Alessandro Chioderoli, Marcelo
Boamorte Raveli
Bibliografia

1. Adequação de tratores. 2. Compactação do solo. 3. Lastro. 4.
Equilíbrio Operacional. 5. Penetrômetro. I. Título. II. Jaboticabal-
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.372:631.431.7

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO AO TRÁFEGO DE PNEUS RADIAIS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA DO TRATOR

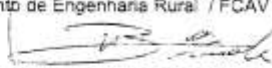
AUTORA: ALINE SPAGGIARI ALCÂNTARA

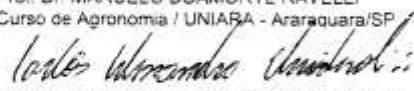
ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI

COORIENTADOR: AFONSO LOPES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. MARCELO BOAMORTE RAVELLI
Curso de Agronomia / UNIARA - Araraquara/SP


Prof. Dr. CARLOS ALESSANDRO CHIODEROLI
Departamento de Engenharia Agrícola / Universidade Federal do Ceará / Fortaleza/CE

Jaboticabal, 25 de julho de 2017

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ALINE SPAGGIARI ALCÂNTARA - Nascida no município de São Joaquim da Barra, Estado de São Paulo, aos 12 dias do mês de janeiro do ano de 1991 e registrado no cartório de Orlândia-SP como filha de Lidomério Ferreira de Alcântara e Ângela Maria Spaggiari de Alcântara. Reside desde seu nascimento na cidade de Orlândia-SP. Coursou o Ensino Fundamental em Escolas Municipais e Estaduais e Ensino Médio em Escola Cooperativa e Particular do município de Orlândia, concluindo estes em dezembro de 2008. Em fevereiro de 2010 iniciou o curso de Engenharia Agrônoma pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal-SP, concluindo-o em Dezembro de 2014, recebendo o grau de Engenheiro Agrônomo em 13 de março de 2015. Durante a graduação participou de trabalhos, eventos culturais, do Grupo Integração Empresa-Universidade (GIEU) de organização de palestras e eventos científicos, fez estágio no setor de Nematologia, e no Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola, situados no Departamento de Fitopatologia e na Engenharia Rural, respectivamente, da FCAV/UNESP. Para conclusão do curso fez estágio curricular na Empresa Gravena/SGS, na cidade de Jaboticabal-SP. Em agosto de 2015 iniciou o curso de Mestrado em Agronomia (Programa Ciência do Solo) na FCAV/UNESP.

“Coragem não é a ausência do medo,
mas a decisão que algo é mais importante que o medo.

O corajoso pode não viver para sempre,
mas o cauteloso nunca vive plenamente.”

Meg Cabot

Dedico e ofereço à Deus,
à minha família, orientador, amigos,
pelo apoio e força imensurável.

AGRADECIMENTOS

À Deus, a Quem confio todos os meus passos, minha eterna fonte de forças.

À minha mãe Angela Maria Spaggiari Alcântara, ao meu pai Lidomério Ferreira de Alcântara, à minha irmã Mariana Spaggiari Alcântara Ravagnani e ao meu cunhado Christopher de Abreu Ravagnani pelo carinho, suporte e incentivo incondicionais.

Ao Professor Doutor Carlos Eduardo Angeli Furlani, do Departamento de Engenharia Rural da FCAV-UNESP, pela oportunidade, disponibilidade e orientação desde o primeiro momento na graduação, pelos conhecimentos transmitidos, pelos conselhos, apoio e amizade.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP), campus de Jaboticabal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade concedida do Mestrado.

Aos meus amigos que ajudaram no experimento, Lígia, Elizabeth, Adão, Tassio, Mailson, Matheus e Bruno, sem vocês não teria tido experimento. Só nós sabemos como foram 22 horas corridas em campo. Em especial, à amiga Lígia Negri Corrêa, que desde a graduação é meu anjo da guarda, agradeço seu espírito altruísta, conselhos e apoio em tantas etapas da minha vida.

À família LAMMA – Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola, Elizabeth, Lucas, Franciele, Antônio Tassio, Adão Felipe, Tiago, Patrícia, André, Rafael Noronha, Renata, Lígia, Mailson, Matheus Borba, Leonardo, Rafael de Graaf, Nivanda, Edcarla por todo o suporte, apoio, amizade, consideração e ajuda sempre de forma incondicional. Tenho por vocês grande apreço e admiração, foram essenciais para meu aprimoramento intelecto-pessoal. E também, à todos os funcionários do Departamento de Engenharia Rural.

Aos Professores Doutores Rouverson Pereira da Silva, Cristiano Zerbato, Afonso Lopes, José Carlos Barbosa e Walter Maldonado pelas sugestões, contribuição na Dissertação, além da ajuda e orientações nos procedimentos técnicos e científicos do trabalho e durante toda minha jornada até o Mestrado.

À todos aqueles que, embora não nomeados, direta ou indiretamente me ajudaram de alguma maneira.

O meu sincero MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Pneus e a área de contato	2
2.2. Desempenho e equilíbrio operacional de máquinas	5
2.3. Compactação pelo tráfego de máquinas em áreas de cultivo de cana-de-açúcar	9
3. MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1. Área experimental	12
3.2. Trator	14
3.3. Avançômetro	14
3.4. Equilíbrio Operacional dos tratores	15
3.5. Teor de água no solo	17
3.6. Avaliações	17
3.7. Delineamento Experimental	20
3.8. Análise estatística	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5. CONCLUSÕES	32
6. REFERÊNCIAS	33

RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO AO TRÁFEGO DE PNEUS RADIAIS EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA DO TRATOR

RESUMO - Os fatores que mais influenciam no rendimento de tração são as condições do solo, as dimensões dos pneus, sua relação peso/potência e o tipo de construção do pneu (radial/diagonal). O uso de pneus específicos para determinado tipo de superfície de rolamento permite aumentar seu desempenho operacional. Logo, o detalhamento dos pneus, uso da carga necessária sobre o rodado, associados aos estudos da compactação do solo, pode indicar melhores condições de trabalho e consequentemente redução do consumo de combustível. Assim, objetivou-se avaliar a resistência mecânica à penetração do solo, recalque dos pneus e o consumo de combustível horário após o tráfego de dois tipos de pneus radiais traseiros (710/70R38 e 650/85R38) e dianteiros (600/70R28 e 600/65R28) combinados com quatro relações peso/potência do trator em área preparada para a cultura da cana-de-açúcar. O delineamento estatístico foi fatorial com parcelas subdivididas em blocos casualizado com quatro repetições, foi feita análise estatística pelo teste F e quando significativo foi realizado o teste Tukey a 5% probabilidade, para as interações entre tratamentos ajuste de regressão de maior expoente que apresentasse significância e mapas de isolinhas para melhor explicar o comportamento da variável. Os pneus e as relações peso/potência não interferiram na resistência mecânica do solo à penetração no presente trabalho. A compactação do solo aumenta conforme o aumento do número de passadas oferecendo maior resistência mecânica do solo à penetração, interferindo negativamente na camada 10 a 20 cm. Os mapas de isolinhas indicaram pontos de resistência do solo à penetração, que embora não críticos, mostram a importância da adequação dos tratores e seus equipamentos na redução da compactação do solo para melhor desenvolvimento da cultura a ser implantada.

PALAVRAS - CHAVE: Adequação de tratores, compactação do solo, equilíbrio operacional, lastro, penetrômetro.

SOIL MECHANICAL RESISTANCE TO THE TRAFFIC OF RADIAL TIRES IN FUNCTION OF WEIGHT/POWER RELATIONSHIP

ABSTRACT - The factors that most influence the yield of traction are soil conditions, tire size, weight / power relationship, and tire type (radial / diagonal). The use of specific tires for a certain type of rolling surface would increase their operational performance. Therefore, the characterization of the tire, use of the required load on the wheel associated with soil compaction studies, may indicate better working conditions and consequently reduced fuel consumption. The objective of this study was to evaluate the mechanical resistance to soil penetration, the area mobilized by the tires and the fuel consumption after traffic of two types of rear (710 / 70R38 and 650 / 85R38) and front (600 / 70R28 and 600 / 65R28) combined with four tractor weight / power relationship in an area prepared for sugarcane cultivation. The statistical design was a factorial with randomized blocks subdivided with four replicates, statistical analysis was performed by the F test and when significant the Tukey test was performed at 5% probability, for the interactions between treatments regression adjustment of higher exponent that presented significance and Maps to better explain the behavior of the variable. Tires and weight / power relationship did not interfere in the mechanical resistance of the soil to penetration in the present work. Soil compaction increases as the number of passes increases, giving the soil greater mechanical resistance to penetration, negatively interfering with layer 10 to 20 cm. The isoline maps indicated soil penetration resistance points, which although not critical, show the importance of the adequacy of the tractors and their equipment in the reduction of soil compaction for better development of the crop to be implanted.

KEYWORDS: Suitability of tractors, soil compaction, operational balance, ballast, penetrometer.

LISTA DE TABELAS

TABELA	Página
1. Resultado inicial da análise química do solo da área experimental.....	13
2. Condições de lastro.....	16
3. Lastragem.....	16
4. Médias dos valores de pressão de inflação, largura, comprimento e altura das garras dos pneus e relação de avanço obtidas das condições de lastro para cada conjunto de pneus.....	17
5. Valores médios do teor de água no solo para as profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm.....	17
6. Valores médios da área mobilizada do solo pelos pneus avaliados em função do conjunto de pneus (A), da relação peso/potência (B) e do número de passadas (C).....	23
7. Desdobramento dos valores de área mobilizada (m ³) para efeito do conjunto de pneus (A) dentro das relações peso/potência (B).....	24
8. Desdobramento dos valores de área mobilizada (m ³) para efeito do conjunto de pneus (A) dentro do número de passadas (C).....	25
9. Desdobramento dos valores de área mobilizada (m ³) para efeito Da relação peso/potência (B) dentro do número de passadas (C).....	25
10. Desdobramento dos valores de profundidade do recalque (cm) para efeito do conjunto de pneus (A) dentro da relação peso/potência (B).....	26
11. Desdobramento dos valores de profundidade do recalque (cm) para efeito do conjunto de pneus (A) dentro do número de passadas (C).....	26
12. Valores médios de resistência mecânica do solo à penetração (MPa) em função do conjunto de pneus x relação peso/potência (AB), do número de passadas (C), e das profundidades (D).....	27
13. Desdobramento dos valores de resistência mecânica do solo à penetração (MPa) nas profundidades de 0-10 cm 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm (D1, D2, D3 e D4, respectivamente), demonstrando o efeito do número de passadas (C).....	27
14. Valores médios de Consumo de combustível, avaliados em função do conjunto de pneus (A) e da relação peso-potência (B).....	31

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Página
1. Partes constituintes dos pneus.....	3
2. Velocidades e forças básicas em uma roda e força resultante da reação do solo...7	7
3. Área experimental.....	13
4. Trator utilizado para realização do experimento.....	14
5. Avançômetro.....	15
6. Vista geral do PNT-Titan e detalhamento do penetrômetro.....	18
7. Representação das cinco subamostras retiradas em transepto, totalizando largura 55 centímetros.....	18
8. Vista geral do perfilômetro.....	19
9. Croqui.....	20
10. Divisão da parcela experimental.....	21
11. Regressão Cúbica dos efeitos de Profundidades dentro de Passadas.....	29
12. Mapas de isolinhas para os efeitos do Número de Passadas e da Profundidade (cm) dentro de Pneus. A e B, 1 e 2 passadas do pneu 650/85R38. C e D, 1 e 2 passadas do pneu 710/70R38.....	30

1. INTRODUÇÃO

O tráfego de máquinas agrícolas acompanhado do excesso de lastros e da intensidade do uso dos solos são as causas principais da compactação do solo. Desta forma, a escolha do pneu e uma lastragem adequada são soluções para minimizar a degradação do solo causada pelas máquinas.

