

JARDÊNIA RODRIGUES FEITOSA

**INFLUÊNCIA DA PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS E DA VELOCIDADE
NOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE UM TRATOR AGRÍCOLA E NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, para
obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2014**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

F311i
2014 Feitosa, Jardênia Rodrigues, 1990-
Influência da pressão interna dos pneus e da velocidade nos
parâmetros operacionais de um trator agrícola e nas propriedades
físicas do solo / Jardênia Rodrigues Feitosa. – Viçosa, MG,
2014.

xiv, 87f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Haroldo Carlos Fernandes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.76-87.

1. Tratores agrícolas. 2. Máquinas agrícolas - Tração.
3. Solos - Compactação. 4. Solos - Erosão. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

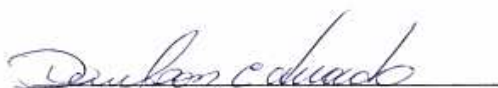
CDD 22. ed. 631.372

JARDÊNIA RODRIGUES FEITOSA

**INFLUÊNCIA DA PRESSÃO INTERNA DOS PNEUS E DA VELOCIDADE
NOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE UM TRATOR AGRÍCOLA E NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, para
obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

APROVADA: 17 de fevereiro de 2014.



Denilson Eduardo Rodrigues



Mauri Martins Teixeira
(Coorientador)



Haroldo Carlos Fernandes
(Orientador)

“Há tantos que passam toda a existência em lamúrias, trancafiados nos pequenos problemas do cotidiano. Vida desperdiçada. Vida sem utopias, sem sonhos, sem ilusões. Vida sem vida! [...] É preciso que os incomodados vençam os acomodados. E que os inquietos vençam os magoados. E que uma força nova surja a cada dia nascida da coragem de quem não tem medo dos acontecimentos nem espera que eles aconteçam.”

Gabriel Chalita

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Marly e Joaquim pelo incentivo, força e compreensão.

À minha irmã Isabel Cristina pelo companheirismo e pela alegria compartilhada.

À Deus por todas as oportunidades a mim concedidas.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização do curso de Pós-Graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Haroldo Carlos Fernandes pela oportunidade, orientação, paciência e conselhos.

Aos professores coorientadores Paulo Roberto Cecon e Mauri Martins Teixeira pela ajuda e sugestões dadas.

Aos amigos e colegas da Mecanização pelo companheirismo diário, em especial, Daniel, Anderson Costa, Anderson Candido, Marconi, Mateus, Paulo, Juliana, Larissa, Remo, Danilo e Raquel pelas contribuições dadas à realização deste trabalho.

Aos amigos Juliana Granja, Tércio e Mayara, pela amizade, ajuda e incentivo.

Aos funcionários da “Horta Nova”, em especial, Gabriel e Adriano pelo apoio durante a realização do experimento.

À Danilo, Marcelo, Geraldo e demais funcionários do Laboratório de Mecanização Agrícola.

À todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

JARDÊNIA RODRIGUES FEITOSA, filha de Joaquim Rodrigues Nogueira de Alencar e Antonia Marly Alves Feitosa, nasceu em Juazeiro do Norte, Ceará, em 17 de agosto de 1990.

De 2004 a 2006, formou-se no ensino médio na Escola de Ensino Fundamental e Médio Dona Carlota Távora, em Araripe, Ceará.

De 2007 a 2012 graduou-se em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, Pernambuco.

Em 2012, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Mestrado, área de concentração em Mecanização Agrícola, pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 2014, submeteu-se aos exames de defesa da dissertação, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE QUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
1. Introdução	15
2. Revisão Bibliográfica	18
2.1. Tratores agrícolas	18
2.2. Interação máquina-solo	19
2.2.1. Área de contato pneu-solo	21
2.2.2. Pressão de contato aplicada ao solo	22
2.2.3. Deslizamento dos rodados	23
2.3. Pressão interna dos pneus	24
2.4. Velocidade dos tratores agrícolas	26
2.5. Propriedades físicas do solo afetadas pelo tráfego de máquinas agrícolas	27
2.5.1. Densidade do solo	28
2.5.2. Porosidade total do solo	29
2.5.3. Resistência do solo à penetração	30
2.6. Relação mecânica e avanço cinemático	31
3. Material e Métodos	33
3.1. Trator	34
3.1.2. Pneus utilizados	35
3.1.3. Pressão interna dos pneus	36
3.1.4. Velocidade operacional	37
3.2. Instrumentação e avaliação de parâmetros referentes ao trator	37
3.2.1. Velocidade operacional do trator (V_{op})	38
3.2.2. Rotação dos eixos motrizes	38
3.2.3. Raio de rolamento	39
3.2.4. Deslizamento dos rodados	40
3.2.5. Relação mecânica entre os eixos	40
3.2.6. Relação entre os raios de rolamento dianteiro e traseiro	40
3.2.7. Avanço cinemático	41

3.2.8	Peso do trator	41
3.2.9	Área de contato pneu-solo	41
3.2.10.	Pressão de contato aplicada ao solo	44
3.3.	Propriedades físicas do solo	44
3.3.1.	Teor de água do solo	44
3.3.2.	Densidade do solo	45
3.3.3.	Densidade de partículas	45
3.3.4.	Porosidade total	46
3.3.5.	Resistência do solo à penetração	46
3.4.	Análise estatística	47
4.	Resultados e discussão	48
4.1.	Avaliação dos parâmetros relacionados ao trator e sua interação com o solo	48
4.1.1.	Raio de rolamento.....	48
4.1.2.	Relação entre os raios de rolamento dianteiro e traseiro.....	48
4.1.3.	Relação mecânica entre eixos	49
4.1.4.	Avanço cinemático.....	49
4.1.5.	Deslizamento dos rodados	50
4.1.6.	Peso estático do trator	52
4.1.7.	Área de contato pneu-solo em condições estáticas.....	52
4.1.8.	Pressão de contato	54
4.2.	Avaliação dos parâmetros relacionados ao solo.....	57
4.2.1.	Teor de água do solo	58
4.2.2.	Densidade do solo (D_S).....	58
4.2.3.	Porosidade total do solo (P_T)	62
4.2.4.	Índice de cone e perfil penetrométrico	66
5.	Conclusões	75
6.	Referências bibliográficas	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição granulométrica do solo nas diferentes profundidades após preparo.....	33
Tabela 2. Especificações do trator John Deere® 5705.....	35
Tabela 3. Especificações nominais dos pneus utilizados	36
Tabela 4. Combinações de pressões internas aplicadas aos pneus do trator nos eixos dianteiro e traseiro	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Valores médios para o raio de rolamento dos pneus dianteiros e traseiros utilizados, na condição de TDA acionada e nas diferentes pressões internas	48
Quadro 2. Relação entre os raios de rolamento para cada combinação de pressões utilizada no experimento.....	49
Quadro 3. Avanço cinemático para cada combinação de pressões utilizada ..	49
Quadro 4. Valores médios do deslizamento dos rodados do trator para as diferentes combinações entre pressões internas e velocidades de deslocamento e as respectivas equações ajustadas.	51
Quadro 5. Coeficientes de correlação entre as variáveis: deslizamento dos rodados (DR), densidade do solo (D_S), porosidade total (P_T) e índice de cone (IC).....	52
Quadro 6. Peso estático do trator e sua respectiva distribuição entre os eixos e rodados	52
Quadro 7. Valores estimados da pressão média de contato total aplicada ao solo	57
Quadro 8. Valores médios de densidade do solo (D_S) nas diferentes profundidades amostradas e momentos de coleta	62
Quadro 9. Decréscimos na porosidade total do solo (P_T) em função das pressões internas dos pneus e velocidades e as respectivas equações ajustadas.	64
Quadro 10. Porosidade total do solo (P_T) nas diferentes profundidades amostradas e momentos de coleta	65
Quadro 11. Acréscimos no índice de cone (IC) em função das combinações de pressões e velocidades de deslocamento e as respectivas equações ajustadas	67
Quadro 12. Índice de cone (IC) nas diferentes profundidades amostradas e momentos de coleta.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Velocidades e forças básicas em uma roda e força resultante da reação do solo. (Fonte: ASAE, 2003)	20
Figura 2. Área experimental após preparo do solo e demarcação das parcelas.	34
Figura 3. Trator John Deere® utilizado no experimento.	35
Figura 4. Calibração da pressão interna dos pneus do trator.	36
Figura 5. Sistema cinemático e transdutor de pressão utilizados no experimento.	37
Figura 6. Unidade de radar para medida da velocidade instantânea do trator.	38
Figura 7. Transdutor indutivo usado na determinação da velocidade de rotação dos rodados do trator.	39
Figura 8. Caixa de solo construída para determinação da área de contato pneu-solo.	42
Figura 9. Procedimento adotado para determinação da área de contato entre os pneus usados no experimento e o solo.	43
Figura 10. Determinação da área de contato pneu-solo no AutoCAD 2011.	44
Figura 11. Coleta de amostras para determinação da densidade do solo.	45
Figura 12. Amostragem para avaliação da resistência do solo à penetração e penetrômetro utilizado.	46
Figura 13. Área de contato entre os pneus traseiros e solo em função da pressão interna dos pneus. *: Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.	53
Figura 14. Área de contato entre os pneus dianteiros e o solo em função da pressão interna dos pneus.	53
Figura 15. Pressão média de contato (P_c) aplicada à superfície do solo pelos pneus traseiros do trator nas diferentes pressões internas. *: Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.	55
Figura 16. Pressão média de contato (P_c) aplicada à superfície do solo pelos pneus dianteiros do trator nas diferentes pressões internas.	55

