

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS
UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CIÊNCIAS
EXATAS E TECNOLÓGICAS
MESTRADO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**Desempenho operacional e propriedades físico-mecânicas de
um Latossolo em função do tipo de pneu e cargas aplicadas à
barra de tração**

Elson de Jesus Antunes Júnior

Anápolis
2016

DESEMPENHO OPERACIONAL E PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE UM LATOSSOLO EM FUNÇÃO DO TIPO DE PNEU E CARGAS APLICADAS À BARRA DE TRAÇÃO

ELSON DE JESUS ANTUNES JÚNIOR

Orientador: Professor D.Sc. Elton Fialho dos Reis

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás – UEG, Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas de Anápolis como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Sistemas Agroindustriais, para obtenção do título de MESTRE.

Anápolis
2016

Antunes Júnior, Elson de Jesus.

Desempenho operacional e propriedades físico-mecânicas de um Latossolo em função do tipo de pneu e cargas aplicadas à barra de tração – 2016.

69 f. il.

Orientador: Prof. DSc. Elton Fialho dos Reis.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Goiás. Mestrado *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, 2016.

Bibliografia.

1. Compactação do solo.
 2. Modelagem analítica.
 3. Preconsolidação.
 4. Consumo de combustível.
- I. Título.

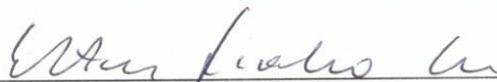
**DESEMPENHO OPERACIONAL E PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE UM
LATOSSOLO EM FUNÇÃO DO TIPO DE PNEU E CARGAS APLICADAS À BARRA
DE TRACÇÃO**

Por

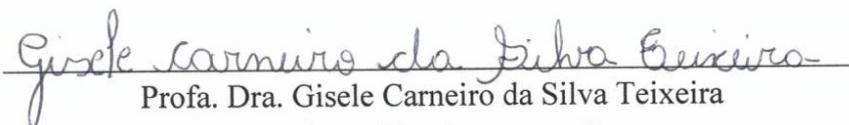
Elson de Jesus Antunes Júnior

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Aprovado em 26/02/2016



Prof. Dr. Elton Fialho dos Reis
Orientador
UEG/CCET



Profa. Dra. Gisele Carneiro da Silva Teixeira
Membro
UEG/CCET



Prof. Dr. Ariel Muncio Compagnon
Membro
IFG/CAMPUS CERES

Ao meu Deus
A meus queridos pais

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por todas as conquistas até então alcançadas e, por tudo que Ele prepara em nossas vidas.

Agradecimento mais que especial à minha família, que todo apoio me deram nessa batalha que perdurou longos anos. Meus pais, meu irmão e meus sobrinhos são tudo que uma pessoa pode desejar em sua vida.

Ao meu orientador, professor Elton Fialho dos Reis, por toda paciência, confiança, amizade e conselhos nos momentos difíceis neste período.

A todos que me ajudaram em orações durante os momentos de dificuldade.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente durante este período.

A EMATER-GO por disponibilizar a área experimental, o trator de frenagem e o operador de máquinas (Sr. Valdecir).

Aos colegas que não mediram esforços em ajudar nas coletas de campo: Danilo Gomes, Marcos Paulo, Philip, Felipe, Paula, Pâmella e todos os outros que me ajudaram.

Aos meus amigos Beethoven Gabriel e Danilo Gomes pela ajuda durante os experimentos, pela amizade e convivência durante esses anos.

Agradecimento especial ao Sr. Waldeir Costa que ajudou com suas ideias e no desenvolvimento de equipamentos que auxiliaram muito durante a pesquisa.

Agradeço a Pâmella Melo, Carol Sena, Kari Katiele pela amizade e convivência durante esses anos.

A secretária da pós-graduação Eliete Fernandes por estar sempre nos auxiliando e lembrando os prazos.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas da pós-graduação.

A todos, meu muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. O PNEU NA AGRICULTURA	2
2.2. DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO OPERACIONAL	5
2.3. SOLO DO CERRADO E SEU ESTADO DE COMPACTAÇÃO	7
2.4. INDICATIVOS DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO	8
2.4.1. Propriedades físicas do solo	8
2.4.2. Propriedades hídricas do solo	11
2.4.3. Propriedades mecânicas do solo	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1. ÁREA EXPERIMENTAL	18
3.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ANTES DO EXPERIMENTO EM CAMPO	18
3.2.1. Análises físicas	18
3.2.2. Curva de retenção de água no solo	19
3.2.3. Modelagem da resistência do solo à penetração	19
3.2.4. Modelagem da capacidade de suporte de carga	20
3.3. MAQUINÁRIO UTILIZADO	21
3.3.1. Tratores	21
3.3.2. Pneus	22
3.3.3. Determinação da força na barra de tração	23
3.3.4. Fluxômetro	24
3.4. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	25
3.5. EXPERIMENTO EM CAMPO	25
3.5.1. Amostragem do solo	25
3.5.2. Mensuração do desempenho operacional	26
3.6. ANÁLISES EM LABORATÓRIO	26
3.6.1. Análises do solo	26
3.6.2. Avaliação do desempenho operacional	27
3.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1. FÍSICA DO SOLO	29
4.2. DESEMPENHO OPERACIONAL	39
5. CONCLUSÕES	45
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Caracterização física e mecânica do Latossolo Vermelho sob plantio direto	21
TABELA 2 - Caracterização do pneu radial e diagonal utilizado no experimento	22
TABELA 3 - Resumo da análise de variância das variáveis expressa pelo quadrado médio da densidade do solo (D_s , $Mg\ m^{-3}$), grau de compactação (GC, %), resistência do solo à penetração (RP, kPa) e pressão de preconsolidação (σ_p , kPa)	29
TABELA 4 - Resumo da análise de variância das variáveis expressa pelo quadrado médio da potência média na barra de tração (kW), patinação (%), consumo horário ($L\ h^{-1}$) e consumo específico ($g\ kW\ h^{-1}$)	39

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Estrutura de pneus agrícolas de tração diagonal (A) e radial (B)	3
FIGURA 2. Trator de ensaio e trator de frenagem utilizado no ensaio de campo	22
FIGURA 3. Perfil do pneu radial (A) e diagonal (B).....	23
FIGURA 4. Suporte e célula de carga utilizada entre os tratores para determinar a carga aplicada à barra de tração	23
FIGURA 5. Curva de calibração da célula de carga em laboratório com uso do sistema de aquisição com placa Arduino.....	24
FIGURA 6. Esquema de instalação do fluxômetro utilizado no trator de ensaio.....	24
FIGURA 7. Croqui da área experimental, com a localização das 40 unidades experimentais.....	25
FIGURA 8. Curva de retenção de água no solo para o pneu diagonal (A) e radial (B) nas diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.	31
FIGURA 9. Curva da resistência do solo à penetração (kPa) em função da umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$).	33
FIGURA 10. Resistência do solo à penetração (kPa) para os diferentes tipos de pneu e diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.....	34
FIGURA 11. Modelagem da capacidade de suporte de carga da área experimental.	35
FIGURA 12. Pressão de preconsolidação (kPa) para os diferentes tipos de pneu e diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.	37
FIGURA 13. Potência média na barra de tração (kW) para os diferentes tipos de pneu e diferentes cargas impostas pelo trator de frenagem.....	40
FIGURA 14. Patinação dos rodados motrizes traseiros (%) para os dois tipos de pneu e diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.	41
FIGURA 15. Consumo de combustível horário ($L\ h^{-1}$) para os diferentes tipos de pneu e diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.	43
FIGURA 16. Consumo específico de combustível ($g\ kW\ h^{-1}$) para os diferentes tipos de pneu e diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.	44

DESEMPENHO OPERACIONAL E PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE UM LATOSSOLO EM FUNÇÃO DO TIPO DE PNEU E CARGAS APLICADAS À BARRA DE TRAÇÃO

RESUMO

As modificações nas propriedades físico-mecânicas do solo, decorrentes do tráfego de máquinas nas operações agrícolas, têm sido amplamente estudadas, ressaltando-se os efeitos negativos da compactação do solo sobre a produtividade das culturas. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho operacional e propriedades físico-mecânicas de um Latossolo em função do tipo de pneu e cargas aplicadas à barra de tração. Antes dos ensaios serem realizados na área experimental foi construída a curva de correção da resistência do solo à penetração (RP) *versus* o teor de água no solo, a curva de retenção de água no solo (CRA) e a modelagem da capacidade de suporte de carga (CSC). Na condução do experimento foi adotado o delineamento em blocos ao acaso no esquema de parcelas subdivididas, no esquema fatorial 2x5, onde as parcelas foram constituídas de dois tipos de estrutura de pneus: radial e diagonal, e as subparcelas foram cinco cargas médias impostas à barra de tração do trator por um trator de frenagem (0; 4,32; 9,80; 12,48 e 16,69 kN) com quatro repetições por tratamento, totalizando 40 unidades experimentais. Para avaliar a influência dos tipos de rodados nas características físico-mecânicas do solo foi avaliada na profundidade de 0-0,05 m a densidade do solo, grau de compactação, CRA e pressão de preconsolidação, e na profundidade de 0-0,15 m foi avaliada a RP. O desempenho operacional do conjunto (cargas-pneu) foi avaliado pela potência média na barra de tração, patinagem das rodas motrizes, consumos horário e específico de combustível. Os resultados das análises físico-mecânicas demonstraram que ambos os pneus e forças aplicadas à barra de tração não ocasionaram compactação adicional ao solo. Ocorreu uma variação média de 4% e de 3,7% na densidade do solo e grau de compactação, respectivamente, para ambos os pneus e cargas aplicadas à barra de tração em comparação aos valores antes do tráfego do trator de ensaio. A CRA não alterou quando o trator ensaiado utilizava o pneu radial em todas as cargas, quanto ao pneu diagonal na carga 0 kN houve uma redução não significativa dos macroporos e microporos, e as cargas mais elevadas não ocasionaram alterações na mesma. Os valores da RP mantiveram-se abaixo do valor encontrado na umidade da capacidade de campo, ou seja, não houve alteração na mesma para ambos os pneus e cargas aplicadas à barra de tração. Os resultados da pressão de preconsolidação para todos os tratamentos mantiveram-se na “região b” da CSC, caracterizada por não fornecer compactação adicional ao solo. O pneu diagonal proporcionou maior potência média na barra de tração quando comparado ao pneu radial, no entanto, a patinagem e os consumos horário e específico de combustível foram maiores para o pneu radial que o diagonal. Pode-se concluir que ambos os pneus e forças aplicadas à barra de tração não ocasionaram compactação adicional ao solo; o pneu diagonal apresentou melhor desempenho operacional quando comparado ao radial.

Palavras-Chave: compactação do solo, modelagem analítica, preconsolidação, consumo de combustível

OPERATIONAL PERFORMANCE AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF AN OXISOL AS FUNCTION ON THE TYPE OF TIRE AND LOADS APPLIED TO THE TRACTION BAR

ABSTRACT

The changes of soil physical-mechanical properties, arising from the traffic of machines in farming operations, have been widely studied, emphasizing the negative effects of soil compaction on crop productivity. This work aimed to evaluate the operational performance and physical-mechanical properties of an Oxisol as function on the type of tire and loads applied to the traction bar. Before the tests had been carried out in the experimental area was built the correction curve of the soil penetration resistance (PR) *versus* soil water content, the soil water retention curve (WR) and the modeling of load support capacity of the soil (LSC). In conducting the experiment was adopted the design in random blocks of plots subdivided, in factorial designs 2x5, where the plots were made up of two types of tire structure: radial and bias, and the subplots were five average loads imposed on the traction bar of the tractor by a braking tractor (0; 4.32; 9.80; 12.48 and 16.69 kN) with four repetitions per treatment in a total of 40 experimental units. To evaluate the influence of the kind of tires in the physical-mechanical characteristics of the soil was evaluated in depth of 0-0.05 m soil density, degree of compaction, WR and preconsolidation pressure, and at the depth of 0-0.15 m was assessed the PR. The operational performance in the set (loads-tire) was assessed by the average power in traction bar, wheel slip, consumptions per hour and specific of fuel. The results of the physical-mechanical analysis demonstrated that both tires and forces applied to the traction bar not caused additional compaction to the soil. There was an average increase of 4% and 3.7% in soil density and degree of compression, respectively, for both tires and loads applied to the traction compared to the values before the test with tractor traffic. The WR did not change when the tractor tested used the radial tire on all loads, about the bias tire in the load 0 kN there was a reduction no significant of macropores and micropores, and higher loadings did not cause changes in it. The PR values remained below the value found in the humidity of the field capacity, that is, there was no change in the same for both tires and loads applied to the traction bar. The results of the preconsolidation pressure for all treatments remained on "region b" of the LSC, characterized by not providing additional compression to the soil. The bias tire provided greater average power in traction bar when compared to radial tire, however, the wheel slip, consumptions per hour and specific of fuel were higher for the radial tire than the bias tire. It can be concluded that both tires and loads applied to the traction bar not caused additional compression to the soil; the bias tire presented better operational performance compared to radial tire.

Keywords: soil compaction, analytical modeling, preconsolidation, fuel consumption

1. INTRODUÇÃO

No início da década de 30 surgiram nos Estados Unidos os rodados pneumáticos do tipo diagonal (convencional), pois até então, os tratores eram dotados de rodas metálicas. Com o avanço tecnológico, na década de 40 foram desenvolvidos os rodados pneumáticos de construção radial. Dentre as funções dos rodados pneumáticos dos tratores estão: garantir o equilíbrio, o direcionamento, o deslocamento o amortecimento entre as irregularidades do solo e o desempenho operacional.

A principal função de um trator agrícola é realizar força de tração. E esta é transferida por meio dos rodados. Relatos literários indicam que cerca de 20-55% da energia disponível do trator é desperdiçada na interface solo-máquina. Esta energia gasta os pneus e comprime o solo a um grau que pode ser prejudicial para à produção das culturas.

Quando os tratores são ensaiados em solos agrícolas permite-se determinar o desempenho de tração, bem como o desempenho dos rodados na interface solo-pneu. Os rodados pneumáticos aplicam cargas dinâmicas que produzem tensões em superfície e profundidade. Quando quantificadas as tensões que o solo está sujeito, pode-se avaliar a ocorrência de mudanças físicas na sua estrutura, ou seja, estimar-se o processo de compactação do mesmo.

Para identificar a compactação do solo às propriedades físico-mecânicas mais utilizadas têm sido a densidade do solo, porosidade total, tamanho e continuidade dos poros, pressão crítica na qual os agregados sofrem cisalhamento, resistência do solo à penetração e a pressão de preconsolidação. Dentre estes atributos físicos do solo, o único que é capaz de quantificar as pressões que podem ser aplicadas aos solos sem que haja compactação adicional é a pressão de preconsolidação.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho operacional e propriedades físico-mecânicas de um Latossolo em função do tipo de pneu e cargas aplicadas à barra de tração.

As propriedades físicas e mecânicas consideradas foram: densidade do solo, grau de compactação, curva de retenção de água no solo, resistência do solo à penetração e pressão de preconsolidação. As variáveis de desempenho operacional avaliadas foram: potência média na barra de tração, patinagem, consumos horário e específico de combustível.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O PNEU NA AGRICULTURA

Os primeiros tratores agrícolas utilizavam rodas metálicas, porém dotadas de garras, que serviam como elementos de locomoção. Com a conseqüente diminuição das cargas dinâmicas, o comportamento das rodas teve melhoria mais significativa, convertendo-a em verdadeiro ponto de apoio da mecanização agrícola (BARBOSA et al., 2005).

No ano de 1932 apareciam nos Estados Unidos os primeiros rodados pneumáticos para tratores, pois até então, estes eram equipados com rodas metálicas que apresentavam uma elevada capacidade de tração. Os rodados pneumáticos foram adotados por possuírem grande dimensão e alta resistência, de modo que constituíam uma grande superfície de contato e capacidade de tração igual ao rodado metálico (ORTIZ-CAÑAVATE, 2012).

Os rodados pneumáticos de um trator agrícola possuem diversas funções importantes, tais como: garantir o equilíbrio, o deslocamento, o direcionamento, o desempenho operacional e o amortecimento entre as irregularidades do solo e o trator. Os resultados de desempenho operacional do trator são influenciados pelo tipo de construção, pela pressão de insuflagem, pela carga aplicada, tipo de dispositivo de tração e desgaste dos rodados pneumáticos (MONTEIRO et al., 2011).

Os pneus utilizados em tratores e máquinas agrícolas devem suportar, com segurança, o peso do trator ou da máquina em condição estática e dinâmica, agir como um sistema de amortecimento dos impactos provocados pelas irregularidades do solo, além de garantir, com eficiência, a transmissão das forças motrizes e frenantes do trator ao solo e vice-versa (MIALHE, 1980).

A escolha do pneu adequado para as rodas motrizes de um trator agrícola não deve abranger simplesmente suas três funções principais: suportar carga vertical nos eixos, transmitir potência e produzir força de tração. O problema é mais complexo, pois o trator trabalha em solos que podem apresentar características diferentes. O uso de pneus específicos para determinado tipo de superfície de rolamento permitiria aumentar seu desempenho operacional. No entanto, a variedade dos solos agrícolas é o fator que dificulta o projeto de componentes de tração que funcionem satisfatoriamente em qualquer situação (BARGER et al., 1963).

Segundo a Associação Brasileira de Pneus e Aros (1994), existem três tipos distintos de configuração estrutural de pneus agrícolas de tração: diagonal, radial (Figura 1) e baixa pressão e alta flutuação (BPAF).

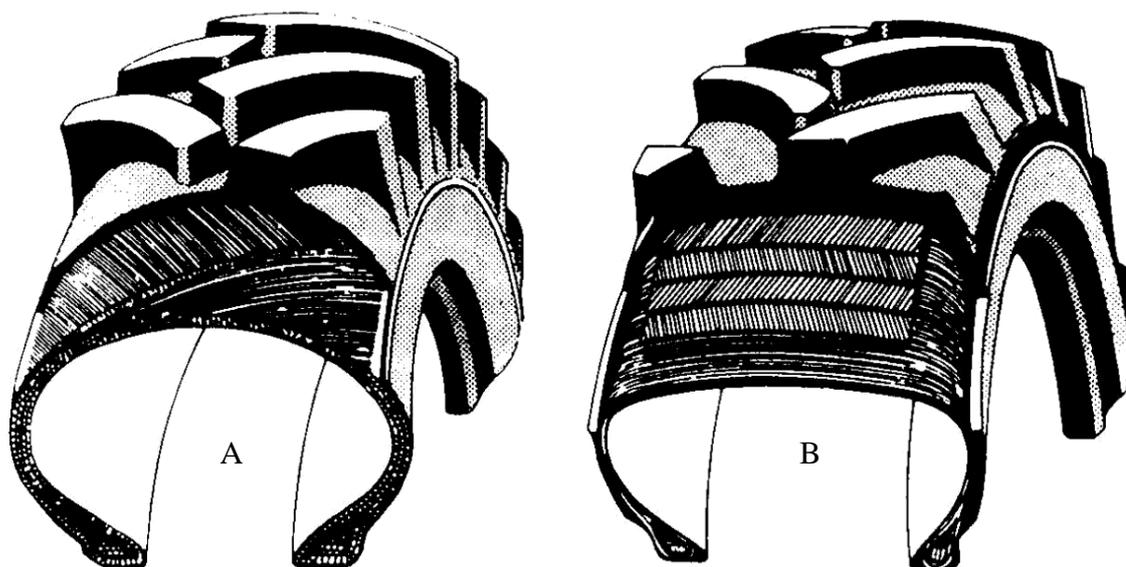


FIGURA 1. Estrutura de pneus agrícolas de tração diagonal (A) e radial (B).
Fonte: Ortiz-Cañavate (2012).