Há três tipos de construção de pneus: radial, diagonal e baixa pressão e alta flutuação (BPAF); dentro de cada tipo há diferenças, como largura do pneu, relação entre a largura e altura, tamanho de garras, flexibilidade que alteram a área de contato com o solo e, conseqüentemente, a distribuição do peso do trator. Vários estudos comparam esses tipos de pneus, porém faltam estudos sobre as diferenças dos mais utilizados dentro do mesmo tipo.

Em termos práticos, quando falamos em operações pesadas, um trator com pouco lastro pode apresentar aumento no desgaste dos pneus e redução da eficiência de operação. Por outro lado, um trator com excesso de lastro pode causar compactação do solo, aumento de carga sobre a transmissão, perda de potência e de tração, rompimento das garras dos pneus, e conseqüentemente, menor vida útil do maquinário e dos pneus. No entanto, comumente vemos que o operador não costuma remover ou adicionar lastros líquidos e metálicos para que o trator atenda às necessidades de peso da operação, visto que é uma tarefa que exige tempo e esforço físico.

Quando o trator se encontra em equilíbrio operacional, quer dizer que está adequado para a operação desejada, ou seja, com distribuição correta de peso nos eixos, pressão interna do pneu adequada em função da carga para o tipo de superfície de contato, trazendo como benefícios ganho de tempo na operação, menor desgaste do pneu e principalmente redução na compactação do solo. Desta forma, o equilíbrio operacional dos tratores tornou-se uma importante ferramenta em um sistema que busca aumento da produção de forma, cada vez mais, sustentável.

Para avaliar a intensidade da compactação do solo, há alguns métodos como análise da densidade do solo, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade, e a Resistência Mecânica do Solo à Penetração (RMSP). A RMSP,

um dos parâmetros mais utilizados devida a sua praticidade e relação com as demais análises, é medida por meio de penetrômetros e penetrográfos que simulam a resistência que o solo oferece à penetração das raízes por meio de uma haste de ponta cônica.

Com base no exposto, o presente trabalho considerou a hipótese de que quanto maior a relação peso/potência do trator, maior será o recalque pelos rodados, o consumo de combustível, e o valor da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP). Desta forma, as características dos pneus, uso da carga necessária sobre o rodado, associado aos estudos da RMSP, pode indicar melhores condições de trabalho e redução na compactação do solo, além de economia com os pneus.

Objetivou-se avaliar a RMSP por profundidades, recalque no solo pelo pneu e o consumo de combustível para duas medidas de pneus radiais traseiros (710/70R38 e 650/85R38) e dianteiros (600/70R28 e 600/65R28), em função de quatro relações peso/potência, para uma e duas passadas dos rodados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Pneus e a área de contato

Os tratores inicialmente possuíam rodas metálicas, utilizadas nas lavouras, não podiam circular em vias públicas ou terrenos úmidos pois as rodas rígidas não proporcionavam tração e estas também eram inadequadas para fins de cultivo, uma vez que causavam diversos danos às raízes das culturas (MÁRQUEZ, 2010).

Os pneus agrícolas são o elo entre o trator e o solo, além de serem também responsáveis pelo tracionamento que o trator irá proporcionar para o arraste das demais máquinas e implementos agrícolas, realizando, assim, as operações no campo para as quais foram construídos (GABRIEL FILHO et al., 2010). Portanto, há necessidade de estudá-los devido à interferência que podem causar no desempenho da máquina.

Segundo BARBOSA et al. (2005), o pneu de um trator é um de seus componentes mais importantes, pois é responsável pela sustentação, equilíbrio, deslocamento, direcionamento e realização do esforço do trator. A capacidade de fornecer potência para tracionar implementos e realizar satisfatoriamente as operações agrícolas depende da configuração do rodado que equipa o trator, além disso, também influenciam na compactação do solo.

Em geral, os pneus são constituídos de 4 partes principais de acordo com MITAS (2013), sendo:

Banda de rodagem: parte do pneu que entra diretamente em contato com o solo. Formada por um composto especial de borracha que oferece grande resistência ao desgaste.

Flancos: protegem a carcaça de lonas. São dotados de uma mistura especial de borracha com alto grau de flexibilidade.

Carcaça: é a parte de resistência do pneu, constituída de lonas de poliéster, nylon ou aço. Retém o ar sob pressão que suporta o peso total das máquinas agrícolas.

Talão: são constituídos internamente de arames de aço de grande resistência e tem por finalidade manter o pneu acoplado no aro.

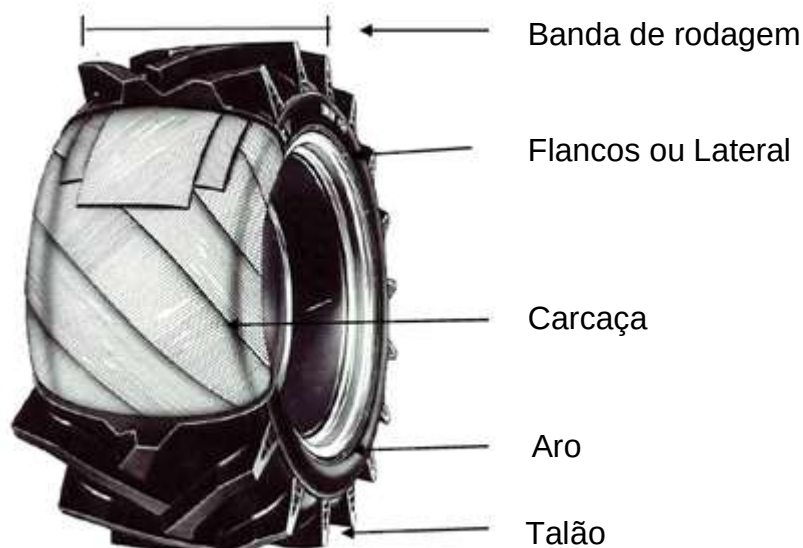


Figura 1. Partes constituintes dos pneus. Trelleborg do Brasil (2013).

Existem três tipos distintos de construção estrutural de pneus agrícolas, sendo eles: diagonal, baixa pressão e alta flutuação (BPAF) e radial, de acordo com ALAPA

(2013). Os pneus radiais apresentam os cordoneis dispostos de talão a talão em ângulo de 90° em relação à linha central da banda de rodagem, o que lhe confere flexibilidade lateral; as cintas estabilizadoras sob a banda de rodagem proporcionam uma característica plana da área de contato do pneu com a superfície (ALAPA, 2013).

LOPES et al. (2005) compararam o desempenho de um trator agrícola 4x2 TDA de 89 kW (121 cv) em função do tipo de pneus (radial, diagonal e de baixa pressão), da condição de lastragem (com e sem água nos pneus) e para quatro velocidades ($M1 = 1,8 \text{ km h}^{-1}$, $M2 = 3,1 \text{ km h}^{-1}$, $M3 = 4,5 \text{ km h}^{-1}$ e $M4 = 5,0 \text{ km h}^{-1}$). Os resultados obtidos por esses pesquisadores evidenciaram as vantagens para as situações em que o trator estava equipado com pneus radiais.

Para se estabelecer condições de trabalho de um pneu, considerando-se as suas características de construção, é necessário conhecer algumas variáveis, como a pressão de inflação, a área de contato do pneu com o solo, e a resistência à penetração gerada quando aplicadas distintas cargas sobre o solo (NAGAOKA et al., 2002).

ALAKUKKU et al. (2003) define a área de contato pneu-solo como a área de uma superfície que realmente suporta a carga, sendo diretamente proporcional a carga vertical imposta e inversamente proporcional a pressão interna dos pneus. A área de contato pode variar com o tipo de rodado, com a pressão interna do pneu, com a carga vertical incidente sobre o mesmo e, com a deformação sofrida pelo solo.

A estimativa da área de contato contribui para a determinação das pressões de contato, da relação tensão-deformação e do risco potencial de compactação. Aumentando a superfície de contato entre pneu e solo pode-se reduzir os índices de patinagem, aumentar a força de tração disponível e diminuir o consumo de combustível por área trabalhada (FRANTZ, 2011).

À medida que aumenta a área de contato do pneu com o solo, através do uso de pneus com maior largura da banda de rodagem, ou até mesmo com a utilização de menor pressão de inflação e lateral mais flexível, há uma distribuição de maneira uniforme da carga do rodado sobre o solo, conseqüentemente a resistência ao rolamento e o consumo de combustível reduzem (DISERENS, 2009).

De acordo com FERNANDES et al. (2013), a redução do risco de compactação é efetivamente obtida quando se reduz a pressão aplicada por unidade de área e

eleva-se a área de contato por meio da utilização de esteiras ou de pneus mais largos, duplos ou com menor pressão de inflação.

Quando o pneu de um trator submetido a determinada carga, se desloca sobre o solo, tanto o pneu quanto o solo sofrem deformações. Para uma mesma carga aplicada, a deformação do solo será tanto maior quanto menor for a sua resistência ao cisalhamento. Já a deformação do pneu é dependente principalmente da sua pressão interna e da rigidez da carcaça (GOERING et al., 2003).

As maiores deformações no solo ocorrem logo após a primeira passagem da máquina, sendo os efeitos das passagens subsequentes mais reduzidos (NAGAOKA et al., 2003). Sendo que, a compactação na camada superficial do solo, até 0,25 m de profundidade, está relacionada com a pressão exercida entre o rodado e a superfície de contato, enquanto que a compactação subsuperficial está relacionada à carga por eixo das máquinas (LAGUË et al., 2003).

FLORES et al. (2007), cita que a pressão exercida sobre o solo é o agente causador da compactação, e a compactação subsuperficial está relacionada à carga total aplicada por eixo das máquinas agrícolas, independentemente da pressão exercida sobre a superfície.

LYASKO (1994) avaliou as deformações laterais e a área de contato de um pneu agrícola sobre uma superfície rígida. O autor concluiu que a deformação vertical e horizontal e área de contato variaram de acordo com o valor de carga aplicado, largura da banda de rodagem, diâmetro externo, construção da carcaça e pressão de inflação. A redução na pressão de um pneu resulta no aumento de sua área de contato com o solo, o que eleva a capacidade de tração e reduz o potencial de compactação por ele causado (LYASKO, 2010).

E, a deflexão do pneu é aumentada quando para uma determinada carga vertical aplicada, reduz-se a pressão interna do pneu; ou quando se mantendo a pressão interna constante, aumenta-se a carga aplicada. Em ambos os casos o incremento na deflexão tem como objetivo manter aproximadamente constante a área de contato entre o pneu e o solo e conseqüentemente, a pressão média aplicada (FEITOSA et al., 2016).

2.2. Desempenho e equilíbrio operacional de tratores

A recomendação e o desempenho operacional dos tratores agrícolas estão diretamente relacionados com o peso do trator, a operação e o tipo do solo basicamente.