Figura 17. Pressão média de contato (P_c) aplicada à superfície do solo pelos pneus traseiros do trator em função das áreas de contato obtidas. *: Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.	56
Figura 18. Densidade do solo antes e após o tráfego do trator na área. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste “t” ao nível de 5% de probabilidade.	59
Figura 19. Incremento na D_s em função das combinações de pressões aplicadas aos pneus. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. P1: (82,74; 96,53 kPa); P2: (96,53; 110,32 kPa); P3: (110,32;124,11 kPa).	60
Figura 20. Incremento na D_s em função das velocidades de deslocamento do trator.	61
Figura 21. Porosidade total do solo (P_T) antes e após o tráfego do trator na área. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste “t” ao nível de 5% de probabilidade.....	63
Figura 22. Perfis penetrométricos obtidos antes e após a passagem do trator para a velocidade V1: 4,27 km h ⁻¹ . P1: (82,74; 96,53 kPa); P2: (96,53; 110,32 kPa); P3: (110,32;124,11 kPa). C P A: Comprimento do perfil amostrado.	70
Figura 23. Perfis penetrométricos obtidos antes e após a passagem do trator para a velocidade V2: 5,43 km h ⁻¹ . P1: (82,74; 96,53 kPa); P2: (96,53; 110,32 kPa); P3: (110,32;124,11 kPa). C P A: Comprimento do perfil amostrado.	71
Figura 24. Perfis penetrométricos obtidos antes e após a passagem do trator para a velocidade V1: 7,31 km h ⁻¹ . P1: (82,74; 96,53 kPa); P2: (96,53; 110,32 kPa); P3: (110,32;124,11 kPa). C P A: Comprimento do perfil amostrado.	72

RESUMO

FEITOSA, Jardênia Rodrigues M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2014. **Influência da pressão interna dos pneus e da velocidade nos parâmetros operacionais de um trator agrícola e nas propriedades físicas do solo.** Orientador: Haroldo Carlos Fernandes. Coorientadores: Mauri Martins Teixeira e Paulo Roberto Cecon.

A maior facilidade para a aquisição de tratores tem contribuído para expandir o uso destas máquinas nas propriedades rurais brasileiras trazendo diversos benefícios ao setor agrícola. Embora seu uso garanta maior eficiência e rentabilidade às atividades agrícolas, o tráfego intenso dos tratores causa alterações na qualidade física do solo, podendo desencadear processos de compactação e erosão. Alterações na densidade do solo, porosidade total e resistência do solo à penetração são indicativas do processo de compactação do solo ocasionado pela aplicação de pressões ao mesmo durante o tráfego de máquinas. Fatores como a distribuição do peso do trator, pressão interna dos pneus, área de contato entre o pneu e o solo, velocidade e intensidade de tráfego influenciam no processo de compactação do solo, além de afetar o desempenho operacional do trator. Diante disto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar a influência da alteração da pressão interna dos pneus e da velocidade de deslocamento de um trator agrícola 4 x 2 com tração dianteira auxiliar (TDA) nas propriedades físicas do solo e nos parâmetros avanço cinemático, deslizamento dos rodados, área de contato pneu-solo e pressão aplicada à superfície do solo pelo trator. O experimento e as demais determinações foram realizadas no campus da Universidade Federal de Viçosa, MG, utilizando-se um trator agrícola 4 x 2 TDA equipado com pneus diagonais. As áreas de contato entre os pneus e o solo e as pressões aplicadas ao solo pelo trator foram determinadas em condições estáticas, quando os pneus foram calibrados com as pressões 82,74, 96,53, 110,32 e 124,11 kPa. Para a avaliação da modificação das propriedades físicas do solo ocasionadas pelo tráfego, foi instalado um experimento em campo, no qual foram avaliadas três combinações de pressões internas aplicadas aos pneus dianteiros e traseiros, (P1: (82,74; 96,53 kPa); P2: (96,53; 110,32 kPa); P3: (110,32; 124,11 kPa)) e três velocidades (V1: 4,27 km h⁻¹; V2: 5,43 km h⁻¹; V3: 7,31 km h⁻¹), determinando-se a densidade do solo, a porosidade total e a resistência do solo à penetração, que foram utilizadas como parâmetros para avaliação da

compactação. Foram determinados ainda o avanço cinemático e o deslizamento dos rodados do trator. Os resultados obtidos demonstraram que a combinação de pressão P3 levou à obtenção de um valor considerado ideal para o avanço cinemático do trator, e que as diferentes combinações de pressões e velocidades não alteraram significativamente o deslizamento dos rodados. A redução da pressão interna dos pneus de 124,11 para 82,74 kPa aumentou em 25% a área de contato pneu-solo dos pneus traseiros, e reduziu em 24% a pressão média de contato aplicada ao solo pelos mesmos. A densidade do solo e a porosidade total foram afetadas pelo tráfego do trator estudado, sendo as maiores alterações na porosidade ocasionadas pela aplicação da combinação de pressão P3 (110,32; 124,11 kPa) e velocidade V2 ($5,43 \text{ km h}^{-1}$), e observadas com maior intensidade na faixa de 0,0 a 0,10 m de profundidade.

ABSTRACT

FEITOSA, Jardênia Rodrigues, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2014. **Influence of tire internal pressure and speed in operational parameters of a farm tractor and the physical properties of soil.** Adviser: Haroldo Carlos Fernandes. Co-advisers: Mauri Martins Teixeira and Paulo Roberto Cecon.

Easier to acquire tractors has contributed to expand the use of these machines in Brazilian farms bringing many benefits to the agricultural sector. Although its use ensures greater efficiency and profitability of agricultural activities, the traffic of tractors cause changes in soil physical quality and can trigger processes of compaction and erosion. Changes in density, porosity and soil penetration resistance are indicative of soil compaction caused by the application of pressures at the same during machinery traffic. Factors such as the weight distribution of the tractor, internal tire pressure, the contact area between the tire and the ground, speed and traffic intensity influence the compaction process and affect the operating performance of the tractor. Given this, the aim with this study was to evaluate the influence of the change of the internal pressure of the tires and the travel speed of a MFWD farm tractor in the physical properties of soil and the parameters kinematics advance, slip of wheelsets, area of tire-soil contact and pressure applied to the soil surface by the tractor. The experiment and other determinations were performed at the Federal University of Viçosa, MG, using a MFWD farm tractor equipped with diagonal tires construction. The areas of contact between the tires and the ground and the pressures applied to the soil by tractor were determined under static conditions, when the tires were inflated to the pressures 82.74, 96.53 and 110.32 kPa. For the evaluation of change in physical properties of the soil caused by traffic, a field experiment was installed in which three combinations of internal pressure applied to the front and rear tires were evaluated (P1: (82.74, 96.53 kPa), P2: (96.53, 110.32 kPa), P3: (110.32, 124.11 kPa)) and three speeds (V1: 4, 27 km h⁻¹, V2: 5.43 km h⁻¹, V3 7.31 km h⁻¹), determining the bulk density, porosity and resistance soil penetration, which were used as parameters for evaluation of compaction. Still the kinematics advance and the slip of wheelsets of the tractor were determined. The results demonstrated that the combination of pressure P3 led to obtain a value considered ideal for the kinematics advance of the tractor, and that different combinations of pressures and speeds did not significantly alter

the slip of wheelsets. The reduction of the internal pressure of the tires 124.11 to 82.74 kPa increased by 25% the area of tire-soil contact of the rear tires, and reduced by 24% the average contact pressure applied to the soil for the same. Soil bulk density and total porosity were affected by tractor traffic studied with the greatest changes in porosity caused by the application of the combination of pressure P3 (110.32; 124.11 kPa) and V2 speed (5.43 km^{-1}), and observed with greater intensity in the range from 0.0 to 0.10 m depth.

1. Introdução

Os tratores agrícolas são a fonte de potência mais utilizada nas operações agrícolas, transformando a energia contida no combustível em potência disponível para tracionar e acionar as máquinas e implementos. Sua crescente utilização tem contribuído ao longo do tempo para o aprimoramento da agricultura tornando-a não apenas uma prática de subsistência, mas sim, uma atividade empresarial, capaz de garantir o abastecimento de produtos agrícolas em larga escala e de gerar emprego e renda para a população.

Na última década a aquisição e uso das máquinas agrícolas (tratores e colhedoras) nas propriedades rurais brasileiras, sejam elas de pequeno, médio ou grande porte, tem-se intensificado visivelmente. Essa expansão deve-se a fatores como o crescimento da demanda por produtos agrícolas e a criação do Programa de Modernização da Frota de Tratores Agrícolas e Implementos Associados e Colheitadeiras (Moderfrota), em 2000, que permitiu a muitos agricultores renovarem a sua frota ou adquirirem suas primeiras máquinas.

A disponibilização de outras linhas de crédito a serem utilizadas pelos agricultores para a aquisição de máquinas e implementos, bem como a organização dos pequenos produtores em cooperativas ou associações, permitiu que a mecanização das atividades agrícolas se difundisse, elevando a venda interna de tratores e demais máquinas e melhorando a capacidade de produção dos agricultores brasileiros.

De acordo com a ANFAVEA (2013) foram comercializados no Brasil em 2013, 61.128 tratores agrícolas entre nacionais e importados, podendo-se observar o crescimento dessas vendas no mercado interno ao comparar esse volume de vendas com o obtido há dez anos (1993), que foi de 21.396 tratores de pneus.

A crescente utilização dos tratores nas propriedades trouxe inúmeros benefícios ao setor agrícola. Porém, alguns aspectos associados ao seu uso precisam ser avaliados, uma vez que obter uma boa produtividade não depende unicamente da tecnologia empregada, seja ela em máquinas, sementes ou fertilizantes, mas também de aspectos edafoclimáticos entre os quais se encontra a qualidade do solo cultivado.