De acordo com Santos (2002), os pneus diagonais são caracterizados por terem uma armação constituída por várias telas, sempre em número par, cujos fios vão de um talão ao outro, formando ângulos de 30-45° em relação ao plano médio do pneu, o que provoca, quando sujeito a grande flexão, a uma fadiga da armação. Estes pneus apresentam, assim, a mesma espessura de armação, quer no topo quer nos flancos, tendo, no entanto, junto à faixa de rolamento um reforço constituído por uma ou mais camadas com fios que formam entre si ângulos inferiores ao dos fios das telas da carcaça. Esta proteção permite, igualmente, conferir uma forma menos arredondada ao pneu, o que possibilita um acréscimo da área de contato com o solo e conseqüentemente maior aderência.

Santos (2002) relata que os pneus radiais são caracterizados por terem as telas sobrepostas, mas sem se cruzarem, ficando os fios dispostos em arcos paralelos entre si e perpendicularmente ao plano médio dos pneus. Assim, estes pneus têm as telas da armação praticamente inextensíveis sendo estabilizadas transversalmente por uma cintura com várias camadas, cujos fios formam ângulos de 20-25°, com o sentido de deslocamento, o que permite uma superfície de contato com o solo bastante grande.

A capacidade de tração e fornecimento de potência suficiente para desempenhar a maioria das operações necessárias na agricultura, depende, em parte, do tipo de dispositivo de tração. Nos casos em que esses dispositivos são pneumáticos, o tamanho, a pressão de insuflagem, a carga aplicada sobre o eixo motriz, a transferência de peso, entre outros, interferem na capacidade de tração do trator (NAGAOKA et al., 2002; ZOZ e GRISSO, 2003).

Outro fator que interfere na capacidade de tração é a altura das garras, que é especialmente importante para a força de tração que o trator pode desenvolver em solos pouco consistentes, pois, quanto maior for o seu enterramento, maior é essa força. Esta depende, entre outros fatores, do volume de solo deslocado; em pisos rígidos, o desgaste das garras permite uma maior superfície de contato e conseqüentemente maior aderência aumentando a força de tração. As garras altas têm, também, maior tendência para se danificarem, perdendo pedaços de borracha, e, sendo mais flexíveis, gastam-se mais depressa. As garras altas conduzem a uma maior resistência ao rolamento, com a conseqüente redução de potência (SANTOS, 2002).

A pressão de insuflagem incorreta é o fator que mais contribui para o desenvolvimento de avarias e desgaste prematuro dos pneus agrícolas. A sobrecarga – peso além do especificado para cada pneu – e a pressão de insuflagem abaixo da recomendada ocasionam uma flexão maior das laterais, fazendo com que a banda de rodagem tenha um desgaste prematuro e não uniforme, podendo ocorrer também rachaduras na parte superior da parede lateral do pneu ou torção das paredes, gerando um deslizamento do pneu sobre o aro, com a conseqüente quebra da válvula e dilaceração da câmara de ar. O oposto, a pressão acima da indicada, provoca flexão deficiente da banda de rodagem, ocasionando um aumento no desgaste na faixa central do pneu. Além disso, a área de contato do pneu com o solo diminui, ocorrendo perda na tração, aumento de patinagem e consumo de combustível (SILVEIRA, 1988).

Vários estudos e experimentos têm sido efetuados a fim de melhor conhecer as características dos pneus agrícolas, principalmente no estudo da interação pneu-solo que está relacionada com o desempenho dos tratores (MAZETTO et al., 2004).

Wulfsohn et al. (1988) estudando um solo Californiano concluíram que os pneus radiais obtiveram melhores resultados de desempenho operacional quando comparados aos diagonais, e que quanto maior as dimensões dos pneus melhor será a sua interação com o solo agrícola. Relataram ainda que o pneu radial mais largo resultou em uma eficiência de tração

média de 27,23% contra 25,37% para o pneu diagonal mais largo, na faixa de patinagem de 0-30%; ocasionando um aumento de 6,80% na mesma.

Corrêa et al. (1995) avaliando o desempenho de pneus radiais e diagonais em tratores agrícolas, utilizando os pneus de dimensões 18.4-34. Observaram melhor desempenho do pneu radial para baixos valores de patinagem (valores inferiores a 15%) para as duas condições de campo. Em valores de patinagem superiores a 15%, não houve diferença entre os dois tipos de pneus com relação aos parâmetros de desempenho utilizados.

Neujahr e Schlosser (2001) avaliando pneus agrícolas radiais e diagonais a campo, com base em análise de tração, concluíram que os pneus radiais apresentam menor resistência ao rolamento, principalmente em velocidades maiores, menores índices de patinagem quando comparados aos pneus diagonais submetidos à mesma força de tração, menor consumo de combustível quando submetidos a forças de tração maiores que 20 kN, maior coeficiente dinâmico de tração e melhor desempenho em tração dentro dos limites de alta eficiência, ou seja, entre 5 e 20% de patinagem.

Barbosa et al. (2005) compararam o desempenho operacional de um trator agrícola equipado alternadamente com pneus radiais e diagonais. Em suas avaliações o uso de pneus radiais proporcionou incrementos nos valores de capacidade de tração e potência na barra, diminuição nos valores de consumo específico de combustível e não causou variações no consumo horário de combustível.

Monteiro et al. (2011) compararam o desempenho de um trator equipado com pneus radiais e diagonais para três condições de lastragem líquida (0%, 40% e 75%). Verificaram que o melhor desempenho do trator, equipado com pneu diagonal, ocorreu na condição de 75% de água nos pneus, apresentando maior velocidade de deslocamento, menor patinagem do trator, menor consumo horário de combustível e gerando maior potência na barra de tração. Com pneus radiais, o melhor desempenho do trator ocorreu na condição de 40% de água nos pneus, proporcionando maior velocidade de deslocamento do trator, menor patinagens, menor consumo horário e específico de combustível, e maior potência e rendimento na barra de tração.

2.2. DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO OPERACIONAL

A fim de determinar o desempenho de tração, os tratores são ensaiados em solos agrícolas (MONTEIRO et al., 2013). Ensaio com aplicação de carga dinâmica visa obter

informações sobre o desempenho dos rodados na interface solo-pneu (SENATORE e SANDU, 2011).

O solo atua de forma a diminuir a força de tração do trator ao oferecer uma resistência para o avanço da roda (resistência ao rolamento). Com isso, a força “possível” se converte em “real”, chamada diretamente de força de tração. Porém esta redução da força de tração depende de duas circunstâncias: tipo de solo (textura e teor de água) e tipo de rodado (carga aplicada e área de contato pneu/solo). Esta limitação tem uma consequência, a patinagem, que faz com que o trator se mova a uma velocidade menor do que a correspondida pelas voltas oriundas do motor (LINARES, 2001).

A patinagem é a denominação que se dá ao deslizamento entre a superfície da banda de rodagem e o solo, sendo ela um fator determinante para que ocorra a tração. Durante uma operação agrícola, a patinagem pode ser facilmente visualizada pelo movimento giratório das rodas motrizes do trator, com pequeno ou nenhum avanço das mesmas, o que acontece devido à falta de aderência das rodas ao solo (GAMERO e LANÇAS, 1996; CORRÊA et al., 1999).

Para que ocorra tração é necessário que exista patinagem, entretanto, se esta ultrapassar determinados limites, pode ocorrer perda da aderência e redução da tração dos rodados (LANÇAS e UPADHYAYA, 1997). Os mesmos autores concluíram que, nos tratores agrícolas a patinagem dos rodados ocorre devido a diversos fatores, entre eles o esforço de tração necessário para deslocar determinado equipamento, tipo de superfície que está em contato com a banda de rodagem dos pneus motrizes, tipo de pneu, a pressão de insuflagem, carga sobre o rodado e tipo da banda de rodagem.

A norma da ASABE (1999) recomenda que para obtenção de máxima eficiência de tração a patinagem varie de 8-10% em solos não mobilizados e de 11-13% em solos mobilizados.

De acordo com Mialhe (1996), a mensuração da quantidade de combustível consumida constitui-se um dos mais importantes aspectos da avaliação do rendimento de um motor, ou seja, do seu desempenho como máquina térmica conversora de energia.

O consumo de combustível pode ser apresentado como unidade de volume por unidade de tempo ($L h^{-1}$), caso em que não se considera a influência da variação da temperatura e, tampouco, a quantidade de potência gerada (LOPES et al., 2003).

Na comparação do desempenho operacional de um trator agrícola equipado com pneus radiais e diagonais, Barbosa et al. (2005) observaram que a utilização de pneus radiais proporcionou um aumento de 18,53% de potência na barra e um consumo específico de combustível 23,39% menor com relação a utilização de pneus diagonais. No entanto, quando

pneus diagonais foram utilizados, os autores destacam uma diminuição de 27,07% no consumo específico de combustível quando os níveis de patinagem aumentaram de 10% para 30%.

Segundo Franz (1988), o consumo específico de combustível com níveis de 10% de patinagem foi alto devido aos menores valores de potência na barra de tração e consumo horário de combustível equivalente aos valores encontrados a 20% de patinagem quando ocorreu o menor consumo específico de combustível. Níveis acima de 30% de patinagem acarretam acréscimos significativos no consumo de combustível. Ocorrem valores mínimos de consumo específico de combustível onde acontecem valores máximos de potência na barra de tração.

2.3. SOLO DO CERRADO E SEU ESTADO DE COMPACTAÇÃO

O problema da compactação/adensamento do solo vem aparecendo sistematicamente em todas as regiões do Brasil, principalmente na região do Cerrado, onde os sistemas convencionais de manejo do solo promovem a desagregação excessiva da camada arável (FREITAS, 1994). Como alternativa, os agricultores vêm adotando o Plantio Direto (PD) que é baseado na ausência de movimentação do solo e na manutenção de resíduos orgânicos na superfície do solo, alterando desta forma a dinâmica da matéria orgânica e da atividade biológica, modificando, principalmente, os processos intrínsecos do solo, provocando alterações na sua estrutura e na dinâmica físico-hídrica (STONE et al., 2002).

Em várias situações, porém, têm sido relatadas ocorrências de aumento da densidade do solo e diminuição dos macroporos com o uso do PD. O processo de compactação devido ao fato de, supostamente, prejudicar o crescimento das raízes e o movimento vertical de água, leva o agricultor a movimentar o solo, desfazendo o trabalho biológico e físico de vários anos, destruindo a estrutura do solo, provoca a rápida mineralização da matéria orgânica e prejudica a atividade biológica (STONE et al., 2002).

A utilização do PD por longo prazo tem levantado questionamentos sobre os possíveis impactos negativos da compactação causada pelo tráfego de máquinas e ação de equipamentos, apesar de que o aumento de matéria orgânica pode contribuir para a atenuação da compactação do solo (BLANCO-CANQUI et al., 2009). Há grandes divergências quanto aos efeitos da compactação do solo sobre a produtividade das culturas sob PD, principalmente se consideradas as variáveis tempo de adoção do PD, tipo de solo, clima, manejo das culturas e, em particular, a condição estrutural do solo no momento da adoção do PD

(FERRERAS et al., 2000). Em geral, solos sob PD têm apresentado maior compactação nas camadas próximas à superfície, em relação aos solos sob manejo convencional (VEIGA et al., 2007; ALVAREZ e STEINBACH, 2009). Contudo, as produtividades das culturas sob PD são geralmente maiores ou equivalentes às aquelas sob manejo convencional (FABRIZZI et al., 2005; CARDOSO et al., 2007), sobretudo em regiões tropicais e subtropicais.

Goedert et al. (2002) realizaram avaliações em duas propriedades situadas no Distrito Federal, que utilizavam o manejo de plantio direto por longo período. Analisando a compactação por meio da densidade e resistência do solo à penetração em camadas do solo. Os resultados revelaram que não havia compactação, o que pode ser atribuído às boas características físicas originais do solo e ao adequado manejo das lavouras.

Rosa (2009) avaliando as propriedades físicas do solo nas camadas de 0,0- 0,06 m, 0,07-0,14 m e 0,15-0,22 m em um Latossolo Vermelho, sob cinco tempos de implantação do PD (2 meses; 2; 4; 5,5 e 14 anos) e dois níveis de tráfego (com e sem tráfego), demonstrou que o tempo de uso do sistema possui influência direta nas propriedades avaliadas. O autor verificou que no PD recém implantado (2 meses), elevados valores de macroporos e condutividade hidráulica do solo saturado e maior permeabilidade do solo ao ar em todas as camadas avaliadas. Na camada mais superficial foi observada maior permeabilidade ao ar do solo devido à presença de macroporos; verificou também um aumento de microporos e do teor de carbono orgânico do solo com o tempo de implantação do PD, apresentando também uma maior retenção de água, independente do tráfego, nos tempos 5,5 e 14 anos.

Betioli Júnior et al. (2012) avaliando um Latossolo do cerrado sob 30 anos de plantio direto encontraram valores de densidade do solo máxima de $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$, e grau de compactação (GC) variando entre 64 e 87%, sendo que para estes valores não há indicações de limitações físicas às plantas devido à aeração e resistência, e os valores de GC não indicam comprometimento da retenção de água no solo. Concluíram, desta maneira, que a qualidade física desse solo não foi limitante à produção das culturas após 30 anos de uso do PD.

2.4. INDICATIVOS DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

2.4.1. Propriedades físicas do solo

A densidade de partículas (D_p) é definida como a massa por unidade de volume de sólidos do solo (ao contrário do volume do solo, que inclui o espaço poroso). Para a maioria dos solos minerais a densidade de partículas varia de 2,60 a $2,75 \text{ Mg m}^{-3}$, o que se deve à

predominância de minerais como quartzo, feldspato, mica e coloides silicatados que possuem densidades dentro desta faixa. Para cálculos em geral, considerando a camada arável (1 a 5% de matéria orgânica), caso a densidade de partículas real não seja conhecida, assume-se uma densidade de aproximadamente $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ (BRADY e WEIL, 2008).

Segundo Kiehl (1979), a consistência é consequência da intensidade e natureza das forças de coesão e aderência presentes entre os agregados ou dentro deles, ou entre as partículas do solo. As forças que unem as superfícies sólidas são devidas à tensão superficial existente nos meniscos formados pelas películas de água que envolve partículas de solo. A coesão é proporcional à tensão superficial existente na película de água, variando inversamente com o diâmetro das partículas sólidas. Solo arenoso tem baixa coesão entre suas partículas, enquanto que solo argiloso tem alta coesão.

Os limites de consistência se baseiam na constatação de que um solo argiloso ocorre com aspectos bem distintos conforme a sua umidade. Quando muito úmido, ele se comporta como um líquido; quando perde parte de sua água, fica plástico; e quando mais seco, torna-se quebradiço. Os teores de umidade correspondentes às mudanças de estado são definidos como: limite de liquidez e limite de plasticidade dos solos (PINTO, 2006).

As umidades correspondentes à mudança de estado de consistência do solo são definidas como: limite de contração (LC), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL) (ATTERBERG, 1911).

O conhecimento dos limites de consistência do solo é de grande valia para se ter uma ideia das condições de umidade que o solo deve estar no momento de realização das operações agrícolas, que devem ocorrer dentro da região de friabilidade, muito embora não seja uma garantia de que o solo tenha capacidade de suporte de carga ideal para resistir aos esforços solicitados (CARDOSO, 2007).

A partir destes limites identificam-se os estados ou regiões de consistência importantes para o tráfego agrícola ou preparo do solo, são elas: região de friabilidade que representa a faixa de umidade entre o limite de contração e o limite de plasticidade, e a região de plasticidade, que representa a faixa de umidade entre o limite plástico e o limite de liquidez (SILVA, 2002).

No ensaio de limite de liquidez mede-se, indiretamente, a resistência ao cisalhamento do solo para um dado teor de umidade, através do número de golpes necessários ao deslizamento dos taludes da amostra (DAVILLA, 2008).

O limite de liquidez é definido como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes para se fechar, numa concha. O limite de plasticidade é

definido como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando-se o solo com a palma da mão (PINTO, 2006).

A umidade do solo ótima para a máxima compactação é determinada pelo teste de Proctor Normal. De acordo com Pinto (2006), quando se compacta com umidade baixa, o atrito entre as partículas é muito alto e não se consegue uma significativa redução dos vazios. Para umidades mais elevadas, a água provoca certo efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto. A partir de certo teor de umidade, entretanto, a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios, pois o grau de saturação já é elevado e o ar está ocluso.

A curva de compactação do solo, segundo Bueno e Vilar (1998), varia em função da textura. Solos arenosos apresentam umidade ótima menor que solos argilosos, enquanto solos siltosos têm um comportamento intermediário. Klein et al. (2004) apresenta exemplos de curvas de compactação em que o teor de argila do solo influencia a umidade ótima para a máxima compactação, sendo que para solo argiloso a umidade ideal foi de $0,32 \text{ g g}^{-1}$, mas para solo arenoso essa foi de $0,17 \text{ g g}^{-1}$.

Uma alternativa para avaliar a suscetibilidade do solo à compactação é o ensaio de Proctor Normal. Esse se baseia no fato de que a densidade na qual um solo é compactado sob determinada energia de compactação, depende da umidade do solo no momento da compactação (PROCTOR, 1933). Este ensaio permite determinar o ponto ótimo para compactação do solo, ou seja, a umidade crítica em que não se deve tráfegar com máquinas agrícolas ou realizar pastoreio na pastagem.

O ensaio de Proctor Normal é pouco usual nos laboratórios de análises de solo para fins agrônômicos por exigir uma amostra relativamente grande de solo. Desta maneira, vários autores têm sugerido índices alternativos para determinar a umidade crítica de compactação. Nesse sentido, Ojeniyi e Dexter (1979) sugerem que seja utilizada a umidade correspondente a 90% do limite de plasticidade.