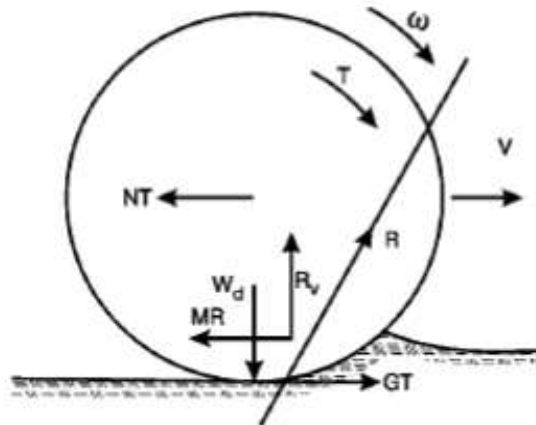
A distribuição de massa é a forma como a força peso é distribuída sobre o apoio em nível que sustenta de forma estável as máquinas. As forças envolvidas na avaliação da distribuição de massa de um conjunto tratorizado, utilizando uma máquina montada, são o peso do trator e da máquina e as reações nos apoios sob o eixo frontal e traseiro (MIALHE, 1996). Em vista disso, MONTEIRO, LANÇAS E GABRIEL FILHO (2009) constataram que a adição de peso ao trator obedecendo a critérios de relação entre o peso e a potência, acarreta em melhorias em termos de rendimento operacional.

Segundo SCHLOSSER et al. (2005), os tratores mais leves, com relações peso/potência em torno dos 35 kg.cv-1, são adequados à execução de operações mais leves e com maiores velocidades, tais como pulverização, transporte interno e externo à propriedade, entre outras. Já os tratores com relação peso/potência em torno dos 60 kg.cv-1 são apropriados a operações de maior exigência de força de tração, desenvolvendo, portanto menores velocidades, tais como aração, escarificação, gradagem e outras.

Atualmente os tratores vêm se tornando mais leves, bem como a relação peso/potência vem sendo reduzida, sendo essa redução maior para tratores de potência mais elevada (MÁRQUEZ, 1990). Esta redução provoca diminuição da resistência ao rolamento, com importante decréscimo da potência perdida, e induz ao uso de implementos com engate no sistema hidráulico de três pontos, que proporcionam transferência de carga dinâmica às rodas motrizes, substituindo com vantagem o lastro fixo. A redução de peso imprime versatilidade ao trator, entretanto em operações que demandam grande esforço de tração determinam uma alta dependência de lastro.

A Figura 1 é uma representação esquemática das forças atuantes sobre uma roda ao desenvolver tração e da reação correspondente do solo (reação da superfície). A força de tração bruta (GT) produzida é o somatório da força de tração

líquida (NT), que é a força paralela a direção de deslocamento desenvolvida pelo dispositivo de tração e transferida para o trator; com a força de resistência ao rolamento (MR), que resiste ao movimento do dispositivo de tração e é responsável pelas perdas de energia não atribuídas ao deslizamento do rodado (ASAE, 2003).



ω – Velocidade angular

T – Torque de entrada

V - Velocidade

R – Força de reação de superfície

MR – Resistência ao rolamento

NT – Tração líquida

W_d – Carga dinâmica

WR – Resistência líquida

R_v – Força de reação de superfície
(vertical)

Figura 2. Velocidades e forças básicas em uma roda e força resultante da reação do solo. (Fonte: ASAE, 2003)

A força de reação do solo pode ser expressa em termos da sua resistência ao cisalhamento. Se o solo for submetido a uma solicitação maior que a sua resistência ao cisalhamento, o mesmo se romperá e os pneus deslizarão. Solos mais compactados tendem a ter maior resistência ao cisalhamento devido a menor distância entre as partículas (PIRES, 2012).

O desempenho de tração é afetado pelas forças de reação normal e tensão de cisalhamento do solo, pois elas interferem na resistência ao movimento e na redução de deslocamento (ZOZ e GRISSO, 2003). Os autores relatam que, descrever o solo talvez seja a parte mais difícil para avaliar a tração, pois o solo apresenta grandes variações de propriedades e características, que pode facilmente influenciar a sua caracterização. Medir essas variáveis leva tempo e as avaliações dos parâmetros de

tração não pode ser reproduzido ou repetido para condições diferentes do solo. Por esta razão, muito dos testes da tração são de natureza comparativa, isto é, um dispositivo de tração comparado a outro dispositivo, quando operados sob as mesmas condições do solo. Para avaliar as forças do solo que afetam o desempenho da tração, o parâmetro físico mais utilizado nas equações de simulação, é o índice de cone, obtido no campo através dos penetrômetros (ZOZ e GRISSO, 2003).

Segundo MIALHE (1980), As três diferentes situações em que uma roda pode se movimentar são: rodas movidas ou rodas que se movimentam em função da ação de uma força externa a esse sistema, rodas auto propelidas ou rodas que se movimentam pela ação de um torque no seu eixo, porém, esse torque é exatamente suficiente para movimentação somente da roda, sem gerar força útil de tração e rodas motoras ou motrizes ou rodas que, além de se auto propelirem, ainda fornecem força de tração útil para rebocar ou tracionar outros equipamentos. De acordo com o torque na roda, raio de rolamento e carga no rodado, as rodas podem ser classificadas em: movidas, onde há uma força externa aplicada ao eixo da roda, apresentando patinagem negativa, auto propelidas onde o torque aplicado no eixo pelo motor produz somente o movimento da roda e a força externa no sistema é zero, e motoras ou motrizes onde o torque aplicado no eixo pelo motor produz o movimento da roda e traciona elementos externos à roda, ou seja, a força externa no eixo é maior que zero e a patinagem é positiva.

O trator se encontra em equilíbrio operacional quando lastros, pressão de inflação dos pneus, relação de avanço e patinagem estão de acordo com a relação peso/potência exigida para a operação, tipo do solo e equipamento.

Contudo, quando alguns destes fatores são alterados, modifica-se também o avanço do trator. Denomina-se avanço de um trator a percentagem da diferença de rotação da roda dianteira, com e sem a tração dianteira acionada, para um mesmo deslocamento da roda traseira, sendo baseada na relação mecânica de distribuição de torque na dianteira e traseira do trator e o raio de cada roda. Para que o desempenho do trator seja otimizado, a relação de avanço deve se encontrar entre 1 e 5%, e a patinagem dos rodados não ultrapassar 20% (LINARES et al., 2006).

SPAGNOLO et al. (2012) afirmam que, utilizando-se de pressão interna e lastragem adequadas, é possível obter maior rendimento e prolongar a vida útil do

pneu, além de minimizar problemas de perda de tração, patinagem excessiva e aumento do consumo de combustível.

SMERDA E CUPERA (2010), afirmam que a redução na pressão de inflação e o uso do tipo adequado dos pneus podem melhorar as características de força de tração e consequentemente diminuir o consumo de combustível.

2.3. Compactação pelo tráfego de máquinas em áreas de cultivo de cana-de-açúcar

BERISSO et al. (2013) afirmam que a compressão e a distorção (ou deformação de cisalhamento) são devidas as tensões impostas pelos pneus de máquinas agrícolas e podem afetar diversas funções ecológicas do solo dependendo das condições do sistema poroso do mesmo após a deformação.

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados na tentativa de compreender essa dinâmica, para isso são utilizados atributos físicos como granulometria, densidade do solo, porosidade do solo, resistência do solo à penetração e taxa de infiltração, entre outros (Carneiro et al., 2009), destacando-se entre elas a densidade do solo, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade e a resistência do solo à penetração (MORAES et al., 2013), as quais influenciam significativamente o desenvolvimento das culturas.

A compactação do solo influencia todas as fases de desenvolvimento da cultura. No entanto, em muitas áreas com baixos rendimentos de cana, os valores e os efeitos críticos da compactação do solo são ignorados, enquanto os produtores alegam não saber a localização e a intensidade da compactação do solo (OLIVEIRA FILHO et al., 2015).

O sistema radicular da cana se desenvolve em maior profundidade que outras culturas, principalmente anuais, por ser semiperene, com ciclo de cinco a sete anos. Este sistema é formado por rizomas e raízes fasciculadas, das quais 85% se encontram na camada de 50 cm de profundidade e 60% na camada de 20 a 30 cm. Por isso, a cana-de-açúcar é uma das culturas mais afetadas pela compactação do solo (LIMA et al., 2013).

VASCONCELOS (2002), estudando o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita, manual com a queima e mecanizado sem queima, verificou que a alteração do sistema de colheita manual para mecanizado reduziu a amplitude térmica do solo, aumentou o teor de água e de matéria orgânica no solo. O elevado tráfego de máquinas e veículos de transbordo causou aumento da densidade do solo até a profundidade de 0,40 m.

Segundo SOUZA et al. (2005), que avaliaram atributos físicos do solo sob diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar: manual com cana queimada, mecanizada sem incorporação e mecanizada com incorporação dos resíduos vegetais, os sistemas de colheita de cana-de-açúcar alteraram os atributos físicos do solo até a profundidade de 0,30 m.

O processo de produção de cana-de-açúcar está baseado em unidades em que se realizam o plantio e o cultivo em uma ou duas linhas, com tratores que têm no máximo 2,0 m de bitola. A colheita é feita em linhas simples, acompanhada do veículo de transbordo na linha adjacente. Como consequência, verifica-se um tráfego intenso, com baixo rendimento operacional, alto custo e elevada compactação dos solos. Esses são alguns dos fatores que obrigam a replantio do canavial a cada cinco anos (ROQUE et al., 2010).

Alguns fatores agravam a situação, no caso de solos mantidos descobertos apresentam aumento na degradação física, redução da macroporosidade e da taxa de infiltração de água no solo, expressos pelo aumento da densidade do solo e da resistência mecânica à penetração (LANZANOVA et al., 2010).

Esta resistência mecânica do solo à penetração (RMSP), é um dos parâmetros mais utilizados para avaliar a intensidade da compactação do solo, é medida por meio de penetrômetros, que indicam a resistência exercida pelo solo à penetração de uma ponta cônica e pode simular a resistência que o solo oferece à penetração das raízes (CAMPOS et al., 2013).

Para a qualidade física, a resistência do solo à penetração também é considerada por SILVEIRA et al. (2010) a propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação do solo e, conseqüentemente, a facilidade de penetração das raízes.

Para ABREU, REICHERT E REINERT (2004), a RMSP é mais sensível na detecção da compactação do que a densidade e porosidades, especialmente para camadas pouco espessas, as quais caracterizam melhor a variação em propriedades mecânicas do solo. VOORHEES (1983), afirma que a densidade do solo não é o fator mais limitante ao crescimento radicular, mas, sim, a resistência que o solo oferece ao crescimento das raízes, determinada por um penetrômetro. Contudo, nem sempre o limitante da produtividade das culturas é a resistência mecânica do solo, mas um conjunto de fatores.

Valores de RP acima de 2,0 MPa são considerados críticos para o desenvolvimento radicular (ARSHAD & MARTINS, 2002), embora o valor limitante ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas ainda seja muito discutido, pois depende da densidade do solo, textura, tipo do sistema radicular, teor de água, entre outros fatores que direta ou indiretamente podem influenciar a resistência do solo (BONINI, 2006).

A severidade da compactação depende da magnitude e natureza da força compactante, teor de água no solo, textura, densidade inicial do solo e a quantidade de matéria orgânica incorporada e em cobertura (STONE e EKWUE, 1993). A magnitude dos efeitos do manejo sobre as propriedades físicas do solo é determinada pelas condições climáticas, classe de solo, sistemas de rotação de culturas utilizados, tempo de uso dos diferentes sistemas de manejo e condição de teor de água do solo em que são realizadas as operações de campo (BERTOL et al., 2000).

De acordo com SEVERIANO et al. (2008), a compactação restringe o crescimento das plantas, pois esta é marcada pela diminuição da porosidade de aeração do solo (macroporosidade) e aumento da resistência à penetração das raízes, caso que não ocorre em solos bem estruturados, onde as restrições são relacionadas ao déficit hídrico. A resistência do solo à penetração apresenta correlação inversa com o teor de água no solo (ASSIS et al., 2009) e diretamente proporcional com a sua densidade (TORMENA et al., 1999), sendo que a interação dessas propriedades físicas determina a qualidade do solo.