O intenso tráfego de máquinas leva à modificação de propriedades do solo tais como densidade, volume de poros, capacidade de infiltração de água,

aeração e resistência do solo à penetração, que influenciam significativamente o desenvolvimento das culturas. Para Valicheski et al. (2012), a mecanização tem contribuído para o processo de degradação dos solos por meio da modificação de suas propriedades físicas, desencadeando processos de compactação e erosão.

O processo de compactação consiste no decréscimo do volume de solos não saturados em que a porosidade e a permeabilidade são reduzidas e a resistência aumentada quando uma determinada pressão externa é aplicada ao solo (CUNHA et al., 2009). Reichert et al. (2007), aponta a compactação como uma consequência indesejada da mecanização, que ocasiona a redução da produtividade biológica do solo, podendo torná-lo inadequado ao crescimento das plantas.

A distribuição do peso do trator; dimensões, tipo de estrutura e pressão interna dos pneus; área de contato e pressão de contato entre o pneu e o solo; velocidade; intensidade de tráfego e operações realizadas pelos tratores, são fatores que influenciam o processo de compactação.

De acordo com Goering et al. (2003), durante o tráfego de um trator agrícola, a pressão aplicada ao solo próximo a sua superfície é pouco superior a pressão interna dos pneus e, portanto, a compactação na camada superficial do solo é definida pelo valor da pressão interna, enquanto nas camadas subsuperficiais é definida pela carga aplicada ao rodado. Menores pressões internas ocasionam um aumento na área de contato pneu-solo, o que para uma mesma carga aplicada, reduz a pressão de contato média aplicada ao solo, diminuindo o risco de compactação.

O deslizamento dos pneus e a velocidade desenvolvida durante as operações com tratores, também contribuem para o processo de compactação, uma vez que influenciam na deformação sofrida pelo solo por ocasião da passagem do rodado. (STAFFORD; MATTOS, 1981).

Por outro lado, a pressão interna dos pneus e a velocidade selecionadas para determinada operação, alteram aspectos operacionais do trator relacionados ao seu desempenho, tais como o deslizamento dos pneus e o avanço cinemático, parâmetros importantes na avaliação do rendimento de um trator agrícola.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da pressão interna dos pneus e da velocidade de um trator agrícola 4 x 2 com

tração dianteira auxiliar (TDA) em propriedades físicas de um solo usadas como parâmetros para avaliação da compactação; e nos parâmetros avanço cinemático, deslizamento dos rodados, área de contato pneu-solo e pressão aplicada à superfície do solo pelo trator.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Tratores agrícolas

Mialhe (1980) conceituou o trator agrícola como sendo uma máquina autopropelida provida de meios capazes de lhe conferir apoio estável sobre uma superfície e de capacitá-lo a tracionar, transportar e fornecer potência para movimentar os órgãos ativos de máquinas e implementos agrícolas.

De acordo com Frantz (2011), pode-se definir tração como uma força proveniente da interação existente entre um dispositivo de autopropulsão e o meio no qual este age. Dessa forma, a tração desenvolvida pelos tratores corresponde a força gerada a partir da interação entre os rodados e o solo, e deve ser suficiente para vencer a resistência ao deslocamento do trator e ainda tracionar cargas impostas à barra de tração.

Ao longo da evolução dos tratores agrícolas diversas modificações foram realizadas com o objetivo de melhorar o desempenho em tração. Uma delas foi a introdução nos tratores convencionais da tração dianteira auxiliar (TDA). Os tratores 4 x 2 tradicionais desenvolviam tração apenas no eixo traseiro, enquanto o dianteiro era usado basicamente para sustentação e direcionamento. Com a introdução da TDA, o eixo dianteiro passou a ser equipado com pneus motrizes tornando-se possível escolher de acordo com o trabalho a ser executado, se o mesmo desenvolveria ou não tração.

Os tratores equipados com TDA constituem uma alternativa intermediária as configurações 4 x 2 convencional e 4 x 4, sendo mais viáveis economicamente que estes últimos e apresentando desempenho satisfatório nas operações agrícolas rotineiras. Maior capacidade de tração, redução da patinagem, aumento da capacidade operacional, melhor flutuação e menor resistência ao rolamento, são algumas das vantagens apresentadas pelos tratores com tração dianteira auxiliar quando comparados aos 4 x 2 convencionais (YANAI et al., 1999; CORRÊA, 2001).

Independentemente da configuração do trator, seu desempenho em tração depende fundamentalmente da interação estabelecida entre os rodados e o solo, e das características destes (BARROS, 2012), tornando-se necessário o estudo mais aprofundado destes aspectos.

2.2. Interação máquina-solo

Segundo Biris et al. (2011), a interação entre o pneu e a superfície de rolamento (solo) é um objeto de pesquisa complexo e tem sido considerado um problema crítico no projeto de tratores agrícolas.

De acordo com Couto (2012), a distribuição e magnitude das pressões e tensões cisalhantes sobre uma área de contato estabelecem a capacidade de um rodado para desenvolver máxima força de tração com mínima compactação do solo.

O termo dinâmica do solo é usado para definir a relação entre as forças aplicadas ao solo e sua reação. Entre os aspectos relativos à dinâmica do solo importantes para o entendimento da interação máquina-solo, encontram-se as relações de tensão-deformação e escoamento do solo (falhas por cisalhamento e compressão), além de parâmetros compostos como a resistência do solo à penetração e a sua capacidade de suporte (BALASTREIRE, 2004).

Berisso et al. (2013) afirmam que a compressão e a distorção (ou deformação de cisalhamento) são devidas as tensões impostas pelos pneus de máquinas agrícolas e podem afetar diversas funções ecológicas do solo dependendo das condições do sistema poroso do mesmo após a deformação. Ressaltam ainda que estes fenômenos ocorrem simultaneamente no solo durante as operações agrícolas, mas que muitos estudos atribuem os efeitos observados apenas à compressão.

Diversos autores salientam a dificuldade em modelar matematicamente o comportamento do solo quando submetido a pressões externas, afirmando que seu comportamento é mais complexo que o de outros materiais estudados pela engenharia, não obedecendo linearmente as leis já consagradas para o estudo dos materiais. Ressaltam ainda que o solo não apresenta homogeneidade horizontal ou vertical, possui alta variabilidade textural, e que a depender dessa característica, algumas de suas propriedades são significativamente influenciadas pelo teor de água (GOERING et al., 2003; BALASTREIRE, 2004; MOHSENIMANESH et al., 2009; COUTO, 2012; MONTEIRO, 2011).

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

tração líquida (NT), que é a força paralela a direção de deslocamento desenvolvida pelo dispositivo de tração e transferida para o trator; com a força de resistência ao rolamento (MR), que resiste ao movimento do dispositivo de tração e é responsável pelas perdas de energia não atribuídas ao deslizamento do rodado (ASAE, 2003). Observa-se, portanto, que a força de tração bruta corresponde a força de tração que deve ser produzida pelo trator para possibilitar seu deslocamento e torná-lo capaz de tracionar as cargas ao mesmo impostas, como dito anteriormente.

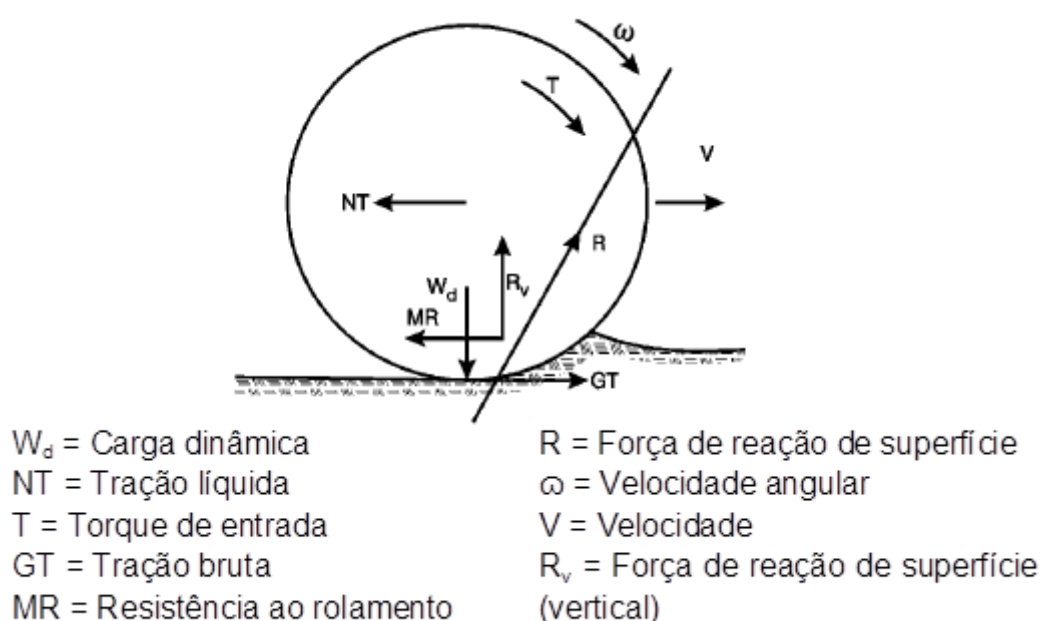


Figura 1. Velocidades e forças básicas em uma roda e força resultante da reação do solo. (Fonte: ASAE, 2003)

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

Quando o pneu de um trator submetido a determinada carga, se desloca sobre o solo, tanto o pneu quanto o solo sofrem deformações. Para uma mesma carga aplicada, a deformação do solo será tanto maior quanto menor for a sua resistência ao cisalhamento. Já a deformação do pneu é dependente

principalmente da sua pressão interna e da rigidez da carcaça (GOERING et al., 2003).

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

2.2.1. Área de contato pneu-solo

A ASAE (2003) define área de contato como a área de envolvimento das superfícies de tração e transporte, projetada num plano horizontal na superfície do solo. Por sua vez, Alakukku et al. (2003) definiram área de contato como a área de uma superfície rígida que realmente suporta a carga e que é diretamente proporcional a carga e inversamente proporcional a pressão interna dos pneus.