Em física do solo define-se tamanho de poros como o diâmetro da maior esfera inscrita no interior do espaço ocupado pelo poro. Solos de textura arenosa, pelo fato de possuírem partículas maiores, o espaço poroso também é constituído de poros maiores denominados macroporos, por outro lado, nesses solos o volume total de poros é pequeno. Os solos arenosos possuem porosidade total na faixa de $0,32$ a $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto os solos argilosos variam de $0,52$ a $0,61 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e os solos francos um valor intermediário (REICHARDT e TIMM, 2004; LIBARDI, 2005).

O espaço poroso do solo é classificado, em função da distribuição de poros por tamanho, em macroporos (poros maiores que 50 μm de diâmetro, caracterizando os poros de aeração e drenagem), e microporos (poros menores que 50 μm , cuja função é o de armazenamento da água). Há um consenso em considerar valores de macroporos crítica, situando-os em torno de 0,10 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (VOMOCIL e FLOCKER, 1966; KIEHL, 1979; OLIVEIRA et al., 2003; CENTURION et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2007; SEVERIANO et al., 2008).

A textura do solo, principalmente o teor de argila, define em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros do solo, determinando assim a área de contato entre as partículas sólidas e a água, sendo por isso responsável pela força de retenção, principalmente em baixos potenciais, como aquele do ponto de murcha permanente (REICHARDT, 1987).

A porosidade total diz respeito ao volume de espaços ocupados por fluídos (gases e líquidos) no solo. A distribuição desses espaços em classes de tamanho influencia diretamente o armazenamento de água, a disponibilidade de nutrientes e o transporte da solução e do ar no solo. A quantidade de macroporos ou porosidade de aeração destaca-se como uma das propriedades mais importantes em relação ao desempenho dos sistemas de manejo sobre a produtividade das culturas (ARATANI, 2008).

As características do sistema poroso, tais como: porosidade total, distribuição do tamanho dos poros, continuidade e estabilidade do sistema poroso, são importantes para o desenvolvimento dos processos de infiltração, drenagem, aeração e partículas coloidais, retenção e armazenamento de água. A porosidade do solo permite o processo de reserva hídrica no solo e é de importância crucial para os cultivos, pois a água pode ser um fator limitante durante as etapas do seu desenvolvimento (CAMARGO, 1983).

2.4.2. Propriedades hídricas do solo

Uma maneira indireta de se medir a distribuição do tamanho dos poros é pela curva de retenção de água no solo, que é de grande importância na agricultura, pois indica quando e quanto irrigar. É fundamental para estudos físico-hídricos do solo e expressa a relação entre a umidade do solo e o potencial matricial ou a tensão da água no solo, determinada por várias metodologias. O desafio é usar equipamentos que conduzam a água do solo a atingir dado potencial matricial ou tensão e medir-se a umidade na condição de equilíbrio hidrostático (REINERT e REICHERT, 2006).

A curva de retenção de água no solo tem uma aplicabilidade muito ampla tanto nos meios científicos como no cotidiano dos produtores, já que simultâneo ao seu conhecimento é possível estimar outros atributos do solo como a porosidade drenável, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, condutividade hidráulica não saturada, além do balanço hídrico, determinando-se a variabilidade do armazenamento de água no solo, sendo ainda um indicador físico bastante valioso da qualidade do solo (SÁ et al., 2010).

O solo funciona como um reservatório de água para as plantas (REICHARDT, 1988), porque, apesar de ser aberto para a atmosfera e para os horizontes mais profundos do perfil, ele retém água por meio de sua interação com a matriz. Com o propósito de quantificar o limite superior desse reservatório, Veihmeyer e Hendrickson (1931, 1949) introduziram o conceito de capacidade de campo para caracterizar a quantidade de água retida pelo solo após o excesso ter sido drenado e a taxa de movimento descendente ter decrescido acentuadamente, o que, geralmente, ocorre dois ou três dias após uma chuva ou irrigação, em solos permeáveis e de estrutura e textura uniformes.

Partindo da noção de que a capacidade de campo é uma propriedade do solo e com a finalidade de simplificar sua determinação, foram estabelecidas várias relações entre a umidade do solo na capacidade de campo e o potencial matricial da água no solo (Ψ_m), obtido em laboratório. Jamison (1953) foi um dos primeiros a recomendar o uso de Ψ_m igual a -33 kPa (-1/3 atm) como limite superior da água disponível – valor que se generalizou ao ponto de quase se universalizar. Entretanto, esta é uma questão muito controversa no meio científico, pois inúmeros autores, tais como: Salter e Haworth (1961), Marcos (1971), Maclean e Yager (1972), Borges (1979), Freire (1979), Ferreira e Marcos (1983) e Medina e Oliveira Jr. (1987), estudaram e recomendaram valores de Ψ_m entre -6 a -50 kPa (Ψ_m -6/100 a -1/2 atm), para diferentes classes de solo.

O ponto de murcha permanente (PMP) é o teor de água de um solo no qual as folhas de uma planta que nele cresce atingem um murchamento irreversível, mesmo quando colocada em uma atmosfera saturada com vapor de água (VIEHMEYER e HENDRICKSON, 1949). O PMP representa, portanto, o teor de água mínima disponível no solo para o desenvolvimento das plantas (BRIGGS e SHANTZ, 1912). O valor prático da determinação do PMP, segundo ARRUDA et al. (1987), é reduzido, servindo apenas como um guia geral do limite inferior de disponibilidade de água às plantas. A determinação do PMP é complicada e seu valor apenas uma referência, visto que os sintomas de murchamento na planta com consequente decréscimo da produção ocorrem muito antes que a tensão da água no solo atinja

o PMP, porém a atividade vegetal só é cessada após atingir esse ponto (RICHARDS e WALDLEIGH, 1952; ARRUDA et al., 1987; JONG van LIER, 2000).

Com bases nesse conceito, introduzido no início do século passado, o PMP é uma grandeza física de um solo, estimada pelo teor de água retida no potencial matricial, de aproximadamente -1,5 MPa (HILLEL, 1980; ROMANO e SANTINI, 2002), pois em baixo potencial o teor de água no solo varia pouco.

2.4.3. Propriedades mecânicas do solo

A densidade do solo (D_s) é definida como a massa por unidade de volume de solo seco. Este volume inclui partículas sólidas e o espaço poroso do solo. Para cálculo da densidade de partículas e densidade do solo considera-se somente a massa de sólidos do solo, excluindo a massa de água presente. Existem diversos métodos para determinação da densidade do solo baseados na obtenção de um volume conhecido de solo, secando-o para remoção da água, e obtendo-se sua massa seca. Através de um equipamento especial de amostragem obtém-se uma amostra indeformada e de volume conhecido (BRADY e WEIL, 2008).

A densidade do solo é influenciada pela textura do solo (BUENO e VILAR, 1998; REICHARDT e TIMM, 2004; LIBARDI, 2005). Solos arenosos apresentam densidade superior ao solo argiloso, enquanto que os solos siltosos apresentam comportamento intermediário. A densidade dos solos arenosos pode variar de 1,3 a 1,8 Mg m^{-3} , enquanto em solos argilosos esta variação pode ir de 0,9 a 1,6 Mg m^{-3} (CARVALHO et al., 2011). Essa variação na densidade se dá em decorrência da micro agregação das partículas de argila, que acarretam uma porosidade intra-agregados, o que reduz a densidade, sendo esses micro agregados extremamente estáveis (KLEIN, 2005).

A densidade do solo é considerada uma das propriedades a medir para avaliar a qualidade estrutural de um solo, sendo utilizada como indicador de sua estrutura e dureza. Mudanças na densidade do solo refletem modificações na estrutura do solo, devido à relação que existe entre a densidade do solo e a porosidade total. Apesar da porosidade total não ser um indicativo da distribuição e tamanho de poros, ela pode ser uma propriedade que, juntamente com a densidade do solo, reflete os efeitos de compactação dos solos (DORAN et al., 1994).

A definição de limites críticos de densidade do solo para o desenvolvimento das plantas é muito complexa, uma vez que é dependente da textura e do teor de matéria orgânica.

A densidade relativa (grau de compactação), que é a relação entre a densidade do solo no campo e a densidade do solo máxima obtida pelo ensaio de Proctor normal, tem sido apresentada como um parâmetro capaz de padronizar e delimitar esses limites críticos (KLEIN et al., 2013).

Silva et al. (1997) pesquisaram a influência da textura do solo, matéria orgânica e tipo de manejo na densidade do solo e no grau de compactação. Foi verificado pelos autores que a densidade do solo é influenciada fortemente pelos fatores mencionados, enquanto que o uso da densidade relativa praticamente eliminou os efeitos da textura e do teor de matéria orgânica, enfatizando o efeito da intensidade do tráfego de máquinas e tipo de manejo sobre as propriedades físicas do solo.

O grau de compactação é uma medida adimensional que varia de 0 a 1 (0 a 100%). Quanto mais próximo de 0 indica que o solo é frouxo, ou seja, dificulta a retenção de água e o contato solo-semente. Por outro lado, quanto mais próximo de 1 indica alta compactação do solo, ou seja, um solo com pouco poros, que dificulta a absorção de água e desenvolvimento radicular das culturas (SUZUKI et al., 2005). Suzuki et al. (2007) estudando a influência do grau de compactação no rendimento da soja obtiveram as melhores médias quando o grau de compactação atingiu valores de 0,82 em Argissolos e 0,85 para os Latossolos.

A resistência do solo à penetração é um parâmetro físico do solo responsável por determinar o grau de desenvolvimento radicular das culturas. É um atributo que varia com a umidade e densidade do solo. Sua obtenção pode ser feita a partir de um instrumento de sondagem (penetrômetro), também conhecido como “índice cone” (BORGES et al., 2004). Este índice depende de atributos do solo como: teor de água, porosidade, textura, estrutura e estabilidade de agregados (CAMARGO e ALLEONI, 1997; TAVARES FILHO e RIBON, 2008).

O penetrômetro de cone, também denominado de penetrômetro dinâmico, é um equipamento largamente utilizado em aplicações agrícolas para detectar camadas compactadas de solo. Apresenta como vantagens facilidade e velocidade de uso, baixo custo e forte relação com as condições físicas do solo para o crescimento do sistema radicular das plantas, além da possibilidade de medidas diretas de campo com grande número de repetições (TORMENA e ROLOFF, 1996; HERRICK e JONES, 2002; NAIME et al., 2006). Sua desvantagem é a dependência de outros atributos do solo, a exemplo da umidade no momento da medida, textura, densidade do solo, estrutura, matéria orgânica, presença de pedras, mineralogia da argila e sistemas de uso e manejo (GERARD et al., 1982; NEIRO et al., 2003).

Embora pareça simples definir a resistência do solo, esta medição é complexa, pois depende de propriedades altamente variáveis, visto que o solo pode tanto diminuir como aumentar sua resistência à deformação. A resistência do solo à penetração é altamente dependente do conteúdo de água, da densidade do solo e da distribuição do tamanho de partículas. Em campo, recomenda-se avaliar a resistência do solo à penetração com conteúdo de água no solo próximo à capacidade de campo. Porém, para uma melhor avaliação da resistência é recomendado fazer essa medição em distintos conteúdos de água no solo (REICHERT et al., 2010).

Analisando os sistemas de manejo de um Planossolo, Pedrotti et al. (2001) verificaram que a resistência do solo à penetração do solo aumentou em relação a testemunha. São vários os trabalhos que procuram limitar um valor de resistência do solo à penetração crítica para o desenvolvimento das culturas, e este valor é estabelecido entre 2 e 3 MPa para a umidade de solo na capacidade de campo (TAYLOR e GARDNER, 1963; TAYLOR e BURNETT, 1964; SEMMEL et al., 1990). Este valor vai depender da cultura empregada, das características físicas e químicas do solo, bem como, o sistema de manejo. O penetrômetro é uma ferramenta que auxilia na determinação da profundidade que apresenta valor da alta resistência, ou seja, presença de camada compactada. Com isso é possível inferir a melhor tecnologia para auxiliar na descompactação deste solo (BORGES et al., 2004).

A obtenção da pressão de preconsolidação (σ_p) dá-se a partir de um método denominado ensaio de compressão edométrica, ensaio de adensamento ou ensaio de compressão uniaxial, que de acordo com Pinto (2006) consiste na compressão de solo contido dentro de um molde que impede qualquer deformação lateral. O ensaio simula o comportamento do solo quando ele é comprimido por diversas pressões. Quando o solo não sofreu nenhuma pressão prévia, a curva de compressão é linear, denominada de reta de compressão virgem, em que a aplicação de qualquer pressão resultará em deformações não recuperáveis (LARSON et al., 1980; DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996), causando, portanto, compactação adicional.

Entretanto, quando o solo já sofreu pressões prévias, o mesmo adquire certo grau de compacidade, sofrendo deformações apenas quando submetidos a pressões superiores às anteriormente aplicadas. O comportamento da curva de compressão do solo nessas condições é descrito em duas regiões características: uma de deformações elásticas e recuperáveis, denominada de curva de compressão secundária (portanto, não degradando a estrutura do solo) e uma região de deformações plásticas e não recuperáveis, denominada de curva de

compressão virgem (região em que ocorre compactação adicional) (HOLTZ e KOVACS, 1981; DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996).

A σ_p é um parâmetro indicativo da capacidade de suporte de carga de um solo (KONDO e DIAS JUNIOR, 1999; DIAS JUNIOR et al., 1999), de forma que, quanto maior a σ_p maior a capacidade de suporte de carga. Porém esse valor deve ser cuidadosamente interpretado, já que pressões muito altas influenciam negativamente no desenvolvimento das plantas e, pressões muito baixas indicam que o solo está susceptível a compactação adicional. Suzuki et al. (2008) observaram que quanto maior a deformação de um solo, maior sua susceptibilidade à compactação e menor sua capacidade de suporte de carga.

A capacidade de suporte de carga é definida como a capacidade da estrutura do solo em resistir a tensões induzidas pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal, sem mudanças no arranjo tridimensional das partículas constituintes do solo (Alakukku et al., 2003), em uma determinada umidade ou potencial matricial.

Silva et al. (2006) avaliando o modelo da capacidade de suporte de carga em três profundidades e duas épocas de amostragem (seca e chuvosa) sobre a influência das operações mecanizadas no cultivo do cafeeiro em um Latossolo Amarelo, relataram que na estação chuvosa (umidade acima do LP) as operações mecanizadas ocasionaram compactação em 20% das amostras coletadas na camada de 0-0,03 m. Concluíram, ainda, que os efeitos das operações mecanizadas na lavoura cafeeira podem ser quantificados pelo modelo de capacidade de suporte de carga, e seu uso permite quantificar os efeitos do tráfego no manejo da lavoura cafeeira.

Severiano et al. (2008) avaliando as alterações na estrutura de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e um Cambissolo Háptico (CX), em consequência das operações de colheita da cana-de-açúcar em diferentes épocas de safra, relataram que a densidade do solo na σ_p foi sensível à ocorrência de alterações estruturais no solo. E que, a colheita mecanizada da cana-de-açúcar realizada em solo com 0,16 e 0,21 kg kg⁻¹ de água, para LVA e CX, respectivamente, não promoveu compactação excessiva.

Iori et al. (2012a) avaliando a sustentabilidade estrutural, a partir do ensaio de compressão uniaxial, de três classes de solo (Cambissolo Háptico [CH], Argissolo Amarelo [AA] e Gleissolo Háptico [GA]) e o impacto de diferentes tipos de usos do solo – não permitido pela legislação ambiental – de áreas de preservação permanente na sub-bacia do rio Ribeira de Iguape, SP, relataram que a σ_p mostrou-se ferramenta capaz de identificar a degradação nos solos. O uso do solo nas áreas de preservação permanente altera a σ_p do solo, causando sua degradação estrutural, colocando em risco a sustentabilidade das terras, não

devendo ser permitido. O GA apresentou maiores valores de σ_p em função de teores crescentes de água e, portanto, maior capacidade de suporte de carga em relação ao CH e AA. As áreas cultivadas com banana em locais de preservação permanente foram as que mais degradaram os solos.

Souza et al. (2012) compararam a capacidade de suporte de carga do solo em área com cana-de-açúcar colhida mecanicamente sem queima, em sistemas de manejo com e sem controle de tráfego agrícola. Descreveram que o manejo sem controle de tráfego apresentou maior capacidade de suporte de carga do solo na linha de plantio, nas duas camadas de solo avaliadas, o que indicou maior compactação. Maior densidade radicular ocorreu no manejo com controle de tráfego com ajuste da bitola e piloto automático, que permitiu maior capacidade de suporte de carga na linha de rodado e preservou a qualidade estrutural na região da soqueira, com reflexo positivo sobre o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar.

Kamimura et al. (2012) estudando a qualidade física de um Latossolo Vermelho-Amarelo em uma lavoura cafeeira na linha de tráfego de um trator e uma colhedora, relataram que as operações realizadas com o trator degradaram mais a estrutura do solo do que as realizadas com a colhedora, pois na linha de tráfego do trator a densidade do solo, os microporos e a pressão de preconsolidação foram maiores que as da linha de tráfego da colhedora.

Ortigara et al. (2014) determinando e avaliando as propriedades físico-mecânicas de um Latossolo Vermelho distrófico em três áreas com diferentes usos (pastejo rotacionado, mata nativa e preparo convencional) informaram que, o pisoteio animal intensivo em área de pastagem causou alterações na estrutura do solo, gerando níveis de compactação restritivos às plantas. As áreas de mata nativa e preparo convencional foram as mais suscetíveis à compactação do solo, apresentando elevado índice de compressão e baixa pressão de preconsolidação e densidade do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ÁREA EXPERIMENTAL

A área onde foi instalado o experimento passou por incorporação de 2,5 Mg ha⁻¹ de calcário no ano de 2012, e desde então vem sendo manejada sob plantio direto. Antes da instalação do experimento foi realizada uma roçagem a fim de regularizar a cobertura vegetal. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2006), localizado na estação experimental da EMATER de Anápolis, GO, cuja localização geográfica é definida pelas coordenadas 16° 19' S e 48° 18' W, com altitude média de 980 m.

Predomina na região de Anápolis o clima tropical de savana, megatérmico, do tipo Aw conforme classificação de Köppen, com chuvas concentradas no verão (outubro-abril) e estação seca no inverno (maio-setembro). No período chuvoso as máximas de precipitação ocorrem em dezembro e as mínimas em agosto, estando o total anual em torno de 1.400 mm. Neste período os meses de setembro e outubro são considerados os mais quentes, com médias entre 23° a 26°C. No inverno as mínimas de temperaturas ocorrem nos meses de junho e julho com médias a 21°C (GOIÁS, 2016).