Para ROQUE et al. (2003) em solos não mobilizados anualmente, como é o caso da cana-de-açúcar, os valores para RMSP médios entre 2 e 4 MPa não são impeditivos ao crescimento radicular, afirmando que são toleráveis valores até 4 MPa.

TAVARES FILHO et al. (2001), estudando Latossolo Roxo argiloso, verificaram que os valores de resistência do solo à penetração no plantio direto foram mais afetados pela distribuição estrutural do trator, ou seja, pela relação peso/potência, do que pelo teor de água do solo.

TOLON-BECERRA et al., (2011), avaliando o efeito do tráfego de um trator leve e um pesado na compactação do solo, observaram que, entre 0,0 e 0,20 m de profundidade, o índice de cone e a densidade do solo responderam à pressão aplicada ao solo tanto para uma passada dos tratores, quanto para 3 e 5, sendo os maiores valores absolutos obtidos para o trator leve, o que foi justificado pelos autores pela menor área de contato pneu-solo apresentada por este. A área de contato pneu-solo ou, recalque, é uma designação técnica com base no conceito de mecânica do solo e se trata do rebaixamento do leito de rolamento pelos rodados causando uma diminuição de volume e dos macro poros, com expulsão do ar e água neles existentes (MIALHE, 1993).

COUTO et al., (2013) também estudaram a compactação e recalque superficial em solo de textura argilosa, analisaram a regressão para o recalque do solo em função da intensidade de tráfego, o comportamento apresentou ajuste linear. Com o aumento do tráfego houve tendência de aumento no recalque do solo. Os maiores recalques foram obtidos para oito passadas em movimento vai-e-vem do rodado de um trator agrícola, com valor médio de 15,74 cm; para uma passada o valor foi 9,11cm.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental

O experimento foi instalado e conduzido no ano 2015/16, em condição de campo, na Fazenda Barrinha, área da Usina São Martinho, município de Pradópolis, no Estado de São Paulo, localizado nas coordenadas geodésicas: 21°19'S, 48°07'W (Figura 3). O clima da região, conforme a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, subtropical úmido. O solo da área experimental é classificado como LATOSSOLO ROXO (LR2), de textura argilosa, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de

Solos (Embrapa, 2013), em que se cultiva cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) A Tabela 1 apresenta os resultados da análise química da área.

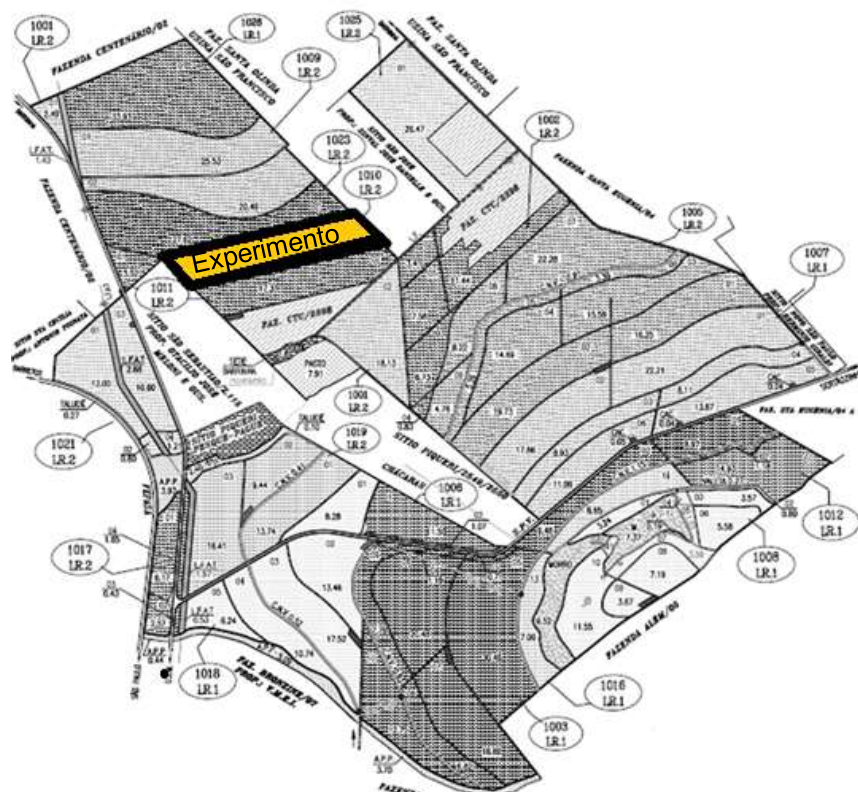


FIGURA 3. Área experimental destacada dentro da área da usina São Martinho.

Tabela 1. Resultado da análise química do solo da área experimental.

M.O.	P (Resina)	H+Al	K+ (Resina)	Ca++	Mg++	Al	pH CaCl ₂	S	T	M%	V%
g/dm	mg/dm		cmol/dm								
26	20,25	4,02	0,11	2,41	0,99	0,16	5,1	3,52	7,55	6,17	46,02

Realizou-se a subsolagem na profundidade média de 40 cm, com um subsolador montado, trabalhando a uma velocidade de 4,3 km h⁻¹. O subsolador da marca Baldan que possui as seguintes especificações: Engate de arrasto e hidráulico, Discos de corte independentes reguláveis, dispostos na frente e no alinhamento de cada haste e 5 hastes em curva (45°). No momento da subsolagem a área se encontrava com restos culturais de cana.

3.2 Trator

Foram utilizados dois tratores CASE IH Magnum 235 (Figura 4), 4x2 TDA, 172 kW (235 cv) de potência no motor, com massa de 10.000 kg sem lastros, bitola de 3 m, nas mesmas condições de uso. Cada trator com um conjunto de pneus novos TRELLEBORG, sendo primeiro conjunto (P1): pneu traseiro 650/85R38 e pneu dianteiro 600/70R28; e o segundo conjunto (P2): pneu traseiro 710/70R38 e pneu dianteiro 600/65R28. Os mesmos utilizados normalmente em tratores agrícolas.



FIGURA 4. Trator utilizado para realização do experimento.

3.3 Avançômetro

Foi medida a relação de avanço do trator por meio do Avançômetro, da marca Finger do Brasil. O equipamento é formado por um microprocessador eletrônico digital, dois sensores de roda e chave sinalizadora (Figura 5). Para isso, o trator se manteve em movimento a uma velocidade de 2 km h⁻¹ em local plano e firme, com a TDA acionada e depois com a TDA desligada, conforme as recomendações do fabricante do equipamento.



FIGURA 5. Avançômetro.

3.4 Equilíbrio Operacional dos tratores

Na Tabela 2 são apresentados o peso do trator, a distribuição de peso entre os eixos e a relação entre o peso e a potência do trator equipado com pneus radiais, assim como a pressão de inflação indicada pelo manual para as quatro condições de lastros. Desta forma, o trator foi pesado com todos os lastros metálicos e líquido, conforme a relação peso/potência estabelecida, a fim de que mantivesse aproximadamente a proporção de distribuição de peso por eixo para equipamento montado, ou seja, de 60% do peso do trator sobre o eixo traseiro e, 40% do peso do trator sobre o eixo dianteiro.

A patinagem não foi mensurada no experimento pois não foram utilizados transbordos, ou quaisquer outros implementos agrícolas tracionados pelos tratores, visto que a intenção foi estudar e comparar, somente, o efeito em campo dos pneus do trator.

TABELA 2. Condições de lastro.

	Eixo	Peso (kg)	Pressão (psi)	Distribuição (%)	Relação Peso/Potência (kg cv ⁻¹)
Condição de Lastro 1	Dianteiro	654,2	9	40,0	49,6
	Traseiro	995,8	9	60,0	
	Total	11.650			
Condição de Lastro 2	Dianteiro	849	9	40	51,6
	Traseiro	1267,8	12	60	
	Total	12.116,8			
Condição de Lastro 3	Dianteiro	1029	12	40,3	53,1
	Traseiro	1449,8	12	59,7	
	Total	12.478,8			
Condição de Lastro 4	Dianteiro	1288	15	39,9	56,5
	Traseiro	1980	12	60,1	
	Total	13.268			

A Tabela 3 apresenta os lastros líquidos e metálicos utilizados para que o trator trabalhasse nas condições estabelecidas pela tabela 2.

TABELA 3. Lastragem.

	Eixo Dianteiro	Eixo Traseiro
Lastragem 1	9 lastros de 45 kg 25% água nos pneus	2 lastros de 227 kg 2 lastros de 91 kg 40% água nos pneus
Lastragem 2	10 lastros de 45 kg 40% água nos pneus	2 lastros de 227 kg 40% água nos pneus
Lastragem 3	14 lastros de 45 kg 40% água nos pneus	2 lastros de 227 kg 2 lastros de 91 kg 40% água nos pneus
Lastragem 4	10 lastros de 45 kg 75% água nos pneus	2 lastros de 227 kg 75% água nos pneus

As garras dos pneus foram medidas, segundo a ASAE (1999), utilizando-se um paquímetro, e a pressão de inflação foi adequada por meio de manômetro tendo como parâmetro a porcentagem para relação de avanço aceitável até 5%. As médias dos tratamentos para cada pneu está apresentada na Tabela 4.

TABELA 4. Valores de pressão de inflação, e relação de avanço obtidas das condições de lastro para cada conjunto de pneus.

		Pressão de inflação		Relação de Avanço	
	Eixo	A1	A2	A1	A2
Condição de Lastro 1	Dianteiro	27	28	1,07	3,03
	Traseiro	21	25		
Condição de Lastro 2	Dianteiro	30	22	1,82	2,03
	Traseiro	18	20		
Condição de Lastro 3	Dianteiro	30	30	1,54	4,26
	Traseiro	18	18		
Condição de Lastro 4	Dianteiro	28	25	1,15	4,02
	Traseiro	18	15		

3.5 Teor de água do solo

As médias do teor de água do solo no momento da coleta dos dados estão representados na Tabela 5.

Foram escolhidos 4 pontos amostrais para caracterização da área para obtenção do teor médio de água no solo. Amostras de solo foram coletadas com auxílio de um trado holandês e cápsulas de alumínio, até a profundidade de 40 cm, em intervalos de 10 cm, durante as avaliações de RMSP.

TABELA 5. Valores médios do teor de água no solo para as profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm.

Profundidade (cm)	Umidade Relativa (%)
0 - 10	20,9
10 - 20	20,2
20 - 30	22,3
30 - 40	24,2

3.6 Avaliações

Foram avaliadas as variáveis:

- Resistência mecânica do solo à penetração (RMSP): utilizou-se um penetrômetro eletrônico denominado de PNT-Titan, constituído de célula de carga com capacidade nominal de 100 kgf (1000 N), haste com ponteira cônica com 130 mm² de diâmetro e 12,83 mm de base (ASAE, 2009), acoplado a um quadriciclo da marca DLG Automação (Figura 6). Os dados foram coletados pelo próprio aparelho

em intervalos de 1 cm até 40 cm de profundidade. Foi coletado 1 ponto por parcela, com 5 subamostras retiradas em transepto, com largura 55 cm, por repetição (Figura 7).



Legenda:

- 1 - Sistema de configuração, operação e aquisição de dados do penetrômetro.
- 2 - Motor elétrico de acionamento da haste do penetrômetro;
- 3 - Sensor indutivo-capacitivo de medição da profundidade de penetração da haste;
- 4 - Alavanca de posicionamento do penetrômetro para operação ou transporte;
- 5 - Célula de carga para medição da força normal à penetração da haste até 1500N;
- 6 - Haste do penetrômetro.