Wulfsohn (2009) destacou que a área de contato é um fator significativo no controle do desenvolvimento das tensões na interface pneu-solo. De acordo com o autor a área de contato pode ser classificada em estática ou dinâmica. A primeira se refere a área obtida em superfícies rígidas ou deformáveis quando o pneu é estaticamente carregado e não desenvolve nenhum movimento à frente; a segunda, é obtida com o pneu em movimento e sob influência da patinagem.

A área de contato entre o pneu e o solo varia em função da pressão interna do pneu, da carga vertical incidente sobre ele, do seu tipo de construção, do deslizamento entre os rodados e da deformação sofrida pelo solo.

Com relação ao tipo de construção dos pneus, tem-se que os pneus radiais fornecem melhor desempenho e menor compactação do solo em relação aos diagonais, uma vez que a disposição das suas lonas diminui a deflexão das garras e aumenta a deflexão lateral do pneu produzindo uma maior área de contato com o solo quando inflados a uma pressão correta (SANTOS, 2003). Já os pneus diagonais possuem a parte lateral do pneu rígida e, essa rigidez impede que o pneu se molde no solo de acordo com o

terreno, ocorrendo uma redução da área de contato e um aumento da pressão na superfície do solo (SILVA et al., 2000).

A pressão interna influencia significativamente a extensão da área de contato. Mantendo-se as demais variáveis constantes, uma redução da pressão interna do pneu resulta em uma maior deflexão do mesmo e, conseqüentemente, em maior superfície de contato. Inversamente, quando a pressão é elevada a porção do pneu que entra em contato com o solo é menor e a força vertical distribuída em uma menor área.

Taghavifar e Mardani (2013 b) destacam que a estimativa da área de contato contribui para a determinação das pressões de contato, da relação tensão-deformação e do risco potencial de compactação, além de exercer influência significativa nos parâmetros de tração. Segundo os autores, o aumento da área de contato resulta num aumento da aderência entre os pneus e o solo, melhorando o desempenho em tração. Outro parâmetro que é função da área de contato é a resistência ao rolamento, da qual também depende o consumo de combustível dos tratores.

Frantz (2011) afirma que aumentando a superfície de contato entre o pneu e o solo é possível reduzir os índices de deslizamento, aumentar a disponibilidade de força de tração e diminuir o consumo de combustível por área trabalhada.

2.2.2. Pressão de contato aplicada ao solo

A aplicação de cargas dinâmicas no solo pelos rodados produz pressões na interface pneu/solo que resultam na compressão e conseqüente deformação do mesmo.

De acordo com Mialhe (1980) a pressão média aplicada ao solo pelo rodado é determinada pela razão entre a carga suportada pelo rodado e a área da superfície de contato. Assim, a pressão de contato média multiplicada pela área de contato deve ser igual a força vertical aplicada (GOERING et al., 2003).

Estes mesmos autores afirmam que as pressões imediatamente abaixo dos pneus são um pouco mais elevadas que a pressão de inflação e que este efeito serve de base para a regra empírica que dita que a compactação superficial do solo está relacionada com a pressão interna dos pneus, enquanto

a compactação subsuperficial está relacionada com a carga vertical total aplicada sobre o eixo.

A pressão de contato não é uniformemente distribuída pela área de contato. Na verdade, sua distribuição ocorre de forma complexa por causa dos padrões do talão do pneu e de seu tipo de construção, das características da carga e das condições do solo (ALAKUKKU et al., 2003; SCHJONNING et al., 2008). De maneira geral, os maiores valores de pressão ocorrem no centro da banda de rodagem, reduzindo-se a medida que se aproxima dos flancos do pneu. Para os pneus de tração, a pressão se eleva nas áreas entre as garras e em seus bordos de ataque (MIALHE, 1980).

De acordo com Couto (2012), as pressões normais à superfície de compressão tendem a se concentrarem ao redor do eixo vertical abaixo do centro da carga aplicada.

Diminuir as pressões aplicadas ao solo é uma das alternativas propostas para se reduzir a compactação do mesmo devido ao tráfego de máquinas. Isso pode ser feito reduzindo-se a carga sobre os pneus por meio da remoção de lastro e, alternativamente, aumentando a área de contato entre os pneus e o solo, através da redução da pressão interna ou pelo uso de pneus de maiores dimensões (COUTO, 2012).

2.2.3. Deslizamento dos rodados

O deslizamento dos rodados, ou patinagem de um trator agrícola, pode ser definido como a diferença entre as velocidades de deslocamento teórica e real, normalizada pela velocidade teórica (GOERING et al., 2003; BRIXIUS, 1987).

Tal fenômeno ocorre quando a velocidade de deslocamento teórica (velocidade rotacional das rodas motrizes) não é inteiramente convertida em deslocamento e torna-se superior a velocidade translacional ou real, o que acontece devido às perdas no solo, na interface pneu-solo e dentro do próprio dispositivo de tração (perdas por histerese) (ZOZ e GRISSO, 2003).

Tratando da relação entre o deslizamento dos rodados e o desenvolvimento de tração, Zoz e Grisso (2003) destacam em seu trabalho que existe uma divergência entre os autores sobre qual das duas variáveis deve ser considerada independente. Isto é, enquanto diversos trabalhos afirmam que o

desenvolvimento de tração depende do deslizamento dos rodados, outros contrariam esta suposição e concluem que o deslizamento acontece em função da força de tração desenvolvida pelo trator.

De acordo com Barros (2012), conhecer, avaliar e dimensionar a razão de redução de percurso ou deslizamento dos rodados é essencial para conseguir um melhor rendimento em tração. Furtado Júnior (2013) enfatiza que elevadas taxas de deslizamento nas operações agrícolas acarretam redução da eficiência tratória e consequente consumo desnecessário de combustível.

Maziero (1997) relata que o deslizamento dos rodados é um dos fatores que agravam o processo de compactação do solo. Procurando determinar a influência do deslizamento da roda motriz de um trator na compactação de um solo, o autor constatou um aumento progressivo do efeito do deslizamento na compactação, de 19,2; 22,0 e 31,9 % quando o deslizamento passou de 0 para 10, 20 e 30 %, respectivamente. Constatou ainda que o efeito compactante do deslizamento foi significativamente maior até a profundidade de 5 cm.

Davies et al. (1973) estimando a compactação ocasionada por tratores trabalhando com diferentes cargas e níveis de deslizamento, concluíram que o deslizamento dos rodados se mostrou mais importante como causa da compactação que a carga adicional imposta ao rodado.

De acordo com Šmerda e Čupera (2010), as principais formas de se reduzir o deslizamento dos rodados consistem em aumentar a carga sobre os mesmos por meio da adição de lastros; e aumentar a área de contato entre os pneus e o solo. Uma das maneiras de se aumentar a área de contato é reduzir a pressão interna dos pneus dentro dos limites aceitáveis.

2.3. Pressão interna dos pneus

A pressão interna dos pneus, também denominada pressão de inflação, tem sido um dos parâmetros operacionais dos tratores mais estudados visando-se aumentar a eficiência em tração e reduzir a degradação de características físicas do solo.

As pressões recomendadas variam de acordo com o tamanho, o número de lonas e a carga de trabalho dos pneus e são normalmente apresentadas nos manuais dos fabricantes de pneus e de tratores agrícolas.

Spagnolo et al. (2012) afirmam que utilizando-se pressão interna e lastragem adequadas, é possível obter um maior rendimento e prolongar a vida útil do pneu, além de minimizar problemas de perda de tração, aumento da patinagem e aumento do consumo de combustível.

De acordo com Knob (2010) pode-se variar a pressão dos pneus dentro de limites fixados por uma pressão mínima, que é estabelecida para que o pneu não gire em relação ao aro e/ou não ocorra deformação excessiva; e por uma pressão máxima, determinada pela pressão máxima que a carcaça do pneu pode suportar e/ou pela pressão máxima que pode ser aplicada ao solo sem que se ultrapasse sua pressão de pré-consolidação, de modo a evitar compactação.

Biris et al. (2011) afirmam que a pressão interna dos pneus tem grande importância na distribuição de tensões e influencia o tamanho da superfície de contato com a pista de rolamento. Baixas pressões levam a uma deflexão exagerada da carcaça do pneu aumentando a resistência ao rolamento. Pressões altas demais ocasionam uma diminuição da aderência dos pneus ao solo, além de desgaste irregular e mais rápido.

O uso de menores pressões nos pneus tem sido uma alternativa adotada para melhorar as características de tração. Entretanto, Šmerda e Čupera (2010) ressaltam que tais melhorias não são obtidas em todos os casos. A partir de resultados de seus trabalhos os autores concluíram que a redução da pressão interna do pneu tem maior influência sobre o desempenho em tração quando se tem um implemento acoplado ao trator e trabalha-se a menores velocidades, ou seja, os reais benefícios são mostrados em casos em que se demanda alta força de tração. Afirmação semelhante é feita por Zoz e Grisso (2003).

Segundo Biris et al. (2011) a pressão interna dos pneus altera significativamente a forma da superfície de contato entre o pneu e o solo e assim, a distribuição das tensões no solo. Keller e Arvidsson (2004) afirmam que a distribuição de tensões na área de contato afeta não somente a superfície do solo, mas também o subsolo, e que isto é de grande importância para a modelagem da compactação.

Em seus experimentos os autores demonstraram que a tensão no solo é função da pressão na superfície e da área de contato, que por sua vez, são funções da carga sobre os rodados, do arranjo destes, da pressão de inflação

dos pneus e das condições do solo. Concluíram ainda que a redução da pressão de inflação reduz o risco de compactação do subsolo (KELLER; ARVIDSSON, 2004).