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ANTES DO EXPERIMENTO EM CAMPO

Antes dos ensaios serem realizados, no período seco a chuvoso, em uma área de aproximadamente 9.000 m² foram retiradas em 30 sítios amostras de solo deformadas e indeformadas a fim de caracterizar os atributos físico-mecânicos do solo.

3.2.1. Análises físicas

A densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do picnômetro, assim como descrito por Gubiani (2006).

A densidade do solo (D_s) foi determinada pela relação entre massa do solo seco em estufa e seu volume (100 cm³) conforme Donagema et al. (2011).

A análise granulométrica foi determinada pelo método da pipeta, utilizando-se a peneira de diâmetro e malha 0,053 mm (n° 270) para retenção da areia. E foi utilizada a peneira de diâmetro e malha 0,200 mm (n° 70) para separação da areia grossa e fina (DONAGEMA et al., 2011).

Os limites de consistência e porosidade total foram determinados conforme Donagema et al. (2011).

Os microporos foram obtidos mediante a curva de retenção de água no solo, no potencial matricial equivalente a -6 kPa, e os macroporos resultaram da diferença entre porosidade total e microporos (DONAGEMA et al., 2011).

A densidade máxima (D_{max}), utilizada na determinação do grau de compactação, foi obtida pelo ensaio de Proctor Normal seguindo a metodologia descrita na NBR 7182 (ABNT, 1986).

3.2.2. Curva de retenção de água no solo

Para obtenção das amostras indeformadas utilizadas na determinação da curva de retenção de água no solo (CRA) foi utilizado um trado tipo Holandês (que possui anel com 51 mm de altura e 50 mm de diâmetro interno, com volume interno de 100 cm^3), sendo retirada uma única amostra em cada sítio de avaliação.

Para determinação da CRA foram utilizadas a mesa de areia, que aplica tensões de 0 a -10 kPa e o extrator de membrana, cuja faixa de pressão compreende de -50 a -1.500 kPa, da marca Eijkelkamp.

A construção da CRA foi realizada, inicialmente, saturando-se as amostras indeformadas de solo por capilaridade com água destilada e equilibrada através da secagem, nos seguintes potenciais matriciais: 0; 0,10; 0,25; 1; 3,15; 6,3; 10; 100; 250 e 1.550 kPa, respectivamente. Após determinado os valores de umidade volumétrica do solo correlacionou-os com as tensões (potenciais matriciais) para obter a CRA, conforme metodologia adaptada de Donagema et al. (2011).

Os dados obtidos foram então ajustados simultaneamente e otimizados pelo software RETC (van GENUCHTEN et al., 1991).

3.2.3. Modelagem da resistência do solo à penetração

Do início de Julho (período seco) até a primeira quinzena de Novembro (período chuvoso) de 2015, em 30 sítios de avaliação permanente, foi determinada a resistência do solo à penetração (RP) e a umidade gravimétrica do solo, com retirada de três amostras por sítio, conforme metodologia adaptada de Vaz et al. (2011).

Na camada de 0-0,15 m foi determinada a RP e retirada uma amostra de solo no mesmo ponto após a obtenção da mesma. As amostras de solo foram acondicionadas em sacos

plástico e posteriormente secas, pelo método padrão da estufa, e então se obteve a umidade gravimétrica do solo (DONAGEMA et al., 2011).

A RP foi determinada com um penetrógrafo eletrônico Falker PLG 1020, com velocidade de penetração da haste mantida próxima a 30 mm s^{-1} , de acordo com a instrumentação do aparelho. Foi utilizado ponteira cônica com diâmetro de 12,83 mm e ângulo de penetração de 30° . A resolução do equipamento é de 7,7 kPa e o índice de cone máximo permitido de 7.700 kPa, seguindo-se as normas da ASAE S 313.2 (ASABE, 2006).

A curva de modelagem da resistência do solo à penetração (RP) foi determinada segundo o modelo exponencial (VAZ et al., 2011) apresentado na Equação 1:

$$RP = a \exp^{-bU} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

U é a umidade gravimétrica (g g^{-1});

“a” e “b” são os parâmetros de ajuste do modelo.

3.2.4. Modelagem da capacidade de suporte de carga

Com um trado tipo Holandês (que possui anel com 25 mm de altura e 69,33 mm de diâmetro interno) foram retiradas 54 amostras indeformadas para construção do modelo de capacidade de suporte de carga (compressão uniaxial). As amostras foram saturadas por capilaridade em água destilada e colocadas no teor de umidade desejada, na faixa de 0,05 a $0,40 \text{ kg kg}^{-1}$.

Para o ensaio de compressão uniaxial foi utilizado um consolidômetro automático com IHM da marca Masquetto, cuja aplicação das pressões se faz por meio da utilização de ar comprimido. As pressões aplicadas a cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, sendo cada uma aplicada até que 95% da deformação máxima fosse alcançada, e só então aplicou-se uma nova pressão (SILVA et al., 2015).

O modelo de capacidade de suporte de carga (σ_p) foi determinado segundo o modelo exponencial, adaptado de Silva et al. (2011), apresentado na Equação 2.

$$\sigma_p = a \exp^{-bU} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

U é a umidade gravimétrica (g g^{-1});

“a” e “b” são os parâmetros de ajuste do modelo.

As curvas de modelagem da resistência do solo à penetração, capacidade de suporte de carga e curva de retenção de água do solo foram traçadas por meio do software Excel 2010.

Os resultados das análises de caracterização físico-mecânica do solo antes dos ensaios serem realizados são apresentados pela média, maior e menor valor e desvio-padrão na Tabela 1.

TABELA 1 - Caracterização física e mecânica do Latossolo Vermelho sob plantio direto

Parâmetros	Média	Maior	Menor	Desvio-padrão	
Argila (g kg ⁻¹)	369,67	465,00	285,00	33,60	
Areia	Grossa (g kg ⁻¹)	207,11	220,00	182,50	9,00
	Fina (g kg ⁻¹)	146,50	163,50	138,50	5,98
Silte (g kg ⁻¹)	276,72	369,00	190,00	33,83	
Densidade de partículas (Mg m ⁻³)	2,68	2,80	2,59	0,05	
Densidade do solo (Mg m ⁻³)	1,18	1,38	1,08	0,08	
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0,5147	0,5782	0,4778	0,0252	
Microporos (m ³ m ⁻³)	0,4148	0,4374	0,3748	0,0146	
Macroporos (m ³ m ⁻³)	0,0999	0,2035	0,0559	0,0366	
Umidade ótima de compactação (kg kg ⁻¹)	0,270	0,278	0,254	0,01	
Limite de plasticidade (kg kg ⁻¹)	0,28	0,32	0,25	0,02	
Limite de liquidez (kg kg ⁻¹)	0,42	0,44	0,39	0,02	
Capacidade de campo (kg kg ⁻¹)	0,31	0,34	0,29	0,01	
Ponto de murcha permanente (kg kg ⁻¹)	0,11	0,13	0,09	0,01	
Massa de matéria seca (kg ha ⁻¹)	4.600	6.400	3.200	1.200	

3.3. MAQUINÁRIO UTILIZADO

3.3.1. Tratores

Para a realização dos ensaios foi utilizado um trator agrícola da marca New Holland, modelo T6.110, com motor ciclo diesel, potencia nominal de 112 cv (82,37 kW), torque máximo de 528 Nm e tração dianteira auxiliar (TDA), massa total com lastros de 6.200 kgf (para ambos pneus), sendo escalonada a 2ª marcha reduzida à rotação de 1.900 rpm, que proporcionou velocidade média de 4,7 e 5,5 km h⁻¹ para o pneu radial e diagonal, respectivamente. O trator de frenagem utilizado foi um Valmet, modelo 118.4 com 118 cv (86,78 kW) de potência, ligado por um cabo de aço de 10 m de comprimento (Figura 2).



FIGURA 2. Trator de ensaio e trator de frenagem utilizado no ensaio de campo.

3.3.2. Pneus

No experimento foram utilizados apenas os pneus traseiros para proporcionarem tração, sendo que a TDA permaneceu desligada. Os pneus dianteiros utilizados durante todo o experimento eram do tipo diagonal da marca Goodyear modelo 14.9-24. Os pneus traseiros radiais utilizados foram da marca Michelin 18.4R-34 e, os pneus traseiros diagonais da marca Pirelli 18.4-34. As pressões de insuflagem foram utilizadas segundo recomendação de MICHELIN (2015) e PIRELLI (2015).

Para controle local das variáveis, as condições de lastragem líquida e pressão de insuflagem dos pneus foram ajustadas de forma a obter-se as mesmas características de interação solo-pneu para ambos os pneus. Para que assim fossem minimizados os erros estatísticos.

Na Tabela 2 consta a caracterização detalhada dos pneus e na Figura 3 é apresentado o perfil dos mesmos.

TABELA 2 - Caracterização do pneu radial e diagonal utilizado no experimento

Características	Estrutura	
	Radial	Diagonal
Modelo	18.4R34 R1	18.4-34 R1
Cap. de carga (Ply Rating)	8	10
Circunferência (m)	5,25	5,18
Altura da secção (m)	0,33	0,30
Largura da secção (m)	0,46	0,44
Número de garras	20 x 2	28 x 2
Altura da garra* (mm)	1	50,31
	2	50,31
	3	64,55
Distância entre garra* (mm)	1	95,00
	2	200,00
	3	200,00

continua...

...continuação da Tabela 2

Lastragem líquida (H ₂ O)	210 litros	210 litros
Lastragem sólida (kgf)	300	300
Pressão de insuflagem (kPa/psi)	158,62 (23)	179,31 (26)
Carga estática (kgf)	3.000	2.990

* Os pontos 1, 2 e 3 são referentes à Figura 3.

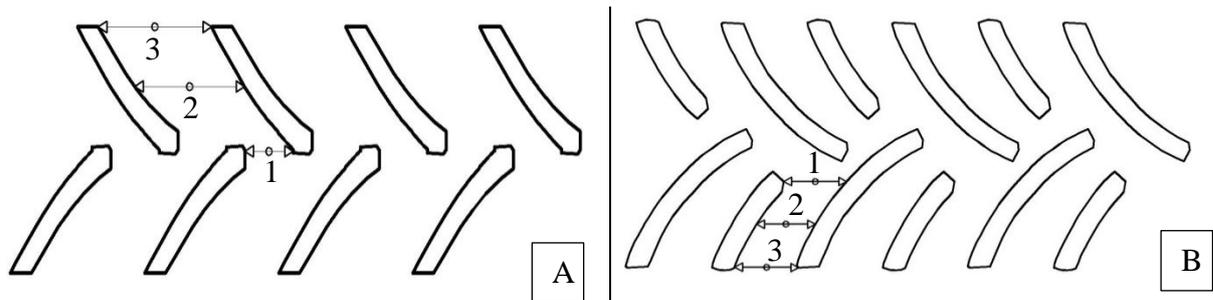


FIGURA 3. Perfil do pneu radial (A) e diagonal (B).

3.3.3. Determinação da força na barra de tração

O controle das diferentes cargas impostas pelo trator de frenagem foi realizado utilizando-se uma célula de carga da marca Excel, modelo RS-5000 (Figura 4), com capacidade nominal de 5000 kgf (50 kN). Os dados foram obtidos e armazenados a cada segundo por uma placa Arduino, que foi previamente calibrada com cargas conhecidas e sua curva é apresentada na Figura 5.



FIGURA 4. Suporte e célula de carga utilizada entre os tratores para determinar a carga aplicada à barra de tração.

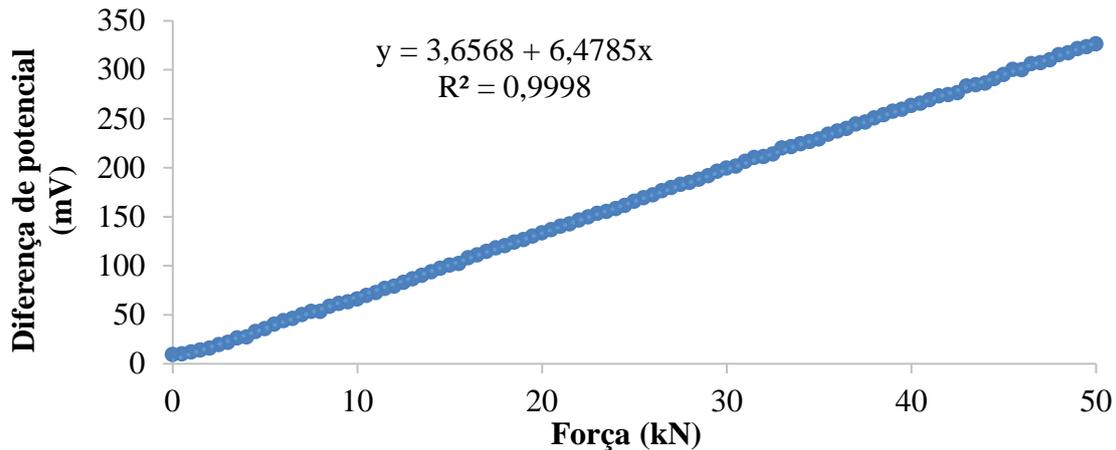


FIGURA 5. Curva de calibração da célula de carga em laboratório com uso do sistema de aquisição com placa Arduino.

3.3.4. Fluxômetro

Para determinação do consumo de combustível, utilizou-se um medidor de vazão de combustível da fabricante Japonesa Oval Corporation, modelo FLOWMATE OVAL M-III LSF41L0-M2, alimentado por corrente contínua e tensão entre (12~24 V), faixa de temperatura de trabalho entre -20 e 80°C e vazão permitida de 1 a 100 L h⁻¹, conforme Figura 6. O princípio de funcionamento consiste em contabilizar a quantidade de volume de combustível por unidade de tempo. Neste caso, o fluxômetro é munido de duas engrenagens ovais que ao completarem uma volta, deslocam 1 mL de combustível gerando um pulso elétrico. O fluxômetro foi ligado à placa Arduino, que realizava uma leitura a cada 1 mL de combustível deslocado, ou seja, a cada pulso elétrico gerado pelo mesmo.



FIGURA 6. Esquema de instalação do fluxômetro utilizado no trator de ensaio.

3.4. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Foi adotado o delineamento em blocos ao acaso em parcelas subdivididas, no esquema fatorial 2x5, compondo dez tratamentos com quatro repetições por tratamento, totalizando 40 unidades experimentais (Figura 7). As parcelas foram constituídas do uso de dois tipos de pneus: diagonal e radial. As subparcelas foram cinco cargas impostas à barra de tração pelo trator de frenagem compostas pelas seguintes marchas (sem trator de frenagem, neutro, 3ª média, 2ª média e 1ª média), que ocasionaram as cargas de: 0; 5,18; 11,45; 14,49 e 18,53 kN e 0; 3,46; 8,16; 10,48 e 14,86 kN, para o pneu diagonal e radial, respectivamente.

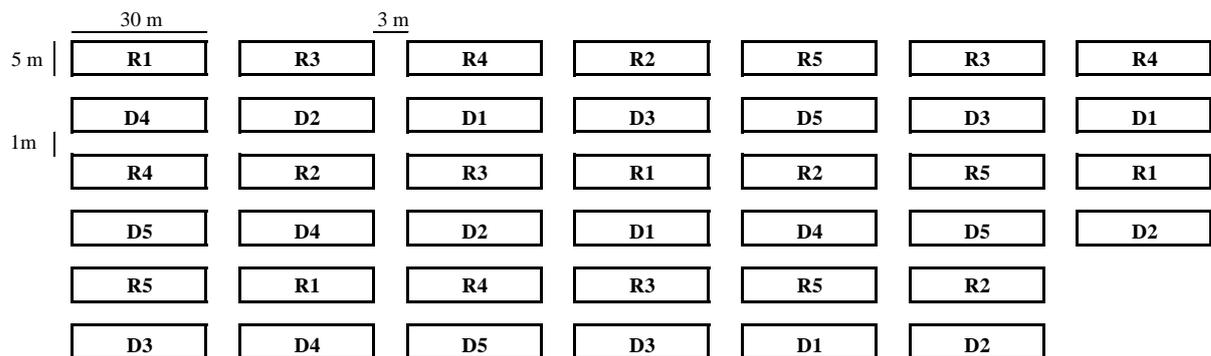


Figura 7. Croqui da área experimental, com a localização das 40 unidades experimentais. R: Radial; D: Diagonal; 1-5: Escalonamento das marchas.

3.5. EXPERIMENTO EM CAMPO

Os ensaios de campo foram realizados com teor de água no solo de $0,32 \text{ kg kg}^{-1}$ e $0,31 \text{ kg kg}^{-1}$ para o pneu diagonal e radial, respectivamente.

Para cada tipo de pneu e carga imposta à barra de tração, o trator agrícola deslocou em pista de 30 metros de comprimento (LOPES et al., 2005). Todas as amostras foram retiradas na linha do pneu de tração, entre o trator ensaiado e o trator de frenagem, distância correspondente à distância do cabo de aço que ligava os tratores.

3.5.1. Amostragem do solo

Após o tráfego com os diferentes pneus e cargas impostas à barra de tração, foram retiradas amostras indeformadas com um trado tipo Holandês (que possui anel com 25 mm de altura e 69,33 mm de diâmetro interno) para determinação da pressão de preconsoidação. E, foram retiradas amostras indeformadas para determinação da densidade do solo e da curva de retenção de água no solo com um trado tipo Holandês (que possui anel com 51 mm de altura e 50 mm de diâmetro interno).

Estas amostras foram retiradas (na camada de 0–0,05 m) em cima da linha do rodado do trator, na posição que compreendia o centro do rodado, desconsiderando a camada que foi mobilizada pelo mesmo. Estas foram envoltas com papel filme, acondicionadas em saco plástico e armazenadas em caixa de isopor, para que se mantivesse o teor de umidade.

Foi mensurada, também, a RP na posição que compreendia o centro do rodado na profundidade de 0–0,15 m.

3.5.2. Mensuração do desempenho operacional

Para determinação da patinagem das rodas motrizes do trator contou-se o número de voltas durante o percurso de 30 m da pista de ensaio, conforme metodologia descrita por ASABE (1999).

A medição do consumo combustível foi realizada como descrito por Monteiro et al. (2011). Foi mensurando, com um cronômetro, o tempo necessário para percorrer os 30 m da pista de ensaio.

3.6. ANÁLISES EM LABORATÓRIO

3.6.1. Análises do solo

A densidade do solo (D_s) foi determinada pela relação entre massa do solo seco em estufa e seu volume (100 cm^3), conforme Donagema et al. (2011).

O grau de compactação foi obtido pela seguinte expressão:

$$GC = \frac{D_s}{D_{max}} \times 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que:

GC - Grau de compactação do solo (%);

D_s - Densidade do solo (Mg m^{-3}); e

D_{max} - Densidade máxima obtida no laboratório (Ensaio de Proctor Normal) (Mg m^{-3}).