FIGURA 6. Vista geral do PNT-Titan e detalhamento do penetrômetro. Fonte: TOLEDO et al. (2009)



FIGURA 7. Representação das cinco subamostras retiradas em transepto, totalizando largura 55 centímetros.

- Largura e profundidade do recalque do pneu: estas avaliações foram realizadas com a ajuda de um perfilômetro (Figura 8), constituído de 19 varetas, espaçadas de 5 cm e altura máxima de 30 cm. Ao fundo do perfilômetro colocou-se um quadro de linhas na horizontal com espaçamento de 5 cm para facilitar a leitura, sendo a mesma analisada por 64 imagens fotográficas. O posicionamento da extremidade superior das varetas copia a forma geométrica do sulco, podendo-se então realizar as leituras. A largura foi definida da primeira até a última vareta a qual, ao caírem no solo, apresentaram medidas distintas. A profundidade máxima foi definida pela média das três varetas que apresentaram maior medida.



FIGURA 8. Vista geral do perfilômetro.

- Área mobilizada pelo pneu: após as leituras das imagens fotográficas os dados foram lançados em uma planilha eletrônica do programa Microsoft Excel®, em que se obteve a área da seção transversal de solo mobilizada pelos pneus, em cm², resultante da integral da regra dos trapézios (Equação 1) proposto por Ruggiero e Lopes (1996).

$$\int f(x) = h/2 [f(x_0) + 2f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_{m-1}) + f(x_m)] \quad (1)$$

Em que,

$\int$ = integral numérica para área mobilizada do solo,

h = distância entre as varetas do perfilômetro (5 cm),

x = valor das leituras das varetas (cm).

- Consumo de combustível ($L h^{-1}$): foram coletados dados para cada tratamento, utilizando o sistema de aquisição de dados e o computador de bordo próprio do trator. Os tratores são equipados com o sistema Common Rail, que proporciona uma queima mais eficiente do combustível, garantindo um consumo mais baixo.

3.7 Delineamento experimental

Adotou-se o delineamento em blocos casualizado, com quatro repetições, tendo como tratamentos dois conjuntos de pneus (A1 e A2), as quatro relações peso/potência adquiridas a partir das condições de lastro: 49,6; 51,6; 53,1 e 56,5 kg cv^{-1} (B1, B2, B3 e B4, respectivamente), para uma e duas passadas do trator. Cada parcela com área de 275 m² (11x25 m) como demonstra a Figura 9.

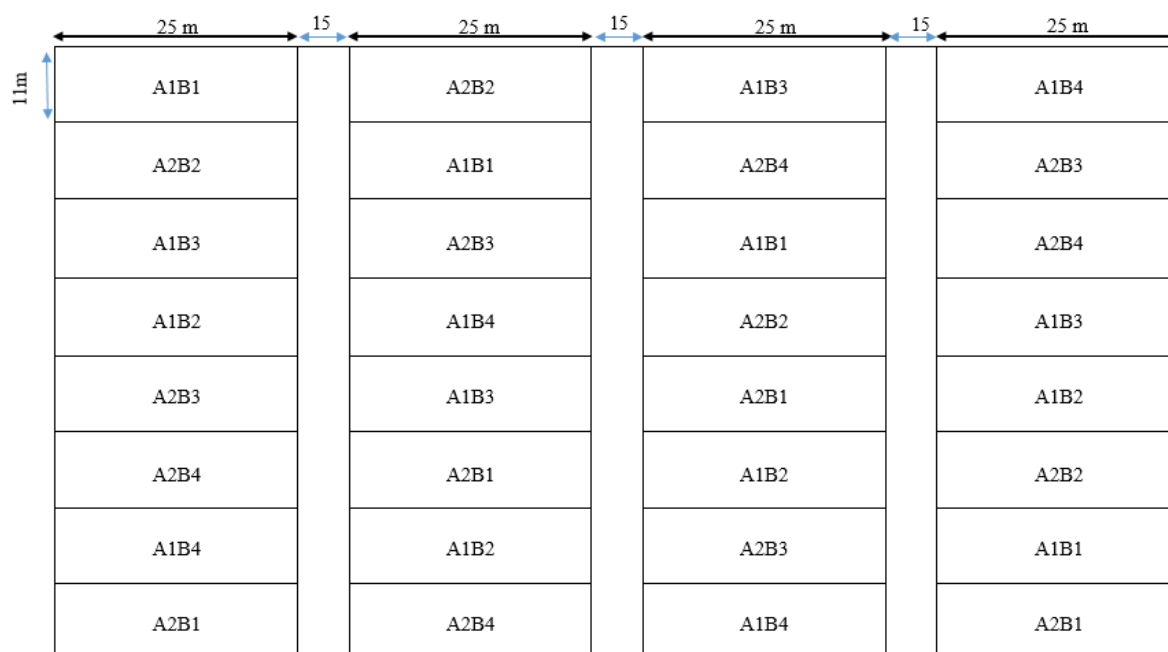


FIGURA 9. Croqui.

Em todos os tratamentos, o trator agrícola deslocou-se por 25 m a uma velocidade de 8 km h^{-1} , com tração dianteira auxiliar desligada, e a rotação do motor em 1800 rpm para a marcha C1, sendo selecionada por ser a mais utilizada pelos transbordos da usina nas operações de colheita. Assim, o trator se movimentava nas

parcelas de acordo com a Figura 10, fazendo suas manobras no carregador entre os blocos.

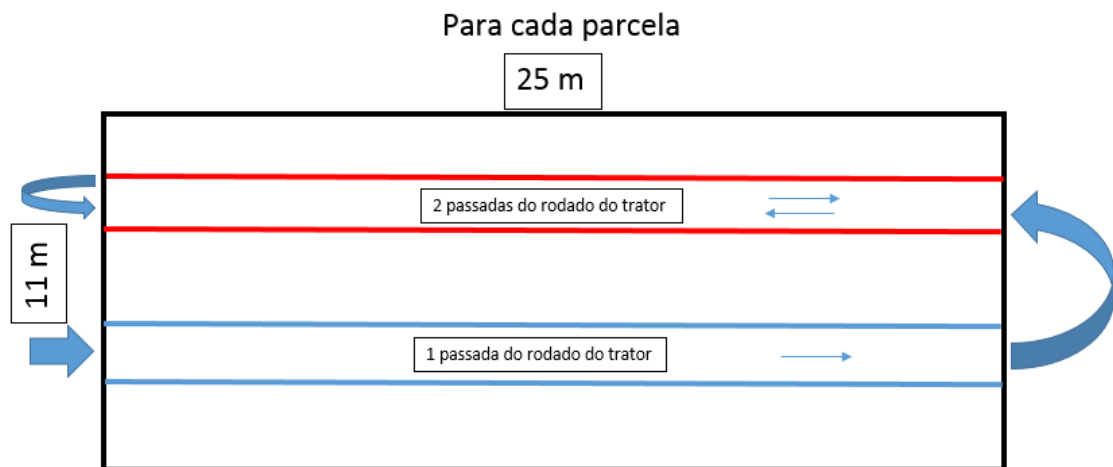


FIGURA 10. Divisão da parcela experimental.

Para cada variável, houve a necessidade de se adequar um esquema estatístico, sendo:

Para área mobilizada, o experimento foi avaliado em esquema fatorial $2 \times 4 \times 2$, sendo dois conjuntos de pneus (A1 e A2), as quatro relações peso/potência adquiridas a partir das condições de lastro: 49,6; 51,6; 53,1 e 56,5 kg cv^{-1} (B1, B2, B3 e B4, respectivamente), e o tráfego do trator caracterizado por uma e duas passadas do rodado (C1 e C2), constituindo assim 16 tratamentos.

Para resistência mecânica do solo à penetração (RMSP), o experimento foi estabelecido em esquema fatorial com parcelas subdivididas. Como tratamento temos: constituído por AB, sendo que são dois conjuntos de pneus (A1 e A2) e as quatro relações peso/potência adquiridas a partir das condições de lastro: 49,6; 51,6; 53,1 e 56,5 kg cv^{-1} (B1, B2, B3 e B4, respectivamente), duas subparcelas composta por uma e duas passadas do rodado (C1 e C2), e quatro sub-subparcelas as profundidades 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm (D1, D2, D3 e D4, respectivamente). Foi feita a análise de variância e regressão polinomial para efeito das profundidades (ponto médio na camada).

Para consumo de combustível, os dados foram avaliados em esquema fatorial 2×4 , sendo dois conjuntos de pneus (A1 e A2), as quatro relações peso/potência

adquiridas a partir das condições de lastro: 49,6; 51,6; 53,1 e 56,5 kg cv⁻¹ (B1, B2, B3 e B4, respectivamente).

3.8 Análise estatística

Os dados foram analisados pelo programa estatístico AgroEstat (BARBOSA E MALDONADO JUNIOR, 2015), submetidos ao teste normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk), em que não foram necessárias transformações dos dados pois se encontram dentro dos limites de significância ($p > 0,01$); assim, resultando em análises de variância pelo teste F e, quando significativos, aplicou-se o teste de Tukey à 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Para as interações entre tratamentos testou-se os modelos linear, quadrático e cúbico, foi escolhido para estudo o modelo de ajuste de regressão de maior expoente que apresentasse significância com base no teste F e melhor explicasse o comportamento da variável em função da profundidade.

Os mapas de isolinhas foram feitos a partir do software MINITAB 16®, que baseia-se nas coordenadas gravadas de cada ponto amostrado, fazendo a interpolação dos dados de RMSP de 200 pontos amostrados, pelo método do inverso do quadrado da distância (IDW), para estimar os valores das áreas não amostradas. A interpolação é calculada por algoritmo que utiliza a média ponderada do valor de RMSP pela distância dos n vizinhos de cada ponto, sendo o valor de n determinado na configuração do software, que no caso foi configurado para 4 vizinhos.

Por meio dos mapas interpolados é possível visualizar a distribuição espacial dos valores de RMSP medidos, permitindo fazer comparações visuais dos níveis de compactação de cada tratamento e de cada profundidade do perfil do solo amostrado.

A escala adotada para discussão é baseada nas indicações de ROQUE et al. (2003) e RIBEIRO (2010), em que os valores de RMSP são classificados como: baixo (0 a 2 MPa), médio (> 2 a 4 MPa), alto (>4 a 6 MPa) e muito alto (acima de 6 MPa), definida diante dos danos causados as raízes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da área mobilizada do solo avaliados em função da relação peso/potência, tipo de pneu e número de passadas são apresentados na Tabela 6.

TABELA 6. Valores médios do recalque dos pneus avaliados em função do conjunto de pneus (A), da relação peso/potência (B) e do número de passadas (C).

Fatores	Recalque		
	Área (cm ²)	Profundidade (cm)	Largura (cm)
Conjunto de pneus (A)			
1	432,24 b	6,07	55,16 b
2	559,39 a	6,76	63,13 a
Relação peso/potência (B)			
1	433,46	5,77	59,02
2	508,38	6,40	58,13
3	493,20	6,52	59,69
4	548,20	6,98	59,69
Passadas (C)			
1	453,63 b	5,74 b	58,37
2	537,99 a	7,09 a	59,38
Teste F			
A	15,07 **	1,98 NS	97,78**
B	2,11 NS	1,01 NS	0,84 NS
C	6,63 *	7,41 **	0,34 NS
A x B	3,08 *	3,22 *	1,84 NS
A x C	10,04 **	4,13 *	0,34 NS
B x C	3,24 *	1,08 NS	0,64 NS
A x B x C	0,44 NS	0,83 NS	2,24 NS
CV %	26,43	30,84	5,45

Médias para Teste F.^{NS}: não significativo; * significativo a 5%; ** significativo a 1%. Médias sem letras não diferem entre si pelo teste de Tukey para um nível de 5 % de probabilidade; CV: coeficiente de variação.