2.4. Velocidade dos tratores agrícolas

A velocidade comum de deslocamento de um trator em operações agrícolas varia de 3 a 15 km h⁻¹ (ŠMERDA; ČUPERA, 2010). Os autores ressaltam que esse intervalo de velocidades corresponde ao intervalo em que o deslizamento dos rodados apresenta seus valores máximos.

O aumento da velocidade do trator é associado por diversos autores a uma menor compactação do solo, quando comparado às menores velocidades comumente utilizadas.

Stafford e Mattos (1981) avaliando a compactação do solo em função de duas velocidades extremas (0,2 e 5,0 m s⁻¹) observaram um incremento na compactação com a redução da velocidade, sendo esse efeito mais evidente em solos com menor densidade (solos soltos). Os autores atribuíram a adição de compactação à deformação por cisalhamento sofrida pelo solo devido ao deslizamento da roda, que é menor a maiores velocidades.

Avaliando a influência da carga dinâmica e da velocidade de um trator 4 x 2 operando sem desenvolver tração na barra, na compactação do solo, Çarman (1994) observou que o solo sob o pneu sofreu maior compactação quando utilizou-se a menor velocidade de deslocamento (0,78 m s⁻¹). Elevando-se a velocidade para 1,67 m s⁻¹ houve uma redução acentuada na densidade e na formação de sulcos no solo.

Horn et al. (1989) obtiveram uma redução na profundidade de sulcos e na densidade do solo a 20 cm, quando elevaram a velocidade de deslocamento de 0,5 para 10 km h⁻¹ em um solo com teor de água próximo ao limite plástico inferior.

Já Taghavifar e Mardani (2013 a) avaliando o efeito de diferentes velocidades na compactação do solo concluíram que baixas velocidades de deslocamento aumentam a duração do contato entre o rodado e o solo, proporcionando maior tempo de aplicação de forças verticais e maiores chances de ocorrer compactação.

2.5. Propriedades físicas do solo afetadas pelo tráfego de máquinas agrícolas

As alterações na qualidade física do solo decorrentes do seu uso e manejo têm sido quantificadas utilizando-se diferentes propriedades físicas relacionadas com a forma e a estabilidade estrutural do solo (ARAÚJO et al., 2004) entre as quais destacam-se a densidade, o volume de poros e a resistência do solo à penetração.

A alteração dessas propriedades está intimamente relacionada com a ocorrência de processos de compactação, que consistem basicamente no decréscimo do volume de solos não saturados em que a porosidade e a permeabilidade são reduzidas e a resistência aumentada quando uma determinada pressão externa é aplicada ao solo (CUNHA et al., 2009).

O tráfego de máquinas agrícolas é considerado a principal causa da compactação, intensificando-se pelo incremento no peso das máquinas e implementos e pela intensidade do uso do solo decorrentes do processo de modernização da agricultura (BERISSO et al., 2013; FOUNTAS et al., 2013; VOGELMANN et al., 2012; OLIVEIRA, 2010; RICHART et al., 2005; HORN; FLEIGE, 2003).

De acordo com Nasiri et al. (2013) a compactação é um indicativo da destruição da estrutura física do solo e expressa-se por um aumento na densidade do solo ou redução na sua porosidade. Segundo os autores, do ponto de vista da mecanização agrícola, a compactação ocasiona um aumento na resistência mecânica do solo, o que eleva a força necessária para prepará-lo, o consumo de combustível, o tempo para realização das operações e o desgaste dos implementos.

Reichert et al. (2007) apontam a compactação como uma consequência indesejada da mecanização que ocasiona a redução da produtividade biológica do solo, podendo torná-lo inadequado ao crescimento das plantas. Nesse sentido, Hamza e Anderson (2005) afirmam que com a compactação ocorre um aumento da resistência do solo à penetração de raízes e uma diminuição da fertilidade física do solo por meio da redução do armazenamento e fornecimento de água e nutrientes às plantas.

Richart et al. (2005) apontam que entre as modificações que podem ocorrer nas propriedades físicas do solo em decorrência da compactação estão a menor condutividade e acúmulo de água, comprometendo a infiltração de

água e a penetração das raízes no perfil do solo, o que o torna mais suscetível a erosão.

Estimar a compactação do solo consiste em prever o estado físico final do solo, após a passagem de uma máquina, a partir de informações iniciais do solo e da máquina (OLIVEIRA, 2010). Dessa forma, propriedades físicas do solo têm sido usadas como parâmetros para caracterizar esse processo, destacando-se entre elas a densidade do solo, a porosidade total, macroporosidade, microporosidade e a resistência do solo à penetração (MORAES et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2012).

2.5.1. Densidade do solo

A densidade do solo, definida pela relação entre a massa do solo seco por unidade de volume, é uma das principais propriedades físicas utilizadas para caracterizar o estado de compactação do solo, uma vez que seu comportamento é altamente influenciado pelo manejo adotado (COUTO et al., 2013; SILVA, 2011).

De acordo com Pedrotti e Mello Júnior (2009), a densidade do solo representa a relação entre a massa de sólidos e o volume total que essa massa ocupa, refletindo o arranjo das partículas. Assim, fatores que exercem influência sobre a disposição das partículas do solo refletem diretamente nos valores desse parâmetro. Raper (2005) afirma que quando o solo é submetido à compactação, a densidade do mesmo aumenta, uma vez que a massa do solo permanece constante, enquanto o volume é reduzido.

Menores valores de densidade favorecem a retenção de água, o crescimento das raízes, as trocas gasosas e a atividade microbiana do solo (PEDROTTI; MELLO JÚNIOR, 2009).

Silva (2011) destaca que a densidade varia significativamente em função da textura do solo, o que dificulta a comparação entre solos com texturas contrastantes, já que um valor de densidade que indique a existência de compactação em determinado solo, pode ser normal para outro de textura diferenciada.

Solos arenosos apresentam maiores valores de densidade que solos argilosos, condição que é atribuída ao maior peso das partículas de quartzo que compõem a fração areia e ao menor conteúdo de matéria orgânica

(AGUIAR, 2008). Para solos arenosos a densidade pode variar de 1,3 a 1,8 g cm⁻³, enquanto para solos argilosos esta variação pode ir de 0,9 a 1,6 g cm⁻³ (Carvalho et al., 2011).

A baixa dependência do teor de água do solo é apontada por Raper (2005) como uma das vantagens de se utilizar a densidade como parâmetro para inferir sobre o processo de compactação.

2.5.2. Porosidade total do solo

As cargas mecânicas aplicadas ao solo pelas máquinas agrícolas ocasionam alterações no seu arranjo estrutural, modificando a densidade e a distribuição dos poros (CAVALIERI et al., 2009).

A porosidade total do solo é definida como a proporção do volume do solo que não é ocupada por partículas sólidas, e sim por ar e água (ARAÚJO et al., 2007), e reflete diretamente a textura e a estrutura do solo, sendo os poros determinados pelo arranjo e geometria das partículas e, diferindo quanto a sua forma, tamanho e tortuosidade (AGUIAR, 2008).

A distribuição dos poros de acordo com seu tamanho condiciona o comportamento físico-hídrico do solo, influenciando a sua potencialidade agrícola (RIBEIRO et al., 2007). Os poros do solo podem ser classificados segundo o seu diâmetro em macroporos e microporos, sendo os primeiros associados à drenagem e a aeração e os últimos à retenção de água (AGUIAR, 2008).

De acordo com Reichert et al. (2007), a redução da porosidade ocorre geralmente com os macroporos, que são os primeiros a serem destruídos no processo de compactação, podendo-se observar assim uma redução na porosidade total, contrapondo-se a um aumento na microporosidade do solo.

Berisso et al. (2013) relatam em seu trabalho que a intensidade e a direção das tensões aplicadas ao solo durante o tráfego de máquinas agrícolas, determinam a deformação do solo e, portanto, alteram a distribuição do tamanho dos poros, a tortuosidade e a conectividade do sistema poroso, o que por sua vez afeta negativamente a permeabilidade do solo ao ar.

Segundo Lima et al. (2007) tem-se uma situação ideal quando um solo apresenta uma porosidade de 0,500 m³ m⁻³ do seu volume. Neste caso a

microporosidade deveria variar entre 0,250 e 0,330 m³ m⁻³, e a macroporosidade entre 0,170 e 0,250 m³ m⁻³.

2.5.3. Resistência do solo à penetração

A utilização de penetrômetros para determinar a resistência mecânica do solo à penetração tem sido uma das formas mais adotadas de se caracterizar o estado de compactação de um solo (MOLINA JR et al., 2013; FOUNTAS et al., 2013; GAO et al., 2012; SILVEIRA et al., 2010; MACHADO et al., 2005).

Os dados obtidos com essa determinação são apresentados em termos do índice de cone, definido como a resistência do solo à penetração de uma ponta cônica e, expresso como a força por unidade de área da base de um cone (FOUNTAS et al., 2013; MOLIN et al., 2012; CUNHA et al., 2002).

Segundo Molina Jr et al. (2013), o índice de cone tem sido correlacionado com a resistência mecânica oferecida pelo solo ao desenvolvimento de raízes, com o grau de compactação do solo e com alterações de parâmetros físicos do solo decorrentes do tráfego de máquinas; além de ser utilizado na previsão da capacidade de tração dos solos.

Molin et al. (2012) relatam que existem, disponíveis no mercado, vários modelos de penetrômetros, desde os mais simples, como os impacto, aos penetrômetros eletrônicos manuais e de acionamento hidráulico e, que tal variedade pode trazer diferenças nos dados obtidos. Os penetrômetros eletrônicos, mais usados atualmente, são capazes de monitorar a resistência à penetração através de células de carga e a profundidade de penetração por meio do uso de díodos de luz ou de sensores ultrassônicos, sendo as medidas registradas em coletores de dados portáteis (FOUNTAS et al., 2013).