A curva de retenção de água foi determinada conforme metodologia descrita no item 3.2.2.

A pressão de preconsolidação foi determinada pelo ensaio de compressão uniaxial conforme Silva et al. (2015).

3.6.2. Avaliação do desempenho operacional

Com os valores de força obtidos em campo e utilizando a velocidade média de 4,7 e 5,5 km h⁻¹ para o pneu radial e diagonal, respectivamente, foi possível estimar a potência média na barra de tração conforme Equação 4 (JESUINO et al., 2011):

$$\text{Pot} = \frac{\text{Fbt} \times \text{V}}{366,97} \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que:

Pot – Potência média na barra de tração (kW);

Fbt – Força na barra de tração (kgf); e

V – Velocidade média operacional (km h⁻¹).

A patinação das rodas motrizes do trator foi determinada comparando-se o número de voltas do trator sem carga com o número de voltas do trator com carga (ASABE, 1999), durante o percurso de 30 m da pista de ensaio (Equação 5).

$$\text{Pat} = \frac{\text{NVsc} - \text{NVcc}}{\text{NVcc}} \times 100 \quad \text{Eq. (5)}$$

Em que:

Pat – Patinação da roda motriz (%);

NVsc – Número de voltas sem carga; e

NVcc – Número de voltas com carga.

Os pulsos elétricos gerados pelo fluxômetro foram convertido em volume, considerando a vazão de 1 mL pulso⁻¹ e o tempo gasto na parcela (JESUINO et al., 2011). O cálculo do consumo horário de combustível foi realizado de acordo com a Equação 6:

$$\text{ConH} = \frac{\text{Np} \times 3,6}{t} \quad \text{Eq. (6)}$$

Em que:

ConH – Consumo horário de combustível (L h⁻¹);

Np – Número de pulsos do medidor de combustível (mL); e

t – Tempo gasto no percurso da parcela (s).

O consumo específico, que expressa o consumo de combustível por unidade de potência na barra de tração, foi calculado pela Equação 7 (Mialhe, 1996):

$$\text{ConE} = \frac{\text{ConH} \times \rho}{\text{Pot}} \quad \text{Eq. (7)}$$

Em que:

ConE – Consumo específico de combustível (g kW h^{-1});

ConH – Consumo horário de combustível (L h^{-1});

Pot – Potência média na barra de tração (kW); e

ρ – Densidade do combustível ($842,50 \text{ g L}^{-1}$).

3.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA

As variáveis obtidas foram submetidas à análise de variância pelo teste de F, a 5% e 1% de probabilidade e suas médias foram submetidas à análise de regressão. Em todos os procedimentos estatísticos descritos foi utilizado o software SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. FÍSICA DO SOLO

Os resultados da análise de variância para as variáveis: densidade do solo, grau de compactação, resistência do solo à penetração e pressão de preconsolidação, estão presentes na Tabela 3. Nota-se que apenas a resistência do solo à penetração apresentou diferença ($P < 0,01$). As demais variáveis não apresentaram diferença ($P > 0,05$).

TABELA 3 - Resumo da análise de variância das variáveis expressa pelo quadrado médio da densidade do solo (D_s , $Mg\ m^{-3}$), grau de compactação (GC, %), resistência do solo à penetração (RP, kPa) e pressão de preconsolidação (σ_p , kPa)

FV	GL	D_s	GC	RP	σ_p
Bloco	3	0,001209	0,00041	12.260,210	1.263,189
PNEU	1	0,000003 ^{ns}	0,00001 ^{ns}	3.627,120 ^{ns}	7.330,556 ^{ns}
Resíduo 1	3	0,001829	0,00105	31.177,491	3.659,123
FORÇA	4	0,002096 ^{ns}	0,00103 ^{ns}	93.294,517 ^{**}	1.787,584 ^{ns}
PNEU*FORÇA	4	0,000646 ^{ns}	0,00037 ^{ns}	1.178,891 ^{ns}	930,228 ^{ns}
Resíduo 2	24	0,001730	0,00085	22.086,106	1.317,177
	C.V. 1	3,49	3,88	20,65	28,43
	C.V. 2	3,39	3,50	17,38	17,06
	Média	1,23	83,45	855,16	212,74

^{ns}: não significativo ($P > 0,05$); ^{**} significativo à 1% de probabilidade ($P < 0,01$); C.V. 1: Coeficiente de Variação da parcela (%); C.V. 2: Coeficiente de Variação da subparcela (%).

Com relação à densidade inicial do solo (antes do tráfego do trator de ensaio) houve alteração média desta variável de 4% após o ensaio do conjunto. O processo de compactação ocorre quando há degradação na estrutura do solo, ocasionando, diminuição da porosidade, da capacidade de armazenar ar e água e da permeabilidade da água (MOLCHANOV et al., 2015). Para estes mesmos autores, solos de textura argilosa com valor de densidade abaixo de $1,20\ Mg\ m^{-3}$ e entre $1,20$ e $1,30\ Mg\ m^{-3}$ se encontram não compactados e ligeiramente compactados, respectivamente. Desta maneira, cogita-se que a alteração da densidade neste estudo, ocasionou uma leve redução no volume poroso do solo, de mesma intensidade para ambos os pneus que não causou compactação ao solo.

Todavia, em trabalho de Sá e Santos Júnior (2005), avaliando um Latossolo Vermelho distrófico, relataram que valores de densidade acima de $1,10\ Mg\ m^{-3}$ caracterizam um solo compactado e, além do mais, que o crescimento radicular seria limitado completamente para valores acima de $1,37\ Mg\ m^{-3}$. Carvalho et al. (2004) evidenciam que o nível crítico para

densidade do solo varia de acordo com o solo e que não existe consenso sobre um valor específico.

Uma possível resposta a este efeito é o solo, para a umidade de estudo, apresentar-se como um meio elástico, ou seja, ele retorna à sua configuração inicial após um ciclo de carregamento-descarregamento, isto é, não existe deformação permanente (AZEVEDO, 2007).

Perdok et al. (2002) estudando um solo Holandês com alto teor de água associado a baixo teor de ar no solo, relataram que para solo não saturado durante o processo de compressão uma parte do ar fica retido no seu interior, dispendo-se de bolhas de ar comprimido. Havendo no solo um teor de umidade em que o aprisionamento de bolhas é maior, gerará elasticidade maior.

Braida et al. (2008) relataram que amostras à tensão de -6 kPa, a maior quantidade de água atrapalha a expulsão do ar dos poros do solo, aumentando o aprisionamento de bolhas de ar, resultando em incremento da elasticidade do solo. Esse efeito é mais nítido quando o intervalo entre a carga-descarga das tensões é curto, conforme as condições de campo, no decurso de uma máquina ou animal sobre o solo, onde o tempo de aplicação das tensões é, geralmente, de fração de segundos.

As características construtivas dos pneus que ocasionaram certas alterações no desempenho do trator, quando analisadas na densidade do solo ocasionaram alteração similar e de pouca intensidade, mostrando que o tipo de pneu não influenciou na alteração desta variável. A mesma tendência foi verificada por Botta et al. (2008) que avaliando pneus radiais e diagonais, similares aos deste estudo, observaram que na condição de plantio direto ambos promoveram um valor de densidade de solo estatisticamente iguais.

A tendência do grau de compactação (GC) foi semelhante ao da densidade do solo. Sendo este fator proveniente da relação entre a densidade do solo e a densidade obtida pelo ensaio de Proctor Normal, que foi considerada a mesma para toda a área experimental.

O GC da área experimental, antes do tráfego do trator de ensaio, era igual a 80,38%. O GC elevou-se, em média, a uma ordem de 3,7% para ambos os pneus, ou seja, o incremento no GC foi relativamente baixo. Quando analisada a maior carga imposta pelo trator de frenagem, o incremento no GC foi de 6,26% e 4,87% para o pneu diagonal e radial, respectivamente.

O GC vem sendo utilizado na comparação de densidades entre solos de diferentes características de matéria orgânica, textura e mineralogia (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012). Relatos literários indicam que se o GC variar entre 80 e 90% obter-se-á o máximo rendimento

para a maioria das culturas (CARTER, 1990; HAKANSSON, 1990; LIPIEC et al., 1991; BEUTLER et al., 2005). Suzuki et al. (2007) considerando os valores críticos de macroporos e resistência do solo à penetração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e 2 MPa, respectivamente, relataram que, para um Latossolo, o valor satisfatório de crescimento das plantas se encontraria para o GC entre 76 e 84%.

Considerando os valores de GC obtidos pela literatura, os dois pneus não alteraram as condições físicas do solo a ponto de causar compactação adicional, ou seja, impedimento para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. No entanto, o valor do GC obtido após o experimento está associado a condições físicas satisfatórias às plantas. Valores mais elevados de densidade de solo são normalmente encontrados em estudos de áreas sob plantio direto, pois neste tipo de manejo, o revolvimento do solo está restrito à linha de semeadura, entretanto o tráfego de máquinas ocorre em toda a área, ocasionando um incremento da densidade na camada superficial do solo (ARATANI et al., 2009; SILVA et al., 2011).

O comportamento da curva de retenção de água no solo (CRA) para os diferentes pneus e incremento de força na barra de tração é apresentado na Figura 8. As CRAs não apresentaram diferença significativa ($P > 0,05$).

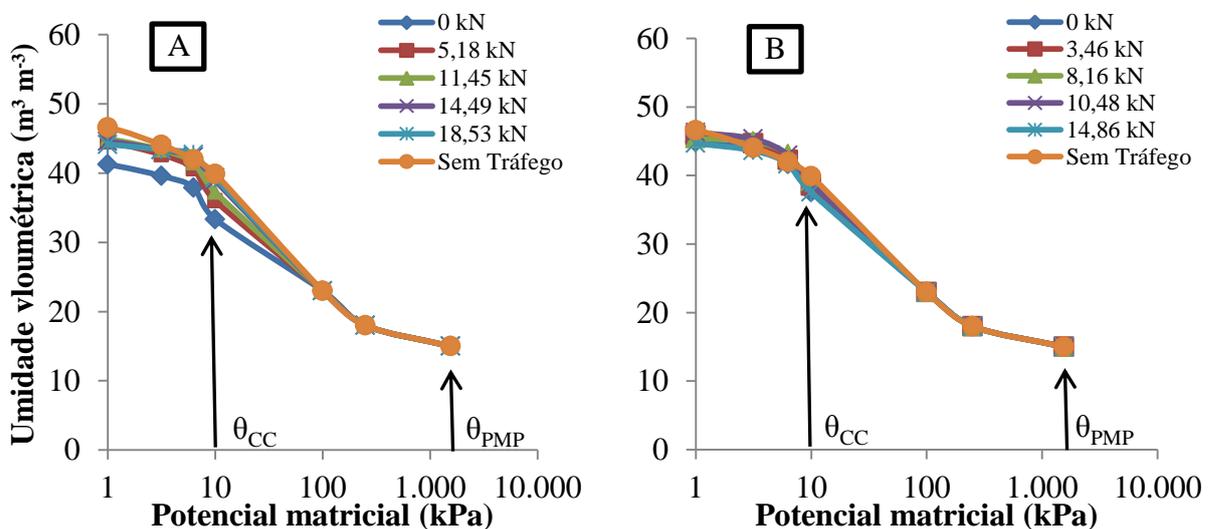


FIGURA 8. Curva de retenção de água no solo para o pneu diagonal (A) e radial (B) nas diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.

O pneu radial não causou alteração na CRA após o tráfego, nem nas maiores cargas. Porém, no pneu diagonal para a carga 0 kN houve uma redução na CRA ocasionando, consequentemente, uma diminuição na porosidade total do solo, de 48,58% para 43,27%, esta

alteração não foi significativa ($P > 0,05$). Quanto à macroporos, para este mesmo pneu e carga, esta reduziu de $0,099 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para $0,081 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, ou seja, houve uma redução de 18,18%.

Vomocil e Flocker (1966), Thomasson (1978) e Gupta e Allmaras (1987) preconizaram que para o crescimento e desenvolvimento satisfatório das plantas deve-se considerar um valor de macroporos mínimo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Desta maneira os pneus não causaram alteração nas características físicas do solo avaliado, exceto o pneu diagonal na força de 0 kN, que apresentou valor de porosidade total e macroporos que podem causar limitação no desenvolvimento adequado das plantas.

A água disponível no solo é armazenada nos microporos. Uma redução acentuada dos microporos afeta principalmente o armazenamento de água no solo e seu aumento é um indicador de compactação do solo, quando há diminuição dos macroporos (FERREIRA et al., 2010). O nível elevado de microporos pode gerar uma aeração deficiente quando o solo estiver na umidade próxima à capacidade de campo, visto que um grande número de poros estará ocupado por água, o que dificulta a respiração radicular e atividade microbiana das plantas (WENDLING et al., 2003).

Como se observa na Tabela 1, a quantidade média de macroporos se encontrava próxima do valor mínimo satisfatório às plantas, contudo, em trabalho produzido por Betioli Júnior et al. (2012) que avaliaram a qualidade física de um Latossolo sob plantio direto durante 30 anos, concluíram que para este tipo de manejo esses valores não são limitantes à produção das culturas.

O comportamento bimodal da CRA reflete duas classes distintas de poros: a primeira, que ocorre sob potenciais matriciais baixos, é relativa aos poros muito grandes, que promovem rápida drenagem interna do solo; e a segunda, que sucede sob potenciais matriciais muito altos, refere-se aos poros muito pequenos, onde a água é mantida com energia muito alta, qualificando-a como água higroscópica (OLIVEIRA et al., 2004; CARDUCCI et al., 2011).

Esse comportamento caracteriza uma distribuição mais heterogênea nos tamanhos dos poros do solo, que para o Latossolo em questão apresentou uma boa disponibilidade de água às plantas. Desta maneira, os valores obtidos para o Latossolo estudado corroboram com os de Carducci et al. (2011) que apresentaram elevada friabilidade e porosidade, em decorrência de sua organização microgranular, refletindo na sua boa fertilidade física.

Na Figura 9 é apresentada a curva da resistência do solo à penetração (RP) em função da umidade gravimétrica. O modelo exponencial apresentou a equação: $RP = 12.113 \exp^{(-7,772U)}$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,8964 e coeficiente de

ajuste significativo estatisticamente ($P < 0,01$). A modelagem da RP em função da umidade do solo tem sido utilizada por vários autores (VAZ et al., 2011; ALMEIDA et al., 2012; MOREIRA et al., 2014), porém não existe consenso na utilização de um modelo que melhor expresse essa correlação. Assim sendo, opta-se por escolher o modelo que apresente o melhor coeficiente de determinação.

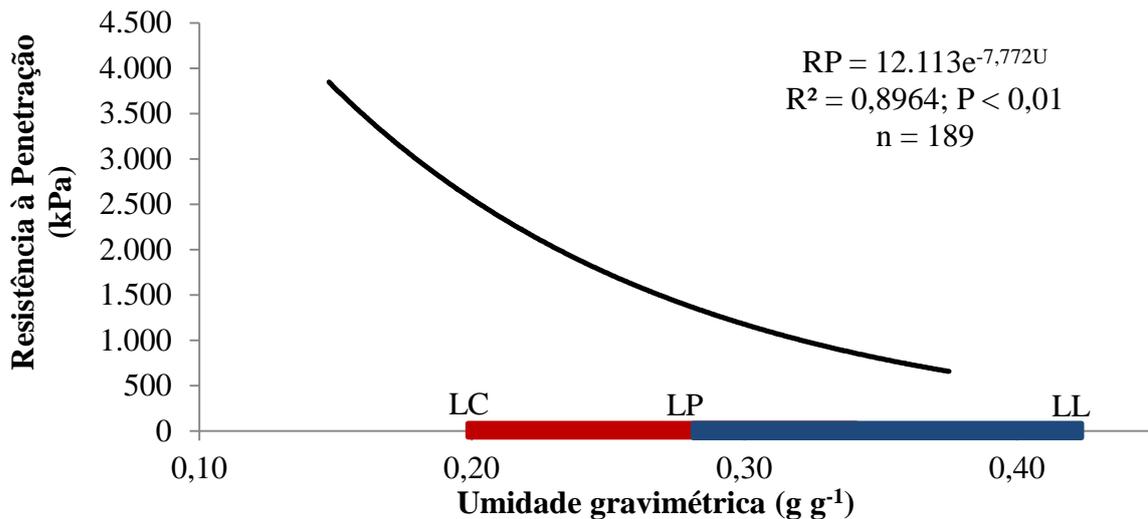


FIGURA 9. Curva da resistência do solo à penetração (kPa) em função da umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$).

LC: Limite de contração; LP: Limite de plasticidade; LL: Limite de liquidez; n: número de amostras.

A partir do modelo ajustado podem-se fazer inferências sobre a dinâmica da resistência do solo à penetração durante o processo de secagem do solo, desde a umidade da capacidade de campo (θ_{CC}) até a do ponto de murcha permanente (θ_{PMP}). Na θ_{CC} ($0,31\ g\ g^{-1}$) o valor da RP é igual a 1.088 kPa, considerado baixo por Arshad et al. (1996), que resulta em condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas (VALICHESKI et al., 2012). No θ_{PMP} ($0,11\ g\ g^{-1}$) o valor da RP é igual a 5.151 kPa (valor estimado pela equação), considerado muito alto por Arshad et al. (1996), sendo este o limite inferior de disponibilidade de água às plantas que limita a sua produção (COSTA et al., 2009).

O valor da resistência do solo à penetração para os diferentes pneus e forças aplicadas à barra de tração é apresentado na Figura 10. A RP não apresentou diferença para os diferentes tipos de pneus, no entanto, diferiu para as diferentes forças ($P < 0,01$), evidenciando tendência linear para o aumento das forças.