Os tratamentos diferiram entre o conjunto de pneus e o número de passadas, sendo que o pneu conjunto A1 obteve valores menores para área mobilizada e largura do recalque do que o conjunto de pneus A2. Neste caso, o fator que ocasionou a maior área deformada e largura do conjunto A2 foram as dimensões de largura dos pneus traseiro.

Desta forma, dada as características dos pneus traseiros, o pneu 710/70R38, do conjunto A2, é mais estável e menos flexível, suporta menores pressões de inflação por ser mais baixo e mais largo do que o pneu 650/85R38 do conjunto A1. Porém, no experimento realizado, os pneus trabalharam com pressões semelhantes consideradas baixas, não demonstrando assim as propriedades positivas do pneu 650/85R38 de flexibilidade. Contudo, o aumento na pressão de inflação do pneu aumenta a tensão vertical no solo, com consequentes incrementos na compactação do solo (FERNANDES et al., 2013; ALAKUKKU et al., 2003), enfatizando a importância de se utilizar a menor pressão de inflação possível para cada combinação de pneu e lastro no eixo do trator.

Foi observado que o aumento no número de passadas, tratamento C, implicou no aumento da área, o mesmo observaremos que aconteceu para os valores da RMSP, podendo indicar problemas de compactação do solo.

Observa-se que para efeito de conjunto de pneus x relação peso/potência (Tabela 6) que houve diferença entre pneus para as relações peso/potência B1 (51,6 kg cv⁻¹) e B4 (56 kg cv⁻¹), em que o conjunto A2 demonstrou maior área mobilizada.

Vale ressaltar que na relação 56 kg cv⁻¹ os pneus radiais utilizavam 75% de água nos pneus (Condição de uso pela usina). Para essa condição, na prática os pneus radiais perdem sua capacidade de radial e trabalham como se fossem pneus diagonais. Para tanto, MONTEIRO, LANÇAS E GUERRA (2011) comparando pneus radiais e diagonais, encontraram melhor desempenho do trator para a lastragem com 75% de água na relação peso/potência de 55,4 kg cv⁻¹, quando o trator estava equipado com pneus diagonais comparando com os radiais. Torna-se inviável a utilização de 75% de água nos pneus tanto economicamente ao comparar os preços dos pneus radiais com diagonais quanto em questão da vida útil dos mesmos.

TABELA 7. Desdobramento dos valores de área (cm²) para efeito do conjunto de pneus (A) dentro das relações peso/potência (B).

CONJUNTO DE PNEUS	RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA			
	B1	B2	B3	B4
A1	38,41 aA	37,11 bA	49,48 aA	47,89 bA
A2	48,28 aA	64,56 aA	49,15 aA	61,75 aA

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas e maiúsculas nas linhas diferem entre si pelo teste de Tukey para um nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 8 é apresentado o desdobramento do efeito dos pneus para cada passada dos rodados. Sendo que o P2 na segunda passada obteve maior área mobilizada quando comparada com o P1 e com a primeira passada, os resultados se assemelham com os encontrados por COUTO et al., (2013) que demonstraram que os maiores recalques foram obtidos para o tratamento cujo tráfego era mais intenso.

TABELA 8. Desdobramento dos valores de área (cm²) para efeito do conjunto de pneus (A) dentro do número de passadas (C).

CONJUNTO DE PNEUS	PASSADAS	
	C1	C2
A1	44,20 aA	42,25 bA
A2	46,53 aB	65,35aA

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas e maiúsculas nas linhas diferem entre si pelo teste de Tukey para um nível de 5% de probabilidade.

Para o desdobramento relação peso/potência x número de passadas dos rodados (Tabela 9), os dados mostraram que, apenas para o B3 (53,1 kg cv⁻¹), os valores de área mobilizada foram maiores para duas passadas do rodado devido ao efeito do tráfego.

TABELA 9. Desdobramento dos valores de área (cm²) para efeito Da relação peso/potência (B) dentro do número de passadas (C).

RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA	PASSADAS	
	C1	C2
B1	42,54 aA	44,14 aA
B2	52,25 aA	49,42 aA
B3	37,42 aB	61,21 aA
B4	49,23 aA	60,40 aA

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas e maiúsculas nas linhas diferem entre si pelo teste de Tukey para um nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 10 é apresentado o desdobramento dos valores de profundidade do recalque em relação ao efeito dos conjuntos de pneus e da relação peso/potência. Nota-se que apenas o tratamento B2 (Relação peso/potência 51,6 kg cv⁻¹) diferiu, sendo o conjunto A2 (pneus traseiros 710/70R38 e dianteiros 600/65R28) com maior profundidade de recalque. Para este tratamento, o resultado pode ter sido influenciado devido à maior diferença de calibração entre os conjuntos de pneus tiveram de acordo com a Tabela 4.

TABELA 10. Desdobramento dos valores de profundidade do recalque (cm) para efeito do conjunto de pneus (A) dentro da relação peso/potência (B).

CONJUNTO DE PNEUS	RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA			
	B1	B2	B3	B4
A1	5,67 aA	4,96 bA	7,22 aA	6,42 aA
A2	5,88 aA	7,83 aA	5,82 aA	7,53 aA

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas e maiúsculas nas linhas diferem entre si pelo teste de Tukey para um nível de 5% de probabilidade.

O desdobramento dos valores para profundidade do recalque para conjunto de pneus e passada dos rodados (Tabela 11), demonstra que A2 teve maior profundidade de recalque do que A1 na segunda passada, além de aumentar de uma para duas passadas do rodado.

TABELA 11. Desdobramento dos valores de profundidade do recalque (cm) para efeito do conjunto de pneus (A) dentro do número de passadas (C).

CONJUNTO DE PNEUS	PASSADAS	
	C1	C2
A1	5,90 aA	6,24 bA
A2	5,59 aB	7,94 aA

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas e maiúsculas nas linhas diferem entre si pelo teste de Tukey para um nível de 5% de probabilidade.

Para a variável resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) analisada a 40 cm de profundidade (Tabela 12), vemos que os tratamentos diferiram para o número de passadas e para profundidades. VASCONCELOS (2002) também verificou o efeito tráfego de máquinas e veículos de transbordo no aumento da densidade do solo até a profundidade de 40 cm.

TABELA 12. Valores médios de resistência mecânica do solo à penetração (MPa) em função do conjunto de pneus x relação peso/potência (AB), do número de passadas (C), e das profundidades (D).

Teste F	Resistência mecânica do solo à penetração (MPa)
AB	2,19 ^{NS}
C	6,17 *
D	459,42 **
AB x C	1,11 ^{NS}
AB x D	1,12 ^{NS}
C x D	4,08 **
AB x C x D	0,58 ^{NS}
CV% p/ parcelas	14,41
CV% p/ subparcelas	15,83
CV% p/ sub-subparcelas	9,43

Médias para Teste F.^{NS}: não significativo; * significativo a 5%; ** significativo a 1%; CV%: coeficiente de variação.

Desta forma, na Tabela 13 é apresentado o desdobramento do efeito número de passadas para cada profundidade avaliada. Baseando-se nas indicações de ROQUE et al. (2003) e RIBEIRO (2010), os valores foram considerados baixos.

Para o efeito profundidade dentro do número de passadas, foi significativo para uma e duas passadas, sendo a camada de D1 (0 a 10 cm) obteve a menor resistência mecânica do solo a penetração. Discordando dos resultados obtidos por LAMANDÉ & SCHJONNING (2011) que encontraram as maiores pressões na superfície do solo, atenuando para as demais profundidades devido à absorção das tensões pelas camadas superficiais do solo, demonstrando que, nas camadas superficiais do solo, a área de contato torna-se um fator importante e, nas camadas subsuperficiais, a carga no eixo é um fator que contribui para aumentar a compactação do solo.

TABELA 13. Desdobramento dos valores de resistência mecânica do solo à penetração (MPa) nas profundidades de 0-10 cm 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm (D1, D2, D3 e D4, respectivamente), demonstrando o efeito do número de passadas (C).

PASSADAS	Profundidades (cm)			
	D1	D2	D3	D4
C1	0,4141 aB	2,2864 bA	2,2290 aA	2,5380 aA
C2	0,4592 aC	2,9747 aA	2,4027 aB	2,6669 aAB

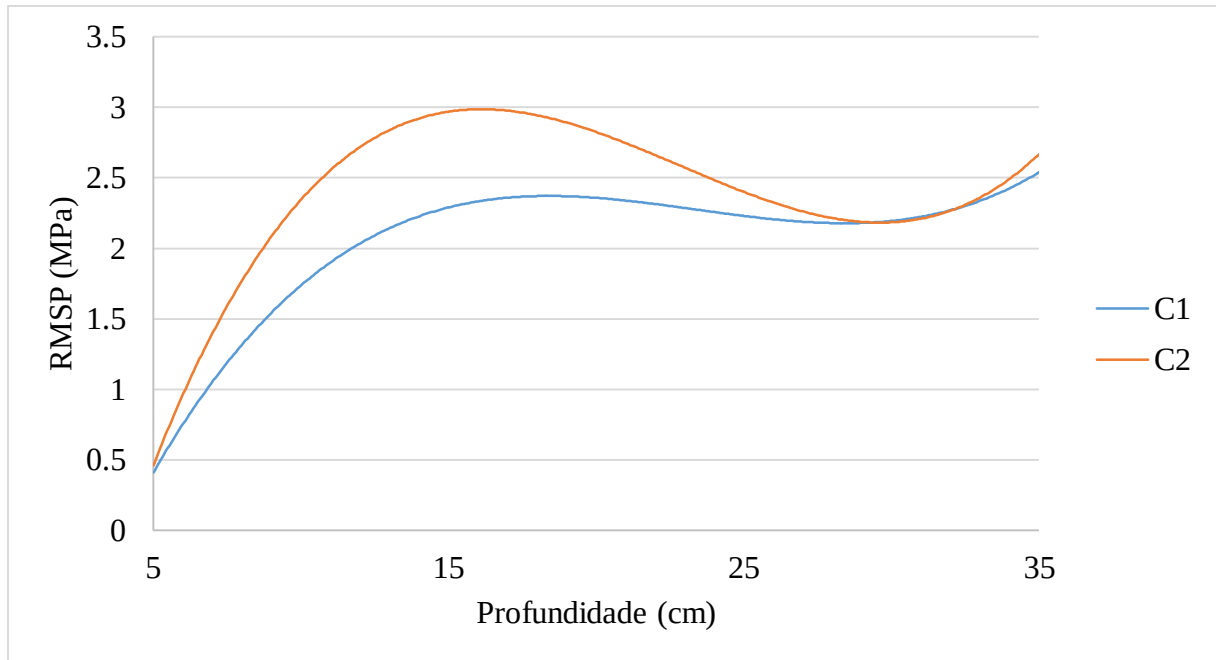
Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas e maiúsculas nas linhas diferem entre si pelo teste de Tukey para um nível de 5% de probabilidade.

Observa-se ainda que o efeito número de passada dentro de profundidade influenciou na profundidade de 10 a 20 cm, em que a segunda passada apresentou maior resistência mecânica do solo à penetração. Estes resultados de RMSP se assemelham com os obtidos por SOUZA (2017) em seu trabalho com pressão interna do pneu de um trator agrícola, em que houve diferença para a camada de 10-20 cm.

No entanto, nesta profundidade, pode ser também que já tinha a formação de uma compactada, segundo SPERA et al. (2000), nos Latossolos Roxos, de textura argilosa a muito argilosa, quando intensamente mecanizados, a estrutura do solo é danificada levando à redução da porosidade do solo e consequente formação de uma camada compactada, além do solo receber doses excessivas de calcário, o que pode provocar dispersão da argila que por sua vez irá obstruir os poros do solo.