De acordo com Machado et al. (2005), o uso deste aparelho permite identificar as zonas de maior resistência à penetração e consequentemente a localização de regiões ou camadas compactadas em determinado solo.

Já Vaz et al. (2011) afirmam que a resistência à penetração é alterada por parâmetros do solo relativamente constantes ao longo do tempo mas que apresentam significativa heterogeneidade espacial, tais como a distribuição de tamanho das partículas, mineralogia do solo e matéria orgânica. Varia ainda em função das propriedades do solo que são altamente dinâmicas temporal e espacialmente, como o teor de água, a densidade, a porosidade total e o potencial matricial.

A facilidade de se manusear o equipamento e a rapidez na obtenção dos dados são apontadas como as principais vantagens do uso da resistência à penetração como parâmetro para avaliar o estado de compactação de um solo (RAPER, 2005; MACHADO et al., 2005).

A principal desvantagem é a alta dependência apresentada por esse parâmetro para com a umidade do solo (FOUNTAS et al., 2013; MOLINA Jr et al., 2013; RAPER, 2005; LOPES, 2003). De acordo com Vaz et al. (2011) a resistência à penetração está diretamente relacionada com a densidade e inversamente com o teor de água no solo. Reichert et al. (2007) afirmam que um solo mais seco ou mais denso apresenta maior resistência se comparado a um mais úmido e menos denso, enquanto que para uma mesma umidade os solos arenosos apresentam menor resistência que os argilosos.

Outras desvantagens apresentadas consistem na existência de raízes e pedras no solo que podem afetar ou impedir as leituras (FOUNTAS et al., 2013; LOPES, 2003); na incapacidade deste parâmetro para identificar e integrar o efeito de rachaduras e poros biológicos existentes no solo (REICHERT et al., 2007); e na grande variabilidade encontrada entre as leituras quando do monitoramento da compactação em campo (MOLIN et al., 2012).

2.6. Relação mecânica e avanço cinemático

Os tratores agrícolas equipados com tração dianteira auxiliar (TDA) oferecem ao operador a possibilidade de escolher em função da operação a ser desenvolvida se o eixo dianteiro do trator desenvolverá ou não tração.

De acordo com Ferreira et al. (2000) quando a TDA é acionada o trator passa a apresentar uma ligação rígida entre os eixos dianteiro e traseiro. Nesse caso há obrigatoriamente uma relação constante entre as velocidades angulares dos eixos, sendo tal ligação denominada relação mecânica entre os eixos ou adiantamento cinemático.

Esta relação é fixada para cada trator pelos parâmetros de projeto do fabricante, e é estabelecida por meio das relações de transmissão entre os diferenciais presentes nos eixos dianteiro e traseiro. Normalmente assume valores maiores que 1, a favor do eixo dianteiro, que gira mais rápido que o traseiro (MASIERO, 2010; SCHLOSSER et al., 2001).

A diferença entre as velocidades angulares dos eixos do trator é necessária para compensar a diferença existente entre os diâmetros dos pneus colocados em cada eixo. Como os pneus dianteiros são menores que os traseiros, para que a velocidade tangencial periférica dos mesmos seja igual ou pouco superior a dos traseiros a rotação do eixo dianteiro precisa ser superior.

Uma vez que com a TDA acionada o eixo dianteiro gira com uma rotação superior ao traseiro, a relação entre a velocidade tangencial dos pneus dos eixos dianteiro e traseiro é expressa pelo parâmetro denominado avanço cinemático.

O avanço cinemático é dado em função de dois fatores: a relação mecânica entre os eixos e relação entre os raios de rolamento dos pneus. Este segundo fator faz com que o avanço cinemático do trator possa ser alterado pelo usuário, uma vez que os raios de rolamento dependem da pressão interna dos pneus, da transferência de peso entre os eixos e do desgaste diferenciado dos pneus. Quanto menor o peso do trator e maior a pressão interna dos pneus, maiores são os raios estáticos (MASIERO, 2010; SCHLOSSER et al., 2004; SCHLOSSER et al., 2001).

Linares et al. (2006) afirmam que o avanço cinemático é utilizado para expressar o adiantamento ou atraso da roda dianteira em relação a traseira, e que os valores normais de avanço variam entre 1,01 e 1,05.

3. Material e Métodos

O experimento foi conduzido na área experimental Horta Nova, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – Minas Gerais, (20° 45' 38" S; 42° 49' 30" W; altitude de 693 m). A região é caracterizada por apresentar relevo montanhoso e seu clima é classificado como mesotérmico úmido conforme a classificação de Köppen (1948).

Para a realização do experimento utilizou-se um trator agrícola 4 x 2 TDA equipado com pneus diagonais, sendo analisada a influência da pressão interna dos pneus e de velocidades do trator na modificação de atributos físicos do solo utilizados como parâmetros para avaliação da ocorrência de compactação. O experimento foi estabelecido em esquema de parcelas subdivididas, distribuindo-se nas parcelas os tratamentos constituídos da combinação de três conjuntos de pressões dos pneus e três velocidades; e nas subparcelas as profundidades de amostragem. Adotou-se o delineamento em blocos casualizados com três repetições, totalizando 27 parcelas experimentais, cada uma com área de 30 m² (3 x 10 m).

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico (EMBRAPA, 1999), de textura argilosa (Tabela 1), e cultivado no sistema de plantio direto, há aproximadamente seis anos.

Tabela 1. Composição granulométrica do solo nas diferentes profundidades após preparo

Profundidade (m)	Areia	Argila (kg kg ⁻¹)	Silte
0,0 – 0,10	0,196	0,533	0,270
0,10 – 0,20	0,192	0,556	0,251
0,20 – 0,30	0,172	0,556	0,272
0,30 – 0,40	0,151	0,591	0,258

Objetivando-se obter uma maior uniformidade da área, antes da implantação do experimento o solo foi submetido a operações de preparo, realizando-se uma operação de aração, quatro gradagens e uma passada com enxada rotativa, trabalhando o solo a uma profundidade média de 0,20 m de modo a revolvê-lo, destorroá-lo e nivelá-lo (Figura 2).



Figura 2. Área experimental após preparo do solo e demarcação das parcelas.

3.1. Trator

O trabalho foi realizado utilizando-se um trator John Deere® (Figura 3), modelo 5705 4 x 2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e potência de 62,56 kW (85 cv) no motor a 2400 rpm, cujas especificações estão descritas na Tabela 2.

Durante a realização do experimento o trator operou lastrado com água nos pneus a um nível de 75% do seu volume, com a tração dianteira auxiliar acionada e sem carga e, percorreu cada parcela apenas uma vez.



Figura 3. Trator John Deere® utilizado no experimento.

Tabela 2. Especificações do trator John Deere® 5705

Especificações	
Potência do motor na rotação nominal	63 kW
Potência da TDP na rotação nominal do motor	53 kW
Rotação de potência máxima	2400 rpm
Faixa de rotação com potência constante	2000 – 2400 rpm
Torque máximo	330 Nm
Rotação de torque máximo	1600 rpm
Número de cilindros do motor	4
Cilindrada	4500 cm ³
Aspiração	Turboalimentado
Relação peso/potência	498,29 kW N ⁻¹

FONTE: John Deere®.

3.1.2. Pneus utilizados

Foram utilizados pneus diagonais modelos Pirelli® TM 95 18.4-30 no eixo traseiro e Goodyear® Dyna Torque II 12.4-24 no eixo dianteiro do trator, cujas especificações são descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Especificações nominais dos pneus utilizados

Pneu	Banda de rodagem	Largura da seção (m)	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro do aro (mm)	Carga máxima (Kg)	Nº de lonas	Pressão recomendada (psi)
18.4 – 30	R1	0,4674	1551,9	760,0	2815	10	26
12.4 – 24	R1	0,3150	1163,3	609,6	1200	6	24

3.1.3. Pressão interna dos pneus

Foram utilizadas três combinações de pressões internas distribuídas nos pneus dos eixos dianteiro e traseiro conforme Tabela 4. Tais combinações foram estabelecidas levando em conta as pressões comumente utilizadas em operações agrícolas com máquinas similares à usada no presente trabalho.

Tabela 4. Combinações de pressões internas aplicadas aos pneus do trator nos eixos dianteiro e traseiro

Combinação	Pneus dianteiros	Pneus traseiros
	kPa (psi)	
P1	82,74 (12)	96,53 (14)
P2	96,53 (14)	110,32 (16)
P3	110,32 (16)	124,11 (18)

Para calibrar as pressões estabelecidas foram utilizados um compressor de ar Wayne®, modelo WTA 8.1/25, e um gerador de energia Branco®, modelo BD-6500CF3E (Figura 4).

**Figura 4.** Calibração da pressão interna dos pneus do trator.

Durante a execução do experimento a pressão interna dos pneus foi monitorada por meio de transdutores de pressão adaptados em cada pneu por meio de um rotor cinemático. Foram utilizados transdutores de pressão, marca Sensata Technologies®, modelo 100CP7-1, para aplicações hidropneumáticas com intervalo de leitura de 0 a 690 kPa, sensibilidade de $1,26 \text{ mV V}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ e precisão de 2%. (Figura 5).



Figura 5. Sistema cinemático e transdutor de pressão utilizados no experimento.

3.1.4. Velocidade operacional

De acordo com o tratamento a ser aplicado, foram utilizadas as marchas A3, B1 e B2, as quais conferiram ao trator velocidades operacionais médias de 4,27, 5,43 e 7,31 km h^{-1} respectivamente, com o motor na rotação de 2400 rpm.

3.2. Instrumentação e avaliação de parâmetros referentes ao trator

Para facilitar a determinação de alguns parâmetros de interesse do presente trabalho, o trator foi instrumentado com um conjunto de transdutores.