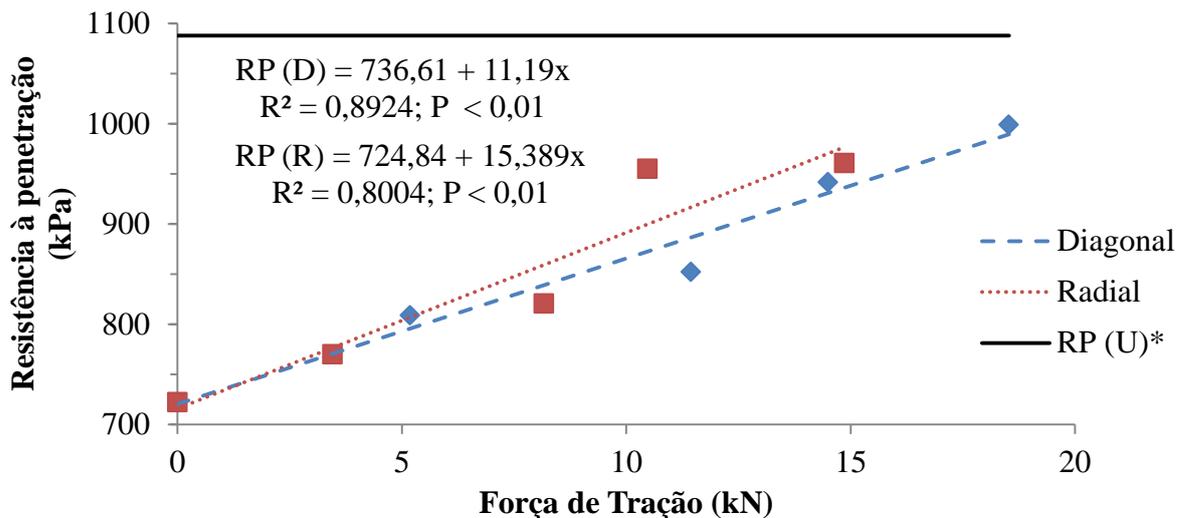


FIGURA 10. Resistência do solo à penetração (kPa) para os diferentes tipos de pneu e diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.

*RP linearizada, a partir da curva de RP, na umidade da capacidade de campo.

A resistência do solo à penetração foi corrigida para a umidade na capacidade de campo (Figura 9). Nota-se que para os dois tipos de pneus e diferentes forças de tração, estes valores não superaram a RP linearizada, assim sendo, os tratamentos não alteraram a estrutura física inicial do solo, ou seja, não houve compactação adicional.

Os dois pneus obtiveram tendência quase que semelhantes para o solo avaliado, sendo que o pneu radial e diagonal apresentaram valor médio de RP de 845,65 e 864,70 kPa, respectivamente. Porém, na força de 10 kN o pneu radial apresentou tendência anômala gerando o valor mais elevado de RP (955,00 kPa), entretanto, não foi suficiente para ocasionar compactação adicional ao solo.

Beutler et al. (2008) relataram que a produção da soja reduziu quando a RP encontrava-se entre 2 e 3 MPa para o teor de água igual a capacidade de campo. Desta maneira, o valor da RP na umidade da capacidade de campo (Figura 9) demonstra que o solo apresenta uma boa estrutura física que facilita o desenvolvimento e crescimento da maioria das culturas, pois seu valor (1.088 kPa) foi bem abaixo daquele considerado crítico pelos autores citados anteriormente. Os pneus não demonstraram qualquer influência negativa sobre esses valores. De acordo com Braida et al. (2006) no plantio direto o solo recebe maior carga na umidade próxima a capacidade de campo, o que favorece a compactação dos solos.

O estado inicial de compactação e o teor de matéria orgânica presentes no solo são os fatores que vão gerar a este uma maior resistência a pressões externas (SILVA et al., 2000). O solo apresentou porosidade total média acima de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e densidade média de $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$, com a porosidade formada principalmente por microporos ($0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), como

pode ser visto na Tabela 1. Desta maneira, o solo apresentou uma estrutura consolidada e pouco susceptível à compactação, que ficou evidente, pois a RP em nenhum dos pneus conseguiu superar o valor da RP encontrado na umidade da capacidade de campo, mesmo para as cargas mais elevadas.

As condições de lastragem líquida e pressão de insuflagem dos pneus foram ajustadas de forma a obter-se as mesmas características de interação solo-pneu para ambos os pneus. Pela RP nota-se que isso de fato ocorreu, sendo que a mesma foi influenciada apenas pelo incremento da força na barra de tração. De acordo com Botta et al. (2008), quando a pressão de insuflagem e pressão exercida pela estrutura do pneu é menor que a pressão exercida pelo solo, a porção do pneu em contato com o solo apresentará uma deflexão, gerando assim, uma maior deformação no pneu que no solo.

Avaliando pneus de tração radiais e diagonais de diferentes dimensões, Botta et al. (2008) obtiveram resultados semelhantes aos deste estudo. Quando avaliando os pneus de configuração 18.4-34 e 18.4R34 a resistência do solo à penetração para os dois pneus não diferiu estatisticamente para um solo sob plantio direto. Estes autores relataram ainda que essa configuração de pneus alterou as propriedades físicas do solo numa mesma proporção, e que para observar a diferença de desempenho de pneus radiais e diagonais estes devem apresentar maiores dimensões.

O modelo de capacidade de suporte de carga (CSC) (Figura 11) apresentou a equação exponencial: $\sigma_p = 561,99\exp^{-3,023U}$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,8169 e coeficiente de ajuste significativo ($P < 0,01$).

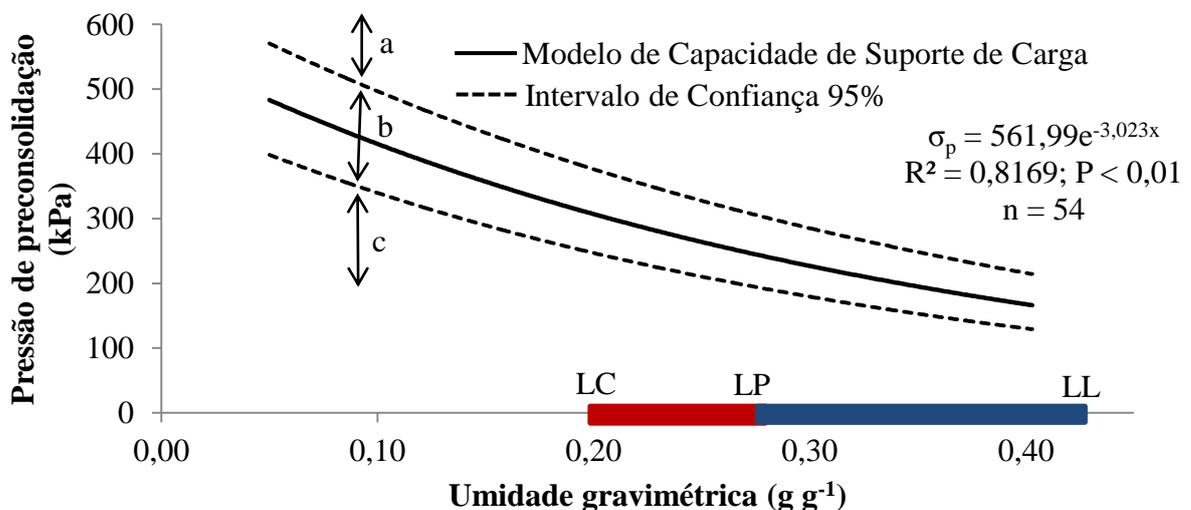


FIGURA 11. Modelagem da capacidade de suporte de carga da área experimental.

LC: Limite de contração; LP: Limite de plasticidade; LL: Limite de liquidez; n: número de amostras; Região a, b e c determinadas segundo Dias Júnior et al. (2014).

Para avaliar o efeito do tráfego sobre a pressão de preconsolidação deve ser construído o modelo de capacidade de suporte de carga (Figura 11), que deve ser dividido em três regiões: (a) uma região onde as pressões de preconsolidação determinadas após o tráfego são maiores do que as do intervalo de confiança superior, sendo considerada como a região onde a compactação adicional do solo já ocorreu; (b) uma região onde os valores das pressões de preconsolidação determinadas após o tráfego estão entre os intervalos de confiança superior e inferior. Esta região indica que não houve compactação do solo, entretanto, ela é importante, pois indica que a compactação do solo poderá ocorrer em uma próxima operação mecanizada, se as pressões aplicadas forem maiores do que as do intervalo de confiança superior e (c) uma região onde os valores das pressões de preconsolidação determinadas após o tráfego são menores do que as do limite inferior de confiança. Esta região indica que não houve compactação (DIAS JUNIOR et al., 2014).

A faixa friável, compreendida entre o LC e LP, tem sido preconizada como sendo a faixa de umidade na qual as operações de preparo de solo devem ser realizadas (KONDO e DIAS JUNIOR, 1999; TAVARES et al., 2012). Para o solo em questão a faixa de pressões que podem ser aplicadas, na extensão da friabilidade, está compreendida entre 320 e 240 kPa, para as umidades de 0,19 e 0,28 kg kg⁻¹, respectivamente. Quando avaliada a região b (o limite superior) estas cargas podem variar de 390 a 305 kPa, sem que ocorra compactação do solo.

No entanto é necessário observar que a umidade crítica, ou seja, umidade na qual ocorre a máxima compactação do solo se encontra próxima ao LP. A fim de evitarem-se os riscos de compactação do solo, deve-se prevenir o tráfego de máquinas quando a umidade estiver próxima ao limite de plasticidade (VASCONCELOS et al., 2012).

Como discutido anteriormente, no plantio direto a umidade em que o solo é manejado vai além da faixa friável, podendo estender-se até meados do limite de liquidez. Desta maneira, a faixa de pressões a qual o solo sob plantio direto estaria sujeito variaria de, aproximadamente, 320 a 198 kPa, para a umidade de 0,19 a 0,35 kg kg⁻¹, respectivamente. Quando avaliada a região b (o limite superior) estas cargas podem variar de 390 a 250 kPa, sem que ocorra compactação do solo.

Cardoso (2007) obteve em seus estudos pressões de contato pneu-solo de 200, 360 e 450 kPa para trator pneumático, colhedora e pulverizador autopropelido, respectivamente. Lamandé e Schjønning (2011) avaliando um solo Holandês (franco argilo-siltoso) quando aplicadas tensões de 30 kN ao mesmo obtiveram pressões de 100 e 268 kPa utilizando pneu radial grande (800/50R34) e pequeno (560/45R22.5), respectivamente. E, em estudos de

Araujo Junior et al. (2011) a magnitude de pressões aplicadas por trator pneumático variam de 200 a 220 kPa até a profundidade de 0,15 m. Desta maneira na faixa friável e no manejo de plantio direto o Latossolo em questão a CSC pode ser considerada como alta e média (SEVERIANO et al., 2010), respectivamente. Devendo-se atentar, em ambos os casos, para a umidade próxima ao LP na qual o solo se encontra mais susceptível à compactação.

Os valores de pressão de preconsolidação (σ_p) para os diferentes pneus e forças aplicadas a barra de tração são apresentados na Figura 12. A σ_p foi corrigida para a umidade na capacidade de campo. Para os tratamentos avaliados não houve diferença ($P>0,05$) e, as pressões aplicadas se encontram na região b.

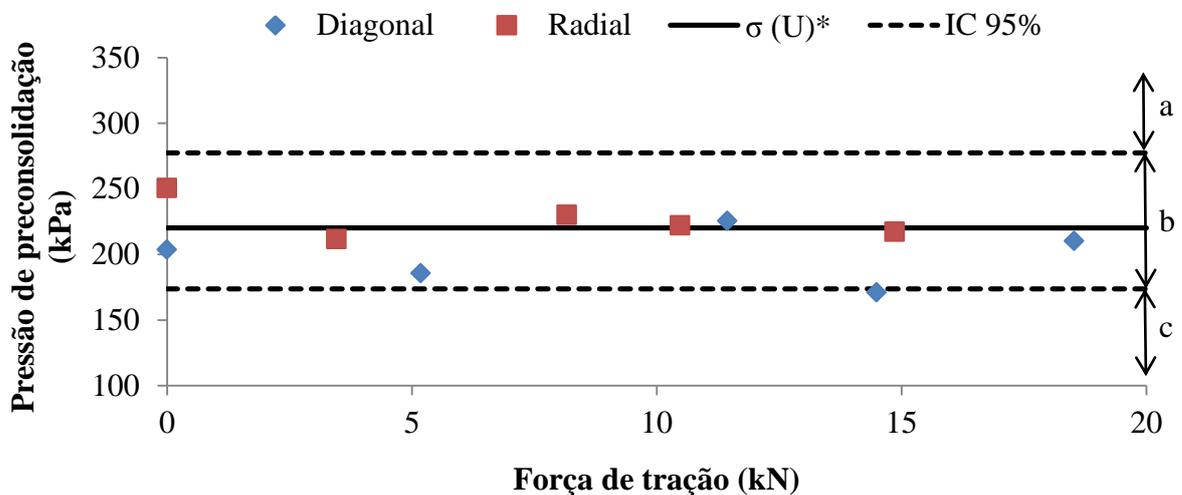


FIGURA 12. Pressão de preconsolidação (kPa) para os diferentes tipos de pneu e diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.

* σ linearizada, a partir da curva de σ_p , na umidade da capacidade de campo. Região a, b e c determinadas segundo Dias Júnior et al. (2014).

Nota-se que para os dois tipos de pneus e diferentes forças de tração, estes valores se encontram na região b da CSC, ou seja, não houve compactação adicional, atentando-se que poderá ocorrer a compactação do solo em uma próxima operação mecanizada, se as pressões aplicadas forem maiores do que as do intervalo de confiança superior.

Os dois pneus apresentaram tendência quase que semelhantes para o solo avaliado, sendo que o pneu radial e diagonal apresentaram valor médio de σ_p de 226,27 e 199,15 kPa, respectivamente. Para as distintas forças aplicadas à barra de tração a amplitude total de variação da σ_p não chegou a 50 kPa. A maior carga aplicada foi encontrada para o pneu radial na força 0 kN, sendo esta igual a 250,50 kPa.

Apesar do solo se encontrar sob teor de água no solo de $0,32 \text{ kg kg}^{-1}$ para o pneu diagonal e de $0,31 \text{ kg kg}^{-1}$ para o pneu radial, cujo valor corresponde ao teor de água da capacidade de campo (Tabela 1).

Barbosa et al. (2005) avaliando o desempenho de um trator agrícola equipado com pneus radiais e diagonais trabalharam com um teor de água de $0,49 \text{ kg kg}^{-1}$, correspondente a 95% do teor de água da capacidade de campo. Dias Junior et al. (2005) avaliando o efeito do tráfego nas operações de colheita do eucalipto, concluíram que na estação seca ($0,15 \text{ kg kg}^{-1}$) o solo apresenta pouco ou nenhum efeito de compactação, mas no período chuvoso ($0,36 \text{ kg kg}^{-1}$) o solo apresentou maior compactação, para a colheita mecanizada.

As áreas agrícolas manejadas sob plantio direto, ocasionalmente apresentam teor de água no solo próximo da capacidade de campo, na época em que são realizadas as operações de semeadura, tratamentos fitossanitários e colheita (STRECK et al., 2004). De modo geral, para a região Centro-Oeste o período de semeadura abrange entre outubro e dezembro (FIETZ e RANGEL, 2008), período este que compreende alto índice de precipitação pluviométrica.

A σ_p obtida após o tráfego para a umidade do solo não ocasionou compactação adicional ao solo, sugerindo assim maior liberdade de tráfego de máquinas para este tipo de manejo. Severiano et al. (2010) relataram que durante a colheita mecanizada da cana-de-açúcar 100% das amostras retiradas de um Latossolo com umidade de $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$ sofreram compactação adicional frente a 50% das amostras de um Cambissolo com umidade de $0,26 \text{ kg kg}^{-1}$, embora este último se encontrava com conteúdo de água 37% acima do primeiro.

Filho et al. (2015) descreveram que quando o solo apresenta cobertura vegetal resulta em uma capacidade de melhor acomodar as garras dos rodados. Desta maneira, ocasiona uma deformação do solo e aprofundamento das garras no perfil, assim a penetração parcial ou total das garras, que dependendo da transferência de peso, fazem com que parte dos flancos toquem o solo, servindo como área de apoio. Nas aplicações das maiores cargas esse efeito foi observado em campo. Como a área de apoio era maior não ocasionou, então, compactação ao solo nas cargas mais elevadas, que apresentava uma massa de matéria seca média de 4.600 kg ha^{-1} .

Botta et al. (2008) concluíram em seus estudos que o pneu radial compacta o solo menos que o pneu diagonal, mas para que esse efeito possa ser observado os pneus devem apresentar grandes dimensões. Esta observação é importante, pois facilita compreender o porquê dos pneus não apresentarem diferença estatística quanto à compactação do solo para o presente estudo.

Os valores de pressões de preconconsolidação aplicados ao solo pelos pneus radiais e diagonais corroboram com aqueles encontrados por vários autores que estudaram o efeito de rodados pneumáticos na compactação dos solos: Silva et al. (2006); Araujo Junior et al. (2011); Lamandé e Schjønning (2011) e Lozano et al. (2013).

4.2. DESEMPENHO OPERACIONAL

Os resultados da análise de variância para as variáveis: potência média na barra de tração, patinagem, consumo horário e específico de combustível, são apresentados na Tabela 4. Observa-se que a potência média na barra de tração, a patinagem e o consumo específico apresentou diferença ($P < 0,01$) para a interação pneu-força, e o consumo horário apresentou diferença ($P < 0,01$) para as distintas forças impostas pelo trator de frenagem.

TABELA 4 - Resumo da análise de variância das variáveis expressa pelo quadrado médio da potência média na barra de tração (kW), patinagem (%), consumo horário ($L h^{-1}$) e consumo específico ($g kW h^{-1}$)

FV	GL	Pot. na barra de tração	Patinagem	Consumo horário	Consumo específico
Bloco	3	3,328	0,0029	0,8234	51.388,60
PNEU	1	293,276**	0,0046*	4,3560 ^{ns}	6.781.522,50**
Resíduo 1	3	0,743	0,0003	2,9197	112.857,26
FORÇA	4	686,029**	0,1793**	9,6915**	177.188.711,79**
PNEU*FORÇA	4	27,318**	0,0131**	2,3070 ^{ns}	858.379,28**
Resíduo 2	24	0,557	0,0021	2,1536	166.131,02
	C.V. 1	7,08	13,15	11,53	10,44
	C.V. 2	6,13	37,46	9,90	12,67
	Média	12,17	12,32	14,82	3.216,30

^{ns}: não significativo ($P > 0,05$); * significativo à 5% de probabilidade ($P < 0,05$); ** significativo à 1% de probabilidade ($P < 0,01$); C.V. 1: Coeficiente de Variação da parcela (%); C.V. 2: Coeficiente de Variação da subparcela (%)

Os resultados referentes ao desempenho operacional dos pneus para o solo em estudo são apresentados nas Figuras 13 a 16. Em todos os casos nota-se que o pneu diagonal comportou-se de forma mais eficaz que o pneu radial. Os estudos que tem comparado o desempenho operacional de pneus radiais e diagonais apresentam uma vantagem no uso dos pneus radiais (WULFSOHN et al., 1988; NEUJAHN e SCHLOSSER, 2001; BARBOSA et al., 2005; MONTEIRO et al. 2011), não corroborando assim com os resultados obtidos neste estudo.