Desta forma, procurou-se, com base no teste F, ajustar o modelo de regressão de maior grau que apresentasse significância e que explicasse o comportamento das pressões obtidas para a interação entre os fatores número de passadas (C) e profundidade (D). O modelo ajustado para os tratamentos foi o cúbico (Figura 10).

Pelas curvas da regressão é possível notar que na camada 10 a 20 cm, a primeira passada (Figura 11 C1) atinge valor próximo a 2 MPa e para a segunda passada (Figura 11 C2) essa resistência chega a 3 MPa. Esse efeito entre passadas foi observado por FREDDI et al. (2007) sobre o aumento expressivo dos valores de resistência à penetração em relação ao solo não trafegado para o tratamento com maior número de passadas do trator.



	F	R ²	Equação
C1	53,51**	1	$y = 0,0004x^3 - 0,027x^2 + 0,6034x - 1,9794$
C2	117,70**	1	$y = 0,0007x^3 - 0,0448x^2 + 0,9347x - 3,175$

FIGURA 11. Efeito das profundidades (D) dentro do número de passadas (C).

A partir de 10 cm de profundidade, para duas passadas, já se observa valores em torno de 2 MPa, considerado médio. Para uma passada, atinge 2 MPa aos 14 cm de profundidade e próximo a 2,5 até 20 cm de profundidade, nesta profundidade para duas passadas observa-se valores de 2,5 a 3 MPa. Porém, nesta análise nenhuma profundidade atingiu valores maiores que 4 MPa.

Nota-se que os pneus apresentaram comportamento parecido pela análise de variância e regressão, tendo uma média de 1,93 MPa para resistência pelo teste de médias, abaixo do nível considerado crítico de compactação.

A Figura 12 mostra a média entre os gráficos das relações peso/potência de cada pneu, tomando como base os resultados da análise de variância em que os tratamentos das condições de lastro não diferiram. No entanto, ao contrário das demais análises, notamos por meio da RMSP que a pressão exercida pelos pneus no solo chegou até 4 MPa na segunda passada dos rodados.

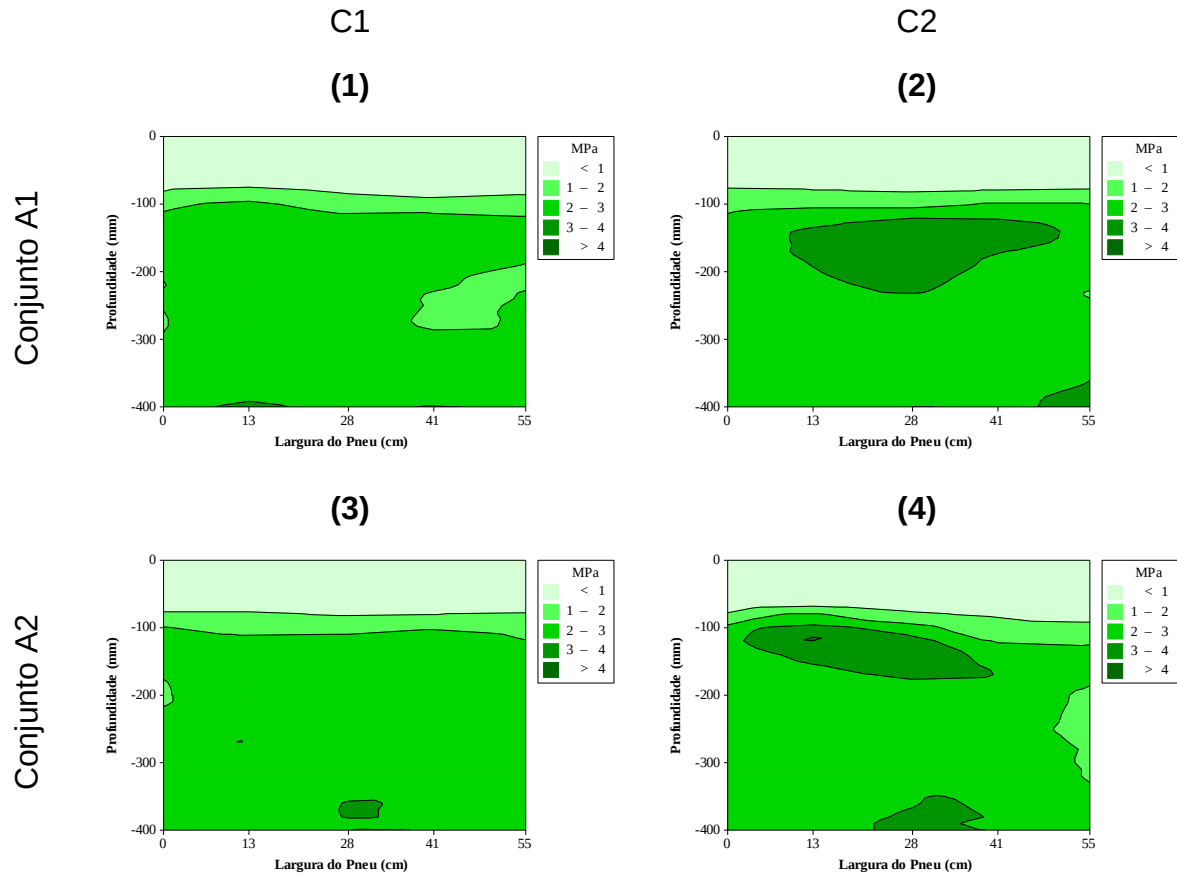


FIGURA 12. Mapas de isolinhas para os efeitos do Número de Passadas (C) e da Profundidade (D) em mm dentro do conjunto de pneus. (1) Conjunto de pneus A1 para 1 passada. (2) Conjunto de pneus A1 para 2 passadas. (3) Conjunto de pneus A2 para 1 passada. (4) Conjunto de pneus A2 para 2 passadas.

Observa-se ainda, que os valores de RMSP apresentados como resultados nos mapas de isolinhas foram semelhantes entre pneus, número de passadas e profundidade. Desta forma, as figuras 12 (1) e 12 (3) se assemelham, assim como as figuras 12 (2) e 12 (4) também se assemelham. Porém, é possível notar que as pressões na camada de 10 a 20 cm para o conjunto de pneus A1 ficaram mais concentradas na parte central da largura do pneu, enquanto que o Conjunto A2 ficaram mais distribuídas.

Ainda na camada de 10 a 20 cm, houve maior resistência mecânica do solo à penetração para duas passadas do rodado, assim como LIMA et al., (2013) e CAVALIERI et al. (2009) constataram maior concentração da pressão nas camadas a partir de 10 cm de profundidade, sob tráfego de máquinas agrícolas.

Observou-se também que de uma para duas passadas do rodado, os valores obtidos aumentaram, principalmente na região central dos pneus, na profundidade 10 a 20 cm, apresentando valores de resistência mecânica do solo à penetração de 3 a 4 MPa. Para tanto, LIMA et al., (2013) citam que para solos com alto teor de argila, valores acima de 2,5 MPa já podem causar impedimento ao desenvolvimento radicular.

ROQUE et al. (2003), no entanto, afirma que em solos não mobilizados anualmente, como é o caso da cana-de-açúcar, os valores médios entre 2 e 4 MPa não são impeditivos ao crescimento radicular, afirmando que são toleráveis valores até 4 MPa.

Para o aumento da RMSD encontrado na segunda passada dos dois pneus, RESENDE SILVA et al., (2011), observaram que o tráfego intensivo de máquinas é o principal responsável pelo aumento da densidade e resistência do solo. Sendo necessários maiores cuidados com o solo, tanto para tráfego como para equilíbrio operacional das máquinas utilizadas no preparo de solo até à colheita da cana-de-açúcar.

A Tabela 13, apresenta valores médios para consumo de combustível, em que os tratamentos não diferiram quanto ao conjunto de pneus e a relação peso/potência e apresentaram-se baixos, mostrando que as condições de lastro e pressão interna dos pneus foram bem adequadas para as condições do trabalho.

TABELA 14. Valores médios de Consumo de combustível, avaliados em função do conjunto de pneus (A) e da relação peso-potência (B).

FATORES	Consumo combustível (L h ⁻¹)
CONJUNTO DE PNEUS	
A1	19,83
A2	22,03
RELAÇÃO PESO/POTÊNCIA	
B1	21,98
B2	21,51
B3	21,57
B4	18,65
Teste F	
A	3,70 ^{NS}
B	1,78 ^{NS}
A x B	1,38 ^{NS}
CV %	15,47

Médias para Teste F. ^{NS}: não significativo; * significativo a 5%; ** significativo a 1%;

Médias sem letra não diferem entre si pelo teste de Tukey para um nível de 5 % de probabilidade; CV%: coeficiente de variação.

Os resultados podem estar relacionados também ao fato de o experimento ser conduzido utilizando TDA desligada e a resistência ao rolamento. Para NEUJAHR e SCHLOSSER, (2001) o consumo de combustível é uma função da potência exigida do motor, prova disso é a grande correlação que existe entre o parâmetro analisado e potência disponível na barra de tração, resistência ao rolamento do pneu e patinagem do rodado traseiro.

SPAGNOLO et al., (2012) observaram que utilizando-se lastragem adequada é possível minimizar os problemas com o aumento do consumo de combustível.

Em estudo sobre desempenho dos tratores com lastros, MONTEIRO, LANÇAS E GUERRA (2011), trabalhando com a TDA acionada, encontraram os menores valores de consumo horário de combustível obtidos para a lastragem com 40% de água na relação peso/potência de $45,4 \text{ kg cv}^{-1}$, quando o trator estava equipado com pneus radiais.

5. CONCLUSÕES

Os pneus e as relações peso/potência não interferiram na RMSP e no consumo de combustível.

A compactação do solo na primeira passada atua até 10 cm e na segunda interfere até 20 cm.

Os mapas de isolinhas da RMSP mostraram que o conjunto de pneus A2 distribuiu melhor a carga que o A1, enfatizando a importância da adequação dos tratores e seus equipamentos na redução da compactação do solo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; van der LINDEN, J. P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic induced subsoil compaction: a review: Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, v.73, p.145-160, 2003.

ALAPA- ASSOCIAÇÃO LATINO AMERICANA DOS FABRICANTES DE PNEUS, AROS E RODAS. Manual de normas técnicas. São Paulo, 2013. 40 p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE. General Terminology for Traction of Agricultural Traction and Transport Devices and Vehicles: ASAE S296.5. **ASAE Standards**. St. Joseph, 2003.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. Soil cone penetrometer: ASAE S 313.9. **ASAE Standards**. St. Joseph, 2009.

American Society of Agricultural Engineers - ASAE. Uniform terminology for traction of agricultural tractors, selfpropelled implements, and other traction and transport devices. S296.4 DEC95. **ASAE Standards**. St. Joseph, 1999. p.119-121.

ARSHAD, M.A. & MARTINS, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. **Agricultural, Ecosystems & Environmet**, v.88, p.153-160, 2002.

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

ASSOCIAÇÃO LATINO AMERICANA DOS FABRICANTES DE PNEUS, AROS E RODAS (ALAPA). Manual de normas técnicas. São Paulo, 2013. 61 p

BARBOSA, J. A.; VIEIRA, L. B.; DIAS, G. P.; DIAS JÚNIOR, M. D. S. Desempenho operacional de um trator agrícola equipado alternadamente com pneus radiais e diagonais. **Engenharia Agrícola**, v.25, p.474-480, 2005. ISSN 0100-6916.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação agronômica & AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos**. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda, 2015.