Estes foram conectados a um sistema de aquisição de dados, marca Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), modelo Spider 8[®], gerenciado pelo software HBM Catman[®] 2.2 instalado em um computador portátil transportado no trator, no qual os dados obtidos foram armazenados para posterior análise.

3.2.1. Velocidade operacional do trator (V_{op})

A velocidade desenvolvida pelo trator durante a operação, que corresponde à velocidade translacional dos pneus, foi monitorada com o uso de uma unidade de radar de efeito Doppler, marca Dickey John[®], modelo Radar II (Figura 6), o qual é capaz de medir velocidades entre 0,53 e 96,6 km h⁻¹, apresentando uma precisão de $\pm 3\%$ para a faixa de velocidades que engloba as utilizadas no experimento.

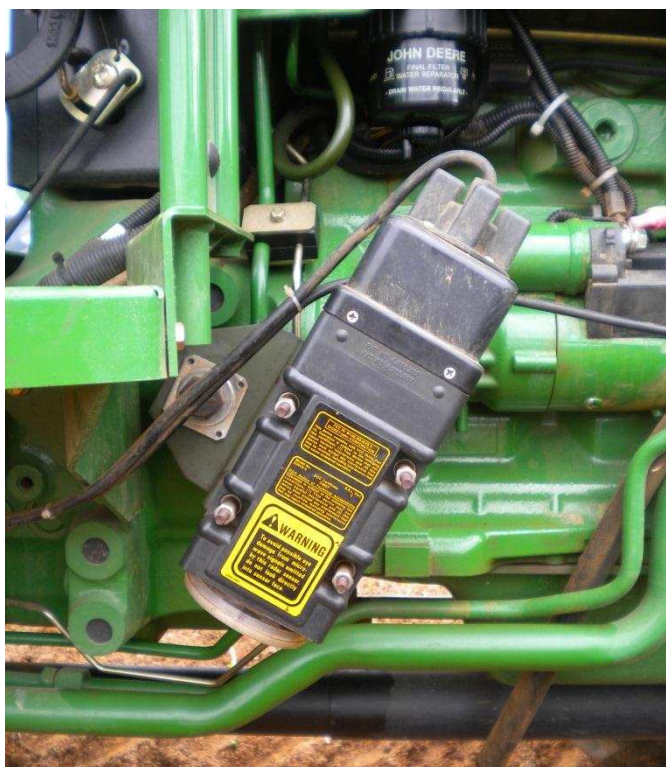


Figura 6. Unidade de radar para medida da velocidade instantânea do trator.

3.2.2. Rotação dos eixos motrizes

A rotação das rodas motrizes do trator foi monitorada utilizando transdutores indutivos tubulares, marca Autonics, modelo PRCM 18, com distância de detecção de 5 mm e 18 mm de diâmetro, os quais foram

instalados em cada uma das rodas por meio de suportes (Figura 7), sendo o sistema calibrado para leituras de 45 Hz rps⁻¹.

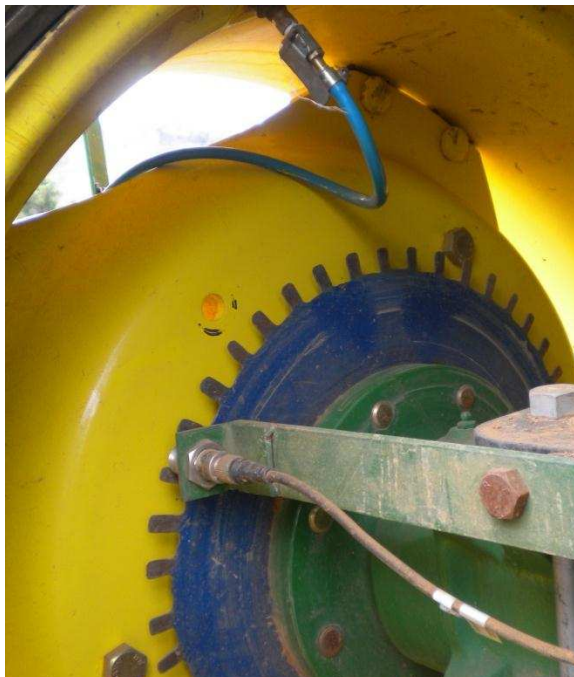


Figura 7. Transdutor indutivo usado na determinação da velocidade de rotação dos rodados do trator.

3.2.3. Raio de rolamento

O raio de rolamento (r_r) dos pneus foi obtido para cada uma das pressões utilizadas, com a tração dianteira auxiliar ligada. A determinação foi realizada em pista de concreto, em uma velocidade operacional média de 1,29 m s⁻¹, com a velocidade angular de cada eixo sendo monitorada e registrada pelo computador. Posteriormente, o raio de rolamento foi calculado por meio da Equação 1.

$$r_r = \frac{V_{op}}{2 \pi n} \quad (1)$$

em que,

r_r = Raio de rolamento (m);

V_{op} = Velocidade operacional (m s⁻¹); e,

n = Rotação do eixo motriz (rps).

3.2.4. Deslizamento dos rodados

O deslizamento dos rodados foi determinado através da relação entre as velocidades translacional e rotacional para os rodados dianteiro e traseiro do trator, por meio da Equação 2:

$$s = 1 - \frac{V_{op}}{2 \pi n r_r} 100 \quad (2)$$

em que,

s = Deslizamento do trator (%);

n = Rotação do eixo motriz (rps);

r_r = Raio de rolamento do pneu (m);

V_{op} = Velocidade operacional do trator ($m s^{-1}$).

3.2.5. Relação mecânica entre os eixos

A relação mecânica entre eixos é definida como o resultado da divisão entre a velocidade angular do eixo dianteiro pela velocidade angular do eixo traseiro, sendo obtida, portanto, por meio da Equação 3.

$$R_M = \frac{n_d}{n_t} \quad (3)$$

em que,

R_M = Relação mecânica entre eixos (adm);

n_d = Rotação do eixo dianteiro (rps); e,

n_t = Rotação do eixo traseiro (rps).

3.2.6. Relação entre os raios de rolamento dianteiro e traseiro

A relação entre os raios de rolamento dos pneus dianteiros e traseiros foi obtida conforme Equação 4.

$$R_R = \frac{r_{rd}}{r_{rt}} \quad (4)$$

em que,

R_R = Relação entre os raios (adm);

r_{rd} = Raio de rolamento dos pneus dianteiros (m); e,

r_{rt} = Raio de rolamento dos pneus traseiros (m).

3.2.7. Avanço cinemático

Corresponde a relação entre a velocidade tangencial periférica dos pneus dianteiros e traseiros e foi calculado pela Equação 5.

$$A_C = [(R_M R_R) - 1] 100 \quad (5)$$

em que,

A_C = Avanço cinemático (%);

R_M = Relação mecânica entre eixos (adm); e,

R_R = Relação entre raios (adm).

3.2.8 Peso do trator

O peso total do trator e o peso sobre cada eixo motriz foram determinados por meio de pesagem em balança rodoviária. Durante a pesagem o trator se encontrava com tanque de combustível cheio e com lastro líquido nos pneus (75%).

Para se obter o peso sobre cada rodado, considerou-se que o peso total sobre cada eixo se distribuiu igualmente sobre os rodados direito e esquerdo.

3.2.9 Área de contato pneu-solo

A alteração da pressão interna dos pneus submetidos a uma carga constante tende a modificar a área de contato entre o rodado e o solo, esperando-se que menores pressões acarretem maiores áreas de contato.

Para determinar a área de contato dos pneus do trator usados no experimento, quando inflados com as diferentes pressões, foi construída uma caixa de solo (Figura 8) com as seguintes dimensões: 1,30 x 1,05 x 0,035 m; totalizando uma área interna de 1,365 m². A caixa foi preenchida com solo previamente peneirado cuja densidade era de 1,28 g cm⁻³, e teor de água de 0,251 kg kg⁻¹ no momento em que foram feitas as determinações.



Figura 8. Caixa de solo construída para determinação da área de contato pneu-solo.

Para obter as impressões dos pneus no solo, um macaco hidráulico foi utilizado para erguer o pneu cuja área seria determinada. Uma vez suspenso, a caixa de solo era colocada sob o pneu e o macaco hidráulico retirado, de modo a imprimir no solo a área de contato entre as duas superfícies (Figura 9). Após cada determinação o solo da caixa era revolvido e nivelado, sendo o procedimento realizado para os quatro pneus do trator inflados com as pressões de 12, 14, 16 e 18 psi, respectivamente 82,74, 96,53, 110,32 e 124,11 kPa.



Figura 9. Procedimento adotado para determinação da área de contato entre os pneus usados no experimento e o solo.

As impressões deixadas no solo (Figura 9) foram registradas por meio de fotografia digital utilizando uma câmera SONY Cyber-Shot DSC-HX1, 9.1 megapixels. As imagens obtidas foram analisadas utilizando o software AutoCAD 2011, no qual foi feita a correção da escala e determinadas as áreas de contato (Figura 10).