Os pneus utilizados possuíam, aproximadamente, as mesmas dimensões de tamanho, comprimento e largura (Tabela 2), no entanto, se diferem quanto ao número, altura e distância

de garras (Tabela 2). A possível causa de o pneu diagonal ter se comportado melhor na interação solo-pneu se dá pelo modelo construtivo das suas garras, pois quando o solo apresenta alta umidade, este possui baixa resistência cisalhante (IORI et al., 2012b), e o maior número de garra, menor altura e distância entre estas favoreceu o seu desempenho. No entanto, para o pneu radial que apresentava uma maior altura e distância das garras ocasionou em menor aderência com o solo.

A aderência entre o pneu e o solo depende do perfil do pneu (SANTOS, 2002). Como o número de garras eram diferentes entre os pneus, estes apresentavam, também, perfis diferentes. Embora neste trabalho não tenha sido avaliado o perfil dos pneus no desempenho do trator, ficou evidente que esta diferença no número de garra e, conseqüentemente, no perfil dos pneus alterou a interação solo-pneu. Os resultados de desempenho operacional do trator são influenciados pelo tipo de construção, pela pressão de insuflagem, pela carga aplicada, tipo de dispositivo de tração e desgaste dos rodados pneumáticos (MONTEIRO et al., 2011).

As cargas dinâmicas provenientes da interação solo-pneu são originadas do movimento existente entre o rolamento e a deformação do pneu, a rigidez do solo e a patinagem do rodado (KOOLEN et al., 1992). Com a aplicação de carga dinâmica obtém-se informações sobre o desempenho dos rodados na interface solo-pneu (SENATORE e SANDU, 2011). Desta maneira, as condições de solo e cobertura vegetal quando aplicadas cargas dinâmicas se comportaram melhor para o pneu diagonal quando comparado ao radial.

Como pode ser visto na Figura 13 a potência média na barra de tração elevou-se à medida com que houve aumento na carga imposta pelo trator de frenagem. Os resultados indicam, para ambos os pneus, um aumento linear e significativo ($P < 0,01$).

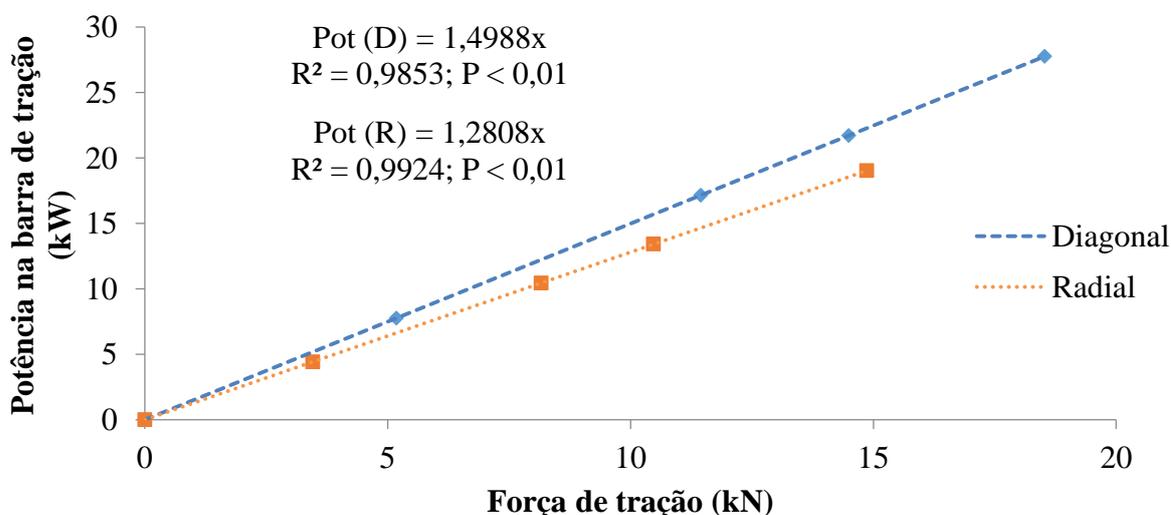


FIGURA 13. Potência média na barra de tração (kW) para os diferentes tipos de pneu e diferentes cargas impostas pelo trator de frenagem.

O solo é um dos fatores que irá interferir nas perdas de força de tração, e cada tipo de solo, teor de água e tipo de pneu (carga aplicada e área de contato pneu-solo) fornecerá uma força de tração (MASIERO, 2010). Como a resistência ao rolamento era baixa (devido ao teor de água do solo) não foi possível obter força de tração acima de 20 kN.

O pneu diagonal, para todas as cargas, apresentou valores maiores de potência imposta à barra de tração que o pneu radial para o solo em questão. O uso do pneu diagonal, na carga de 15 kN, apresentou uma potência 12,38% maior que no uso do pneu radial. Ao contrário daquilo que a literatura tem demonstrado (WULFSOHN et al., 1988; NEUJAHN e SCHLOSSER, 2001; BARBOSA et al., 2005; LOPES et al., 2005) onde o uso de pneu radial proporcionou um ganho na força/potência na barra de tração, neste estudo o desempenho do pneu diagonal foi superior ao pneu radial.

A principal função de um trator agrícola é realizar força de tração (GRISSE et al., 2010). Com a aplicação de cargas dinâmicas obtêm-se resultados do desempenho de diferentes tipos de pneus. Assim sendo, para as condições deste estudo, o pneu diagonal produziu maior força e potência na barra de tração que o pneu radial.

A eficiência de tração depende da patinagem e da resistência ao rolamento (WONG, 2008), desta maneira, quanto maior a patinagem menor será a eficiência de tração. Este efeito foi comprovado neste estudo, sendo que o pneu radial apresentou menor potência na barra de tração e maior patinagem (Figura 13 e 14) frente ao pneu diagonal.

A patinagem dos rodados, para os diferentes pneus, apresentou tendência crescente de acordo com o incremento na força de tração imposta pelo trator de frenagem. Os resultados da patinagem, para ambos os pneus, indicaram uma mesma tendência de resposta em função da força de tração, sendo que essas apresentaram diferença estatística ($P < 0,01$) e tendência quadrática, apresentada na Figura 14.

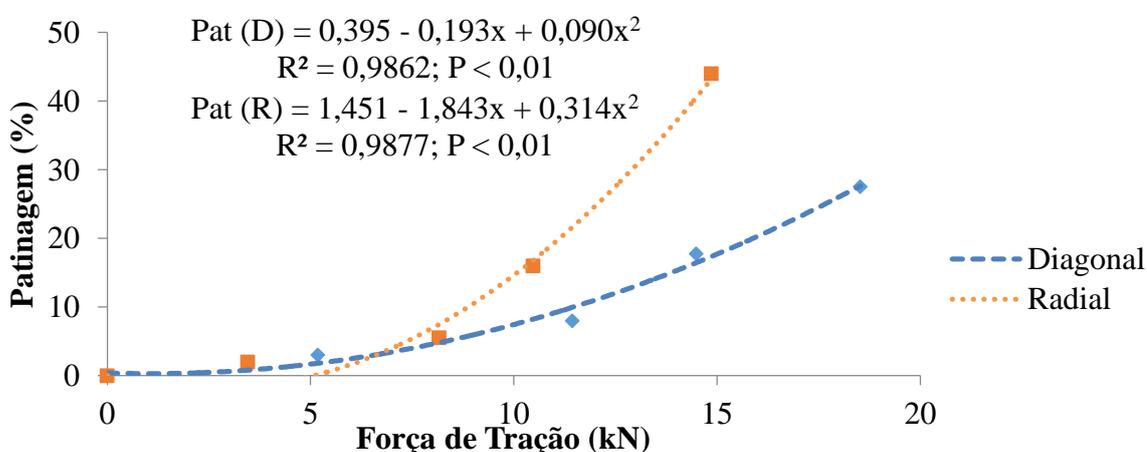


FIGURA 14. Patinagem dos rodados motrizes traseiros (%) para os dois tipos de pneu e diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.

Para o solo analisado foi possível observar que o pneu radial, para as forças acima de 7 kN, apresentou valor de patinagem superior ao pneu diagonal. Na força de 15 kN a patinagem do pneu radial foi 37,50% maior que o pneu diagonal. Para o limite de alta eficiência, ou seja, melhor desempenho de tração que corresponde ao nível de patinagem entre 8% e 10% (ASABE, 1999), o pneu radial sempre patinou mais que o diagonal, ocasionando menores forças na barra de tração.

De acordo com Monteiro et al. (2011), para diferentes condições de cobertura de solo e lastragem de pneus diagonal e radial, o primeiro apresentou maior patinagem, o presente trabalho não corroborou com estes autores e também com Neujahr e Schlosser (2001) que concluíram que o pneu radial apresentou menor índice de patinagem quando comparado ao pneu diagonal submetido à mesma força de tração.

No trabalho de Neujahr e Schlosser (2001) o pneu radial traseiro possuía 36 garras, enquanto o diagonal traseiro possuía 30 garras, neste trabalho o pneu diagonal apresentava um número maior de garras que o pneu radial (Tabela 2). Desta maneira, torna-se notório que sendo maior o número de garras menor será o índice de patinagem do rodado.

A patinagem é utilizada como parâmetro de determinação do desempenho dos rodados (GABRIEL FILHO et al., 2010). Quando a patinagem se encontra dentro da faixa ideal (ASABE, 1999) o pneu apresentou uma boa interação com solo, apresentando maior eficiência de tração e menor consumo de combustível, no entanto se a patinagem ultrapassar os 10% ocasionará em perdas, reduzindo-se então a eficiência do trator e aumentando o consumo de combustível.

A Figura 14 relata, também, que a partir dos 10% de patinagem as curvas dos dois pneus se tornaram mais acentuada, apresentando uma alta ascensão, evidenciando o efeito negativo de alta patinagem no consumo de combustível, corroborando com estudos de Neujahre e Schlosser (2001), Barbosa et al. (2005), Gabriel Filho et al. (2010) e Monteiro et al. (2011).

O consumo horário de combustível (Figura 15) aumentou com o incremento na força de tração exercida pelo trator de frenagem, visto que este aumentou foi significativo ($P < 0,01$). No entanto, o consumo não diferiu estatisticamente para os diferentes tipos de pneus. O aumento do consumo de combustível apresentou tendência quadrática ao acréscimo da força de tração.

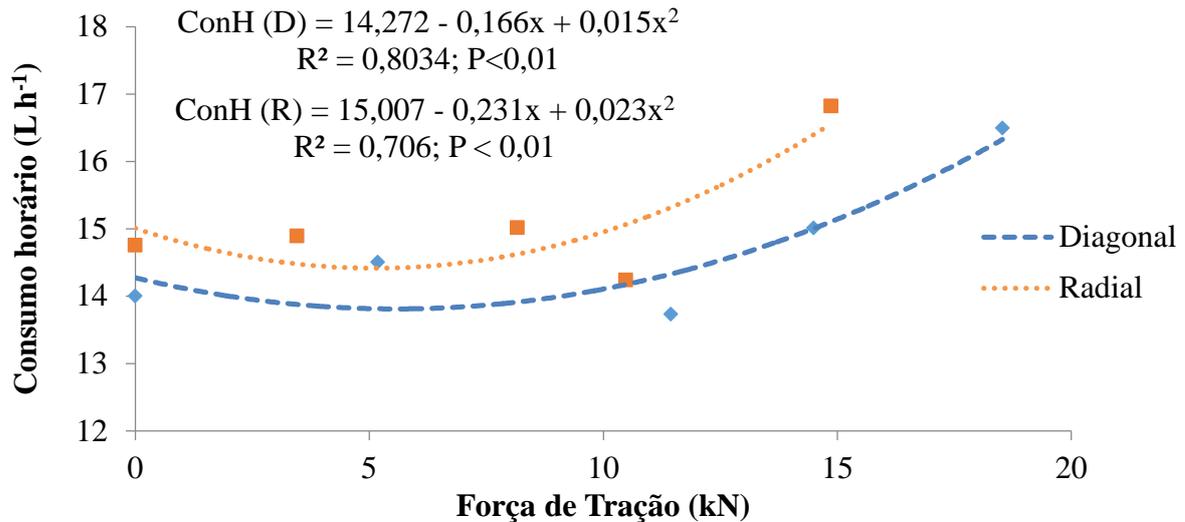


FIGURA 15. Consumo de combustível horário (L h⁻¹) para os diferentes tipos de pneu e diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.

Para ambos os pneus na força de aproximadamente 11 kN houve uma redução no consumo horário de combustível. Constata-se, também, que da força 0 kN para a força 15 kN houve um aumento no consumo de combustível de 12,30% e 15,50% para o pneu radial e diagonal, respectivamente.

A faixa ideal de patinagem (ASABE, 1999) gerou força de tração entre 8 e 13 kN, e é justamente nessa faixa que se obteve o menor consumo de combustível para ambos os pneus. Porém, quando se encontra acima ou abaixo desta faixa o consumo de combustível é maior para ambos os pneus.

Na maior patinagem o consumo de combustível foi, aproximadamente, 10% maior para os dois tipos de pneus, evidenciando assim que se deve trabalhar dentro da faixa ideal de patinagem para obter-se menores índices de consumo de combustível. Estes resultados são semelhantes aos estudos de Monteiro et al. (2011), que encontraram valores menores de consumo de combustível horário quando a patinagem dos rodados diagonais e radiais se encontravam dentro da faixa ideal.

Na Figura 16 é apresentado o consumo específico de combustível. Nota-se uma tendência descendente no consumo específico para o aumento nas cargas impostas à barra de tração. Esta variável apresentou diferença ($P < 0,01$) para a interação pneu-força, e sua tendência foi descrita pela equação quadrática para ambos os pneus.

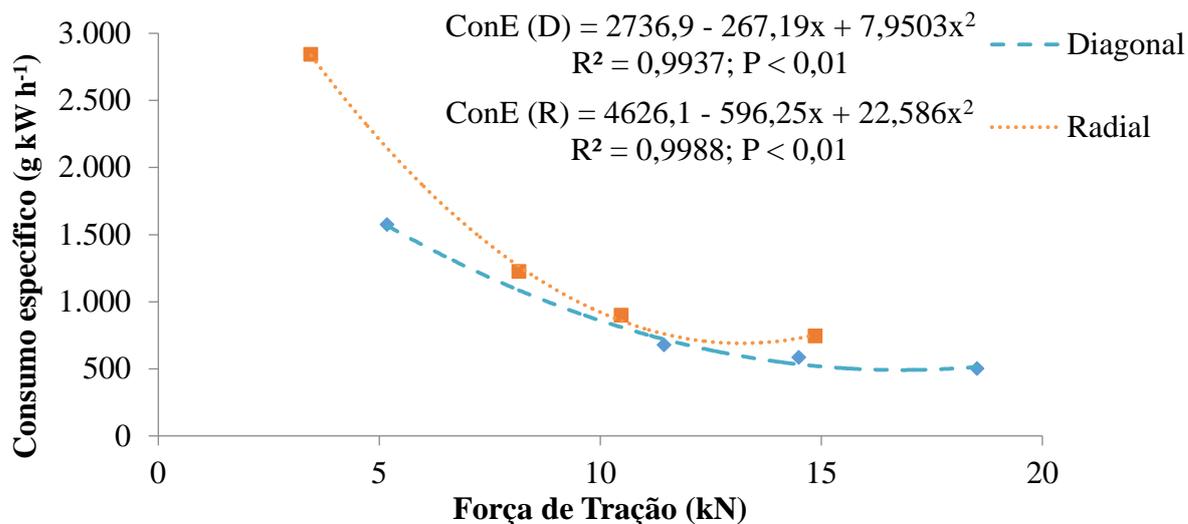


FIGURA 16. Consumo específico de combustível (g kW h^{-1}) para os diferentes tipos de pneu e diferentes forças impostas pelo trator de frenagem.

Como a potência 0 kW não gera consumo específico de combustível, desta maneira, este ponto não consta na Figura 16. Quando adicionadas cargas à barra de tração o maior valor de consumo específico foi encontrado para o pneu radial na carga de 3,50 kN, sendo este igual a $2.842,34 \text{ g kW h}^{-1}$. O maior valor de consumo específico para o pneu diagonal foi de $1.573,18 \text{ g kW h}^{-1}$, na carga de 5,20 kN. Para ambos os pneus a partir da carga de 10 kN o consumo específico atingiu os menores valores.

O consumo específico de combustível foi, em geral, 41,58% maior para o pneu radial quando comparado ao diagonal. Esse resultado não corrobora com Barbosa et al. (2005) que em seus estudos encontraram maior valor, desta variável, para o pneu diagonal quando comparado ao radial. No entanto, corrobora em parte com o trabalho de Monteiro et al. (2011), pois para a condição de solo com cobertura vegetal o valor do consumo específico foi maior para o pneu radial comparado ao diagonal, porém os valores não apresentaram diferença estatística.

Outra tendência averiguada foi que com o aumento da patinagem (ocasionado pelo aumento de força na barra de tração) houve um decréscimo no consumo específico de combustível para ambos os pneus, como era de se esperar. No trabalho de Barbosa et al. (2005) esta tendência foi observada para o pneu diagonal, contudo, para o pneu radial ocorreu o inverso. Lopes et al. (2003) observaram ocorrência de valores mínimos de consumo específico de combustível onde acontecem valores máximos de potência na barra de tração, corroborando assim com os valores aqui obtidos.

5. CONCLUSÕES

Houve incremento no valor da densidade do solo e grau de compactação de mesma intensidade para ambos os pneus, mas que não foram suficientes para causar compactação adicional ao solo, mesmo nas maiores cargas.

A curva de retenção de água no solo não apresentou diferença antes e após o tráfego para o pneu radial. No pneu diagonal, apenas a carga 0 kN reduziu o seu valor sendo insuficiente para causar compactação ao solo.

A resistência do solo à penetração após o tráfego não ocasionou compactação adicional ao solo em nenhum tratamento. O mesmo ocorreu à pressão de preconsolidação, pois todos os tratamentos mantiveram-se na “região b”, caracterizada por não fornecer compactação adicional ao solo.

O pneu diagonal proporcionou maior carga na barra de tração e menor patinação dos rodados que o pneu radial.

Os tipos de pneus utilizados não interferiram no consumo horário de combustível, porém o menor consumo específico foi encontrado para o pneu diagonal, e as maiores cargas para ambos os pneus ocasionaram menores valores de consumo específico de combustível.