BERISSO, F. E.; SCHOJONNING, P.; LAMANDÉ, M.; WEISSKOPF, P.; STETTLER, M.; KELLER, T. Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. **Soil and Tillage Research**, v.131, p.36-46, 2013.

BERISSO, F. E.; SCHOJONNING, P.; LAMANDÉ, M.; WEISSKOPF, P.; STETTLER, M.; KELLER, T. Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. *Soil and Tillage Research*, v. 131, p. 36-46, 2013.

BONINI, A. K. **Compactação de um latossolo vermelho distrófico sob sistema de plantio direto e rendimento de grãos de trigo, soja e milho**. 2006. 111 f. Tese (Mestrado Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; OLIVEIRA, I. A.; BERGAMIM, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.8, p.305-310, 2013.

CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H.S. & AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.147-157, 2009.

CAVALIERI, K. M. V. **Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactação e qualidade física do solo**. 2007. 72 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2007.

COUTO, R. F.; REIS, E. F.; VIANA, P. M. F.; HOLTZ, V.; OLIVEIRA, L. A.; ALVES, S. M. F. Compactação e recalque superficial de um Latossolo Vermelho em condição de campo e laboratório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.11, p.1239-1245, 2013.

DISERENS, E. Calculating the contact area of trailer tyres in the field. **Soil Tillage Research**, v.103, p.302–309, 2009.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2009. 306 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, Embrapa, 2013. 353p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, 2006.

FEITOSA, J. R., FERNANDES, H. C., TEIXEIRA, M. M., CECOM, P. R. Influência da pressão interna dos pneus e velocidade de deslocamento nos parâmetros operacionais de um trator agrícola e nas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 1, 2016. FERNANDES, H. C.; LOPES, S. E.; LEITE, D. M.; MILAGRES, R. S.; SANTOS, L. N. Compactação do solo em função do tráfego de máquinas florestais. **Revista Agrotecnologia**, v.4, n.2, p.85-98, 2013.

FLORES, J.P.C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L.C.; CARVALHO, P.C.F.; LEITE, J.G.D.B. & FRAGA, T.I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.771-780, 2007.

FRANTZ, U. G. **Análise de desempenho em tração de rodado simples e duplo em um trator agrícola**. 2011. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Mecanização Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N., ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em latossolo vermelho: I - características de planta, solo e índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.793-803, 2009.

GABRIEL FILHO, A.; MONTEIRO, L. A.; GUERRA, S. P. S.; JESUÍNO, P. R. Influência da altura das garras dos pneus de um trator em área de plantio direto. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.10, p.1123-1128, 2010.

GOERING, C. E.; STONE, M. L.; SMITH, D. W.; TURNQUIST, P. K. Traction and transport devices. In: *Off-Road Vehicle Engineering Principles*. St. Joseph, Mich.; ASAE. Copyright American Society of Agricultural Engineers, 2003 (rev. Printing 2006). Cap. 13, p. 351-382.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

LAGUË, C.; AGNEW, J.; KHELIFI, M. Theoretical evaluation on the feasibility of controlled traffic farming using wide-span implements carriers for Canadian agriculture. In: **ANNUAL MEETING OF THE CSAE/SCGR**, 2003, p.03-233, 2003.

LAMANDÉ, M.; SCHJONNING, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part III: Effect of soil water content. **Soil Tillage Research**, v.114, n.2, p.78-85. 2011.

LANZANOVA, M. E., Eltz, F. L. F., NICOLOSO, R. D. S., Amado, T. J. C., Reinert, D. J., & ROCHA, M. D. Atributos físicos de um Argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.4, p.1333-1342, 2010

LIMA, R. P.; LEON, M. J.; SILVA, A. R. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. **Revista Ceres**, v.60, p.577-581, 2013.

LINARES, P.; MARQUEZ, L.; PINZON, R.; VASQUEZ, J. Comparison de neumaticos traseros radiales y convencionales para tractores agrícolas. **Rivista di Ingegneria Agraria**, v.2, p.96-106, 2006.

LOPES, A.; LANÇAS, K. P., SILVA, R. P. da; FURLANI, C. E. A; NAGAOKA, A. K.; REIS, G. N. dos Desempenho de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho. **Ciência Rural**, v.35, n.2, p. 366-370, 2005.

LYASKO, M. Multi-pass effect on off-road vehicle tractive performance. **Journal of Terramechanics**, v.47, n.5, p.275-294, 2010.

LYASKO, M.I. The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tire on a rigid surface. *Journal of Terramechanics*, v.31, n.4, p.239-246, 1994.

MÁRQUEZ, L. Especial pneus agrícolas. *Agri World*, Madrid, ESP, n. 1, p 2-6, out. / nov. 2010.

MÁRQUEZ, L. Solo Tractor '90. Madrid: Laboreo, 1990. 198p. (Apuntes didácticos).

MASIERO, F. C. **Determinação do rendimento na barra de tração de tratores agrícolas com tração dianteira auxiliar (4X2 TDA)**. 2010. 91f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2010.

MIALHE, L. G. O. estado da arte e perspectivas da utilização de rodados pneumáticos de baixa pressão na área agrícola. In: Encontro sobre Pneus de Alta Flutuação e Baixa Pressão nas Áreas Agrícola e Florestal, 1993, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 1993. p.1-17.

MIALHE, L.G. **Máquinas Agrícolas: ensaios & certificação**. Piracicaba, S.P.: Fundação de Estudos Agrários Luis de Queiroz. Ed. Shekinah Ltda, 1996. 722p.

MIALHE, L.G. Máquinas Motoras na Agricultura. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, v. 2, 1980. 366 p.

MINITAB. MINITAB Release 16: Meet MINITAB 16. MINITAB StatGuide; MINITAB Help. [S.l.]: Minitab., 2007.

MITAS. Agricultural Tires, Technical Databook 13 TH Edition. Czech Republic. 2013. 15 p.

MONTEIRO, L. A.; LANÇAS, K. P.; GABRIEL FILHO, A. Desempenho de um trator agrícola em função do tipo construtivo do pneu e da lastragem líquida em três velocidades de deslocamento na pista com superfície firme. **Energia na Agricultura**, v.24, n.1, p.68-84, 2009.

MONTEIRO, L. de A.; LANÇAS, KLÉBER P.; GUERRA, SAULO PS. Desempenho de um trator agrícola equipado com pneus radiais e diagonais com três níveis de lastros líquidos. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.3, p.551-560, 2011.

MONTEIRO, L.A., MASIERO, F.C., LANÇAS, K.P., GUERRA, S.P.S., JESUS, M.G. Avaliação de pneus para carretas transbordo em tanque de solo. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v.17, n.1, p.7-16, 2010.

MORAES, M. T.; DEBIASE, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Soil penetration resistance in a rhodic eutrudox affected by machinery traffic and soil watre contente. *Engenharia Agrícola*, v. 33, n. 4. p. 748-757, 2013.

NAGAOKA, A. K.; LANÇAS, K. P.; CASTRO NETO, P.; LOPES, A.; GUERRA, S. P. S. Resistência do solo à penetração após o tráfego com dois tipos de pneus utilizando-se um equipamento para ensaio dinâmico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.387-393, 2003

NAGAOKA, A. K.; LANÇAS, K. P.; CASTRO NETO, P.; LOPES, A.; GUERRA, S. P. S. Projeto, construção e avaliação de um equipamento para ensaio dinâmico de pneu agrícola individual. **Engenharia Agrícola**, 2002.

NEUJAHR, E. B.; SCHLOSSER, J. F. Comportamento de pneus agrícolas radiais e diagonais em relação à tração. **Engenharia Agrícola**, v.21, n.2, p.180-189, 2001. OLIVEIRA FILHO, F.; MIRANDA, N.O.; MEDEIROS, J.F.; SILVA, P.C.M.; MESQUITA, F.O.; COSTA, T.K.G. Zona de manejo parágrafo preparo do Solo na cultura da cana de açúcar. **Revista Agriambi**, 2015; v. 19, n. 2, 2015.

PIRES, B. S. **Capacidade de suporte de carga e resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob pastagens ao longo do tempo**. 2012. 113f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo – Recursos Ambientais e Uso da Terra). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2012.

RESENDE SILVA, A.; DIAS JUNIOR, M.S; LEITE, F.P. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Árvore**, v.35, p.547-554, 2011.

RIBEIRO, Carlos Augusto. **Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em áreas mecanizadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*)**. 2010. xiv, 69 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/88329>>. ROQUE, A. A. O.; de Souza, Z. M.; Ronny Sobreira Barbosa, R. S.; de Souza, G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.7, p.744-750, 2010.

ROQUE, C. G.; CENTURION, J. F.; ALENCAR, G. V.; BEUTLER, A. N.; PEREIRA, G. T.; ANDRIOLI, I. Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Acta Scientiarum**, v.25, p. 53-57, 2003.

SCHLOSSER, J. F., DEBIASI, H., WILLES, J. A., DIAS DA C MACHADO, O. Análise comparativa do peso específico dos tratores agrícolas fabricados no Brasil e seus efeitos sobre a seleção e uso. **Ciência Rural**, v.35, n.1, jan-fev, 2005.

SEVERIANO, E. da C.; OLIVEIRA, G. C. de; DIAS JÚNIOR, M. de S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M. B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1419-1427, 2008.

SILVEIRA, D.C.; MELO FILHO, J.F.; SACRAMENTO, J.A.A.S. & SILVEIRA, E.C.P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo

distrocoeso no Recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.659-667, 2010.

SMERDA, T.; CUPERA, J. Tire inflation and its influence on drawbar characteristics and performance - Energetic indicators of a tractor set. **Journal of Terramechanics**, v.47, n.6, p.395-400, 2010.

SOUZA, L. C. D. **Relação massa/potência e pressão interna do pneu de um trator agrícola**. 2017. 48f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2017.

SOUZA, Z. M. de; PRADO, R. de M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.3, p.271-278, 2005.

SPAGNOLO, R. T.; VOLPATO, C. E. S.; BARBOSA, J. A.; PALMA, M. A. Z.; BARROS, M. M. Fuel consumption of a tractor in function of wear, of ballasting and tire inflation pressure. **Engenharia Agrícola**, v.32, n.1, p.131-139, 2012.

SPERA, T. S.; ADRIANA REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SILVA, J. C. S. Características físicas de um latossolo vermelho-escuro no cerrado de planaltina, df, submetido à ação do fogo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.9, p.1817-1824, 2000.

TAVARES FILHO, J., BARBOSA, G. M. C., GUIMARÃES, M. F., & FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.3, p.725-730, 2001.

TOLEDO, A.; RIBEIRO, C. A.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P. Penetrógrafo eletrônico automático acoplado a quadriciclo para aplicação em agricultura de precisão. In: VII Congresso Brasileiro de Agroinformática, 2009, Viçosa - MG. **Anais....** Lavras - MG: SBI Agro, 2009. v.1., p.1-6.

TOLON-BECERRA, A.; LASTRA-BRAVO, X. B.; BOTTA, G. F.; TOURN, M.; LINARES, P.; RESSIA, M.; BALBUENA, R. Traffic effect on soil compaction and yields of wheat in Spain. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.9, n.2, p.395-403, 2011.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; GONÇALVES, A.C.A. & FOLEGATTI, M.V. Intervalo ótimo de potencial da água do solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, p.286-292, 1999.

TRELLEBORG. **Agricultural tyres manual**. 2013. 49p.

VASCONCELOS, A.C.M. **Desenvolvimento do sistema radicular da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 2002. 140f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. **Soil Science Society American Journal**, v.47, p.129-133, 1983.

ZOZ, F., GRISSO, R.D. Traction and tractor performance. St Joseph: Asae. 2003. 46p.