O pneu diagonal apresentou melhor desempenho operacional que o radial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 10p.
- 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 I - Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 145-160, 2003.
- ALMEIDA, C. X.; CENTURION, J. F.; JORGE, R. F.; BARBOSA, J. C.; ANDRIOLI, I. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1745-1755, 2012.
- ALVAREZ, R.; STEINBACH, H. S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, p. 1-15, 2009.
- ARATANI, R. G. **Qualidade física e química do solo sob diferentes manejos e condições edafoclimáticas no estado de São Paulo**. 2008. 139 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2008.
- ARATANI, R. G.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 677-687, 2009.
- ARAUJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARAES, P. T. G.; ALCANTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 115-131, 2011.
- ARRUDA, F. B.; ZULLO JR., J.; DE OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 11, p. 11-15, 1987.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. e JONES, A., eds. **Methods for assessing soil quality**. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141. (SSSA Special Publication, 49)
- ASABE – American Society of Agricultural and Biological Engineers. Soil cone penetrometer. **ASAE Standard S313.2**. St. Joseph, 2006, p. 903-904.
- ASABE – American Society of Agricultural and Biological Engineers. Agricultural Machinery Management Data. In: ASABE Standards: **Standards engineering practices data EP496.2**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1999. 343-349 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PNEUS E AROS. **Livro de normas técnicas**. São Paulo, 1994. 108p.
- ATTERBERG, A. **Über die physikalische bodenuntersuchung und über die plastizität der tone**. Inst. Mitt for Bodenkunde, v.1, 1911.

AZEVEDO, I. C. D. **Análise de tensões e deformações em solos**. Viçosa: Ed. UFV, 2007. 323 p.

BARBOSA, J. A.; VIEIRA, L. B.; DIAS, G. P.; DIAS JÚNIOR, M. S. Desempenho operacional de um trator agrícola equipado alternadamente com pneus radiais e diagonais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 474-480, 2005.

BARGER, E. L.; LILJEDAHN, J. B.; CARLETON, W. M.; MCKIBBEN, E. G. **Tratores e seus motores**. São Paulo: Edgar Blucher, 1963. 398 p.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, Á. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 971-982, 2012.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 48, n. 6, p. 863-871, 2005.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; FREDDI, O. S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1591-1600, 2008.

BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L. R.; SCHLEGEL, A. J.; LYON, D. J.; VIGIL, M. F.; MIKHA, M. M.; STAHLMAN, P. W.; RICE, C. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, p.1871-1879, 2009.

BORGES, E. A. **Correlação entre capacidade de campo determinada “in situ” e através de métodos de laboratório**. 1979. 79p. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 1979.

BORGES, J. R.; PAULETTO, E. A.; SOUSA, R. O.; PINTO, L. F. S.; LEITZKE, V. W. Resistência do solo à penetração de um Gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 10, n. 1, p. 83-86, 2004.

BOTTA, G. F.; RIVERO, D.; TOURN, M.; MELCON, F. B.; POZZOLO, O.; NARDON, G.; BALBUENA, R.; BECERRA, A. T.; ROSATTO, H.; STADLER, S. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 101, p. 44–51, 2008.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008, 980 p.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SEQUINATTO, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 477-485, 2008.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. **The wilting coefficient for different plants and its indirect determination**. Washington DC. United States: Department of Agriculture, Bureau of Plant Industries, 1912. 83 p. (Bulletin n.30).

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: USP, EESC, 1998, v. 1, 131 p.

CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas, Fundação Cargil, 1983, 44 p.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997, 132 p.

CARDOSO, E. G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J. L.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; GUIMARÃES, M. F. Soybean root system in function of soil compaction under no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 493-501, 2007.

CARDOSO, V. M. F. **Sustentabilidade estrutural de um solo na região do Alto Paranapanema/SP, submetido a dois sistemas de cultivo**. 2007. 121 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a Equação Duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 77-86, 2011.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine Sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 70, p. 425-433, 1990.

CARVALHO, L. A.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C., CAVALIERI, K. M. V.; SANTOS, C. F. B. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 9, p. 940-949, 2011.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1153-1155, 2004.

CENTURION, J. F.; FREDDI, O. S.; ARATANI, R. G.; METZNER, A. F. M.; BEUTLER, A. N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo de cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 199-209, 2007.

CORRÊA, I. M.; MILAN, M.; RIPOLLI, T. C.; MAZIERO, J. V. G.; YANAI, K.; MENEZES, J. F. Pneu radial e diagonal: desempenho de tração em um trator com tração dianteira auxiliar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 15, p. 45-49, 1995.

CORRÊA, I. M.; MAZIERO, J. V. G.; YANAI, K.; LOPES, A. **Técnicas de determinação da patinagem das rodas motrizes de tratores agrícolas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1999. 15 p. (Boletim Técnico, 179).

COSTA, C. S.; RODRIGUES, J. J. V.; CAVALCANTI, A. C.; MARINHO, L. B.; ALMEIDA NETO, L. A.; SILVA, T. J. A. Água disponível em um Neossolo Quartzarênico após adição de um condicionador mineral do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 524–530, 2009.

DAVILLA, C. **Mecânica dos solos**: notas de aula. 2008. Disponível em <ftp://ftp.cefetes.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Notas%20de%20aula/unidade_4.pdf>. Acesso em: 09 dez. 2015.

DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, D. F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, p. 371-380, 1999.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; MARTINS, P. C. C.; FONSECA, S. Impactos das operações de colheita de madeira na compactação do solo: prevenção e recuperação. In: Encontro Brasileiro de Silvicultura, 3., 2014, Campinas – SP. **Anais...** Campinas, EMBRAPA – Floresta, 2014, v. 1, p. 29-45.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2 p. 175-182, 1996.

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. D.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Org.) **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Mandison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FABRIZZI, K. P.; GARCIA, F. O.; COSTA, J. L.; PICONE, L. I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, p. 57-69, 2005.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, M. M.; MARCOS, Z. Z. Estimativa da capacidade de campo em Latossolo Roxo distrófico e Regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. **Ciência e Prática**, Bebedouro/SP, v. 7, p. 96-101, 1983.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 913-932, 2010.

FERRERAS, L. A.; COSTA, J. L.; GARCIA, F. O.; PECORARI, C. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the Southern "Pampa" of Argentina. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 19-31, 2000.

FIETZ, C. R.; RANGEL, M. A. S. Época de semeadura da soja para a região de Dourados - MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 666-672, 2008.

FILHO, O. J. V.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; LIMA, C. C.; PEREIRA, D. M. G.; LIMA, M. E.; SOUSA, A. C. M.; SOUZA, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 4, p. 322-332, 2015.

FRANZ, C. A. B. **Avaliação do desempenho de pneumáticos para tratores agrícolas, com diferentes níveis de desgaste**. 1988. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1988.

FREITAS, P. L. Aspectos físicos e biológicos do solo. In: LANDERS, J. N. (ed.). **Fascículos sobre experiências em plantio direto nos Cerrados**. Uberlândia: APDC, 1994. Cap. 9. p. 187-196.

FREIRE, J. C. Condutividade hidráulica e capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico não saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 73-77, 1979.

GABRIEL FILHO, A.; LANÇAS, K. P.; LEITE, F.; ACOSTA, J. J. B.; JESUINO, P. R. Desempenho de trator agrícola em três superfícies de solo e quatro velocidades de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 333-339, 2010.

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

GERARD, C. J.; SEXTON, P.; SHAW, G. Physical factors influencing soil strength and root growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 875-879, 1982.

GOEDERT, W. J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 223-227, 2002. (Notas científicas)

GOIÁS – Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de Goiás. Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás – SIMEHGO. **Rede Meteorológica da Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de Goiás. Dados do Município de Anápolis, Estação 22**. <http://www.simehgo.sectec.go.gov.br/cgi-bin/rede_obs/consulta_dados3.pl>. Acessado em 03 fev 2016.

GRISSE, R. D.; PERUMPRAL, J. V.; VAUGHAN, D. G.; ROBERSON, T.; PITMAN, R. **Predicting Tractor Diesel Fuel Consumption**. Virginia Cooperative Extension (VCE): 442-073. 2010. Disponível em: <http://pubs.ext.vt.edu/442/442-073/442-073_pdf.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2015.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 664-668, 2006.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v. 6, p. 65-100, 1987.

HAKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, p. 105-120, 1990.

HERRICK, J. E.; JONES, T. L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1320-1324, 2002.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic, 1980. 413p.

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

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, R. B. Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, p. 185-195, 2012b.

IORI, P.; SILVA, R. B.; DIAS JÚNIOR, M. S.; LIMA, J. M. Preconsolidation pressure as a tool for sustainability analysis of soil structure of soil classes under different uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1448-1456, 2012a.

JAMISON, V. C. Changes in air water relationships due to structural improvement of soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 76, p. 143-151, 1953.

JESUINO, P. R.; LANÇAS, K. P.; GABRIEL FILHO, A.; MASIERO, F. C. Influência do desgaste das garras dos pneus e das condições superficiais do solo nas operações de campo de um trator agrícola. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 26, n. 3, p. 141-159, 2011.

JONG van LIER, Q. de. **Índices da disponibilidade de água para as plantas**. Tópicos em Ciência do Solo, SBCS, v. 1, p. 95-106, 2000.

KAMIMURA, K. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; SANTOS, G. R.; OLIVEIRA, M. S. Capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo em uma lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1457-1465, 2012.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979, 262 p.

KLEIN, V. A. **Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira**. Passo Fundo: Ed. UPF, 2005, 61 p.

KLEIN, V. A.; MADALOSSO, T.; BASEGGIO, M. Ensaio de Proctor normal – análise metodológica e planilhas para cálculo da densidade do solo máxima e teor de água ótimo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 12, n. 2, p. 199-203, 2013.

KLEIN, V. A.; MASSING, J. P.; CAMARA, R. K.; BIASUZ Jr., I. J.; SIMON, M. A. Densidade máxima e relativa de solos sob plantio direto. In: Reunião Brasileira de Manejo e

Conservação do Solo e da Água, 15, 2004, Santa Maria. **Resumos expandidos**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 211-218, 1999.

KOOLEN, A. J.; LERINK, P.; KURSTJENS, D. A. G.; van den AKKER, J. J. H.; ARTS, W. B. M. Prediction of aspects of soil-wheel systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 24, p. 381-369, 1992.

LAMANDÉ, M.; SCHJØNNING, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 114, p. 71-77, 2011.

LANÇAS, K. P., UPADHYAYA, S. K. Pneus radiais para tratores. Guia para a seleção correta da pressão de inflação. **Energia na Agricultura**, FCA/UNESP, Botucatu, 1997. 33 p. Boletim Técnico n 1.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 450-457, 1980.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005, 335 p.

LINARES, P. Transmisiones (I). **Agrotécnica**, Enero, v. 1, p. 71-78, 2001.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19; p. 307-317, 1991.

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**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 366-370, 2005.

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

LOZANO, N.; ROLIM, M. M.; OLIVEIRA, V. S.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 129, p. 61-68, 2013.

MACLEAN, A. H.; YAGER, T. V. Available water capacity of Zambian soils in relation to pressure plate measurements and particle size analyses. **Soil Science**, Baltimore, v. 13, p. 23-29, 1972.

MARCOS, Z.Z. **Morphologic and physical properties of finetextured oxissols state of São Paulo**. 1971. 272 p. Tese (Doutorado em agronomia) – Ohio State University, Ohio/USA, 1971.

MASIERO, F. C. **Determinação do rendimento na barra de tração de tratores agrícolas com tração dianteira auxiliar (4x2 TDA)**. 2010. 79 p. Dissertação (Mestrando em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu, 2010.

MAZETTO, F. R.; LANÇAS, K. P.; NAGAOKA, A. K.; CASTRO NETO, P.; GUERRA, S. P. S. Avaliação do contato pneu-solo em três modelos de pneus agrícolas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 750-757, 2004.

MEDINA, F. B.; OLIVEIRA Jr., R. Relações entre capacidade de campo determinada “in situ” e em laboratório em Latossolo Amarelo muito argiloso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 11, p. 91-95, 1987.

MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: Ensaio e certificação**. Piracicaba: Fundação de estudos agrários Luiz de Queiroz, 1996. 722 p.

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

MICHELIN. **Technical data MICHELIN Agribib**. 2015. 29p.

MOLCHANOV, E. N.; SAVIN, I. YU; YAKOVLEV, A. S.; BULGAKOV, D. S.; MAKAROV, O. A. National approaches to evaluation of the degree of soil degradation. **Eurasian Soil Science**, Pochvovedenie, v. 48, n. 11, p. 1268-1277, 2015.

MONTEIRO, L. A.; ALBIERO, D. SOUZA, F. H.; MELO, R. P.; CORDEIRO, I. M. Rendimento na barra de tração de um trator agrícola com diferentes relações de peso e potência. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n.1, p. 70-75, 2013.

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

MOREIRA, F. M.; DECHEN, S. C. F.; SILVA, A. P.; FIGUEIREDO, G. C.; de MARIA, I C.; PESSONI, P. T. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho cultivado em sistema semeadura direta por 25 anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 118-127, 2014.

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**, Jaboticabal, 2002.

NAIME, J. M.; JUNIOR, J. F.; RABELO, L. M.; VAZ, C. M. P. **Penetrômetro dinâmico automatizado** – Versão eletrônica. São Carlos, Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2006. (Boletim Técnico, 79)

NEIRO, E. S.; MATA, J. D. V.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A.; PINTRO, J. C.; COSTA, J. M. Resistência do solo à penetração de um Latossolo Vermelho distroférico, com rotação e sucessão de culturas, sob plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 25, p. 19-25, 2003.

NEUJAHR, E. B.; SCHLOSSER, J. F. Tendência de pneus agrícolas radiais e diagonais em relação à tração. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 21, n. 2, p. 180-189, 2001.

OJENIYI, S. O.; DEXTER, A. R. Soil factors affecting the macrostructures produced by tillage. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 22, p. 339-343, 1979.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Alterações estruturais e tendência compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 291-299, 2003.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 327-336, 2004.

OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; MELLO, C. R. Dinâmica da resistência do solo à penetração de um Latossolo Vermelho da microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 265-270, 2007.

ORTIGARA, C.; KOPPE, E.; LUZ, F. B.; BERTELLO, A. M.; KAISER, D. R.; SILVA, V. R. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 619-626, 2014.

ORTIZ-CAÑAVATE, J. **Tractores: técnica y seguridad**. 2. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2012. 222 p.

PEDROTTI, A.; PAULETO, E. A.; CRESTANA, S.; FERREIRTA, M. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 521-529, 2001.

PERDOK, U. D.; KROESBERGEN, B.; HOOGMOED, W. B. Possibilities for modeling the effect of compression on mechanical and physical properties of various Dutch soil types. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, p. 61-75, 2002.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006, 354 p.

PIRELLI. **Pneus agrícolas: gama de produtos**. 2015. 13p.

PROCTOR, R. R. Fundamental principles of soil compaction. **Engineering News Record**, New York, v. 111, n. 3, p. 245-248, 1933.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 12, p. 211-216, 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceito, processo e aplicações**. Barueri: Manole, 2004, 478 p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: JONG van LIER, Q. (Eds.). **Física do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 29-102.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teses. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, 2006.

RICHARDS, L. A.; WALDLEIGH, C. H. Soil water and plant growth. **Soil physical conditions and plant growth**. Madison: ASA, 1952. 31p.

ROMANO, I.; SANTINI, A. Water retention and storage: field. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Eds.) **Methods of soil analysis**. Part 4. Physical methods. Mandison: Soil Science Society of America, 2002. p. 721-738.

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

SÁ, M. A. C.; SANTOS JÚNIOR, J. D. G. **Compactação do Solo**: consequências para o crescimento vegetal. Planaltina: Embrapa Cerrado, 2005. 26p.

SÁ, P. C. C.; VALE, C. N. C.; MAIA, C. E.; LEVIEN, S. L. A. Índice S e área sob a curva de retenção de água para avaliar qualidade física do solo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 2, p. 110-114, 2010.

SALTER, P. J.; HAWORTH, F. The available - water capacity of a sandy loam soil. I. A critical comparison of methods of determining the moisture content of soil at field capacity and the permanent wilting percentage. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 12, p. 326-334, 1961.

SANTOS, F. A. O pneu na agricultura. **Revista Alcoolbrás**, São Paulo. n. 71, p. 50-58, 2002.

SEMMEL, H.; HORN, R.; HELL, U.; DEXTER, A. R.; SCHULZE, E. D. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 3, p. 113-129, 1990.

SENATORE, C.; SANDU, C. Torque distribution influence on tractive efficiency and mobility of off-road wheeled vehicles. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v. 48, p. 372-383, 2011.

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

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. 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**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1419-1427, 2008.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 81-93, 1997.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações

mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 207-216, 2006.

SILVA, A. R.; 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**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 547-554, 2011.

SILVA, R. B. S. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. 2002. 142 p. Tese (Doutorado em agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

SILVA, R. B.; MASQUETO, B. J.; LANÇAS, K. P.; SILVA, F. A. M. Desenvolvimento, automação e desempenho de um consolidômetro com interface homem-máquina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 416-427, 2015.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 795-801, 2000.

SILVEIRA, G. M. **Os cuidados com o trator**. 2. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1988. 245 p.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 4, p.603-612, 2012.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.

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. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42; p. 1159-1167, 2007.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KUNZ, M.; LIMA, C. L. R. Grau de compactação e sua influência nas propriedades físicas do solo e rendimento da soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 30. Recife, Pernambuco. 2005. **Resumos expandidos**.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 963-973, 2008.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 487-494, 2008.

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MAGALHÃES, A. G.; BARRETO, M. T. L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1206-1214, 2012.

TAYLOR, H. M.; BURNETT, E. Influence of soil strength on root growth habits of plants. **Soil Science**, Baltimore, v. 98, p. 174-180, 1964.

TAYLOR, H. M.; GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 102, p. 153-6, 1963.

THOMASSON, A. J. Towards an objective classification of soil structure. **Journal Soil Science**, Philadelphia, v. 29, p. 38-46, 1978.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência do solo à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 333-339, 1996.

VALICHESKI, R. R.; GROSSKLAUS, F.; STÜRMER, S. L. K.; TRAMONTIN, A. L.; BAADE, E. S. A. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 969-977, 2012.

van GENUCHTEN, M. TH.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. Environmental Protection Agency, United States. 1991.

VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; MOURA, G. B. A.; ROLIM, M. M.; MONTENEGRO, C. E. V. Compactabilidade de um Latossolo Amarelo distrocóeso dos tabuleiros costeiros de Alagoas sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 537-545, 2012.

VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; MARIA, I. C. de; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, Amsterdam, v. 166, n. 1, p. 92-101, 2011.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 104-113, 2007.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 32, p. 181-193, 1931.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 68, p. 75-94, 1949.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 4, p. 242-246, 1966.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, 2003.

WONG, J. Y. **Theory of ground vehicles**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2008. 592 p.

WULFSOHN, D.; UPADHYAYA, S. K.; CHANCELLOR, W. J. Tractive characteristics of radial ply and bias ply tyres in a California soil. **Journal of Terramechanics**, Great Britain, v. 25, n. 2, p. 111-134, 1988.

ZOZ, F., GRISSE, R. D. **Traction and tractor performance**. St Joseph: ASAE. 2003. 46 p.