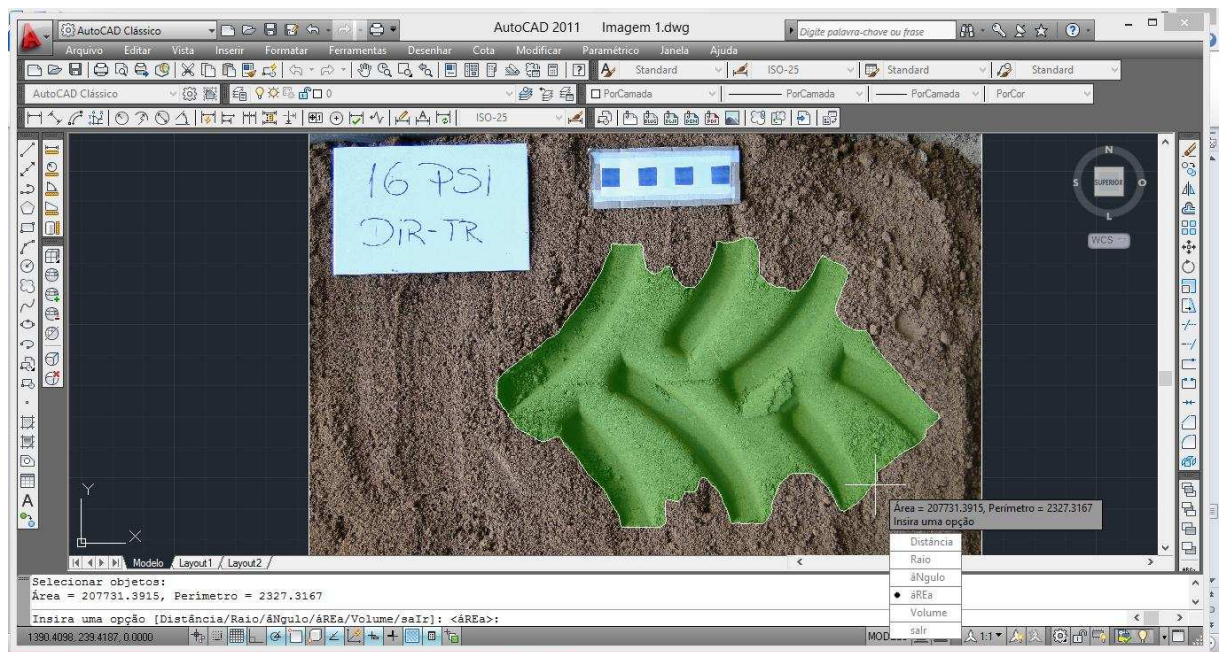


Figura 10. Determinação da área de contato pneu-solo no AutoCAD 2011.

3.2.10. Pressão de contato aplicada ao solo

A pressão média de contato aplicada pelos rodados ao solo foi determinada por meio da Equação 6.

$$P_m = \frac{W}{A} \quad (6)$$

em que,

P_m = Pressão média aplicada ao solo pelo rodado (kPa);

W = Carga suportada pelo rodado (kN); e,

A = Área de contato pneu-solo (m^2).

3.3. Propriedades físicas do solo

3.3.1. Teor de água do solo

O teor de água do solo foi determinado para as amostras de solo nas diferentes profundidades (0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m), antes e após a passagem do trator, de forma a verificar a homogeneidade das condições experimentais, uma vez que a umidade do solo exerce influência significativa na determinação de parâmetros como a resistência do solo à penetração. Para tanto, se utilizou o método gravimétrico padrão (EMBRAPA, 1997), que se baseia na secagem das amostras em estufa a 105 °C por um período de 24 horas.

3.3.2. Densidade do solo

Para avaliar as possíveis modificações na densidade do solo, foram realizadas amostragens nas parcelas experimentais antes e após a aplicação dos tratamentos, sendo a densidade determinada pelo método do anel volumétrico de acordo com Embrapa (1997).

Em cada parcela foram feitas duas amostragens, uma na área correspondente ao rastro direito e outra na correspondente ao rastro esquerdo deixado pelos pneus do trator. Um gabarito, confeccionado com base nas medidas da distância entre os rodados traseiros e na largura total da máquina, foi utilizado para demarcar os pontos de realização da coleta.

Os pontos iniciais de coleta foram demarcados e as amostragens após a aplicação dos tratamentos foram feitas em locais próximos a estes e, sobre o rastro deixado pelos rodados (Figura 11), sendo as amostras coletadas em três profundidades: 0,0-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m.



Figura 11. Coleta de amostras para determinação da densidade do solo.

3.3.3. Densidade de partículas

As amostras coletadas para determinação da densidade do solo foram utilizadas na determinação da densidade das partículas do solo, obtida pelo método do balão volumétrico conforme metodologia descrita por Embrapa (1997), cujo princípio é determinar o volume necessário de álcool para

completar a capacidade de um balão volumétrico contendo terra fina seca em estufa.

3.3.4. Porosidade total

Obtidos os valores de densidade do solo e densidade de partículas para as amostras coletadas, calculou-se a porosidade total do solo, que determina o volume de poros totais do solo ocupado por água e/ou ar, de acordo com Embrapa (1997).

3.3.5. Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi obtida utilizando-se um penetrômetro, modelo PLG1020, equipado com o cone tipo 2 (12,83 mm) (Figura 12). Em cada parcela foram feitas amostragens em 28 pontos espaçados entre si em 0,10 m, em um perfil transversal ao deslocamento do trator, de modo a abranger a área submetida ao tráfego (Figura 12). A amostragem foi realizada antes e após a passagem do trator sendo os dados obtidos para a camada de 0,0 a 0,40 m.



Figura 12. Amostragem para avaliação da resistência do solo à penetração e penetrômetro utilizado.

Os valores de índice de cone foram calculados a partir das médias de cada camada, ou seja, a cada 0,10 m de profundidade. Para avaliar a

modificação dos valores de resistência na área trafegada, os pontos centrais de coleta situados na mesma (três pontos para o rastro do rodado direito e três para o rodado esquerdo) foram especificados com base no gabarito utilizado para conduzir a amostragem e, os valores obtidos em cada camada para cada ponto, utilizados para compor o índice de cone de cada uma das parcelas experimentais.

Posteriormente, os dados obtidos para cada ponto amostrado foram utilizados para traçar o perfil penetrométrico do solo por meio da construção de um gráfico de isolinhas de resistência à penetração, utilizando-se o software Surfer 11.

3.4. Análise estatística

Os dados obtidos para os parâmetros referentes ao solo foram submetidos à análise de variância no esquema de parcelas subdivididas, em que nas parcelas foram dispostos os tratamentos constituídos das combinações de pressões e velocidades de deslocamento e, nas subparcelas, as profundidades de amostragem.

Para os parâmetros deslizamento dos rodados e avanço cinemático, os dados foram submetidos à análise de variância em esquema fatorial 3 x 3, sendo os fatores as três combinações de pressões e as três velocidades. Em ambos os casos utilizou-se o delineamento em blocos casualizados com três repetições.

Para os fatores qualitativos as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey ou o teste t ao nível de 5% de probabilidade.

Para os fatores quantitativos aplicou-se a análise de regressão sendo os modelos selecionados com base no comportamento do fenômeno, no coeficiente de determinação e na significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste t ao nível de 5% de probabilidade.

A análise dos dados referentes aos parâmetros do solo foi efetuada considerando-se a diferença entre os valores obtidos antes e após a aplicação dos tratamentos ($Y = \text{Final} - \text{Inicial}$ ou $Y = \text{Inicial} - \text{Final}$).

Para a realização das análises estatísticas foram utilizados os programas estatísticos SAEG (UFV, 2007) e SISVAR (FERREIRA, 2011).

4. Resultados e discussão

Inicialmente são apresentados os resultados referentes a determinação de parâmetros relacionados ao trator agrícola utilizado e ao seu desempenho, uma vez que estes são importantes para a compreensão dos demais parâmetros, os quais se referem a avaliação da compactação do solo.

4.1. Avaliação dos parâmetros relacionados ao trator e sua interação com o solo

4.1.1. Raio de rolamento

Os resultados obtidos na determinação do raio de rolamento para os pneus utilizados no experimento são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Valores médios para o raio de rolamento dos pneus dianteiros e traseiros utilizados, na condição de TDA acionada e nas diferentes pressões internas

Pressão (kPa)	Raio de rolamento (m)	
	Traseiro	Dianteiro
82,74	0,713	0,535
96,53	0,719	0,540
110,32	0,726	0,547
124,11	0,724	0,549

Observa-se que quanto maior a pressão interna aplicada aos pneus, maiores foram os raios estáticos obtidos, embora essa variação seja pequena. Tal comportamento é explicado pelo fato de que, para uma mesma carga aplicada, a deflexão sofrida pelos pneus é reduzida à medida que se eleva a sua pressão interna, obtendo-se, portanto, maiores raios.

4.1.2. Relação entre os raios de rolamento dianteiro e traseiro

As relações entre raios obtidas nas diferentes combinações de pressões utilizadas no experimento e, correspondentes à divisão do raio de rolamento do pneu dianteiro pelo do pneu traseiro, são apresentadas no Quadro 2. Tais valores foram utilizados no cálculo do avanço cinemático.

Quadro 2. Relação entre os raios de rolamento para cada combinação de pressões utilizada no experimento

Combinação de pressões (dianteiro; traseiro) – (kPa)	Relação entre raios
82,74; 96,53 (P1)	0,744
96,53; 110,32 (P2)	0,744
110,32; 124,11 (P3)	0,755

4.1.3. Relação mecânica entre eixos

A relação mecânica entre os eixos, dependente apenas do sistema de transmissão entre eixos do trator, e fixada pelos parâmetros de projeto do fabricante, foi determinada obtendo-se o valor de 1,3406. Este valor indica que o eixo dianteiro gira mais rápido que o traseiro, situação comum a tratores em que os pneus dianteiros apresentam menor diâmetro.

4.1.4. Avanço cinemático

Os valores médios do avanço cinemático obtidos quando os pneus do trator foram calibrados com cada uma das combinações de pressões usadas no experimento são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Avanço cinemático para cada combinação de pressões utilizada

Combinação de pressões (kPa)	Avanço cinemático (%)
P1: 82,74; 96,53	-0,2849 b
P2: 96,53; 110,32	-0,2524 b
P3: 110,32; 124,11	1,2667 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O avanço cinemático variou significativamente em função das pressões empregadas, não apresentando variação, conforme esperado, em função da velocidade de deslocamento do trator, nem da interação entre os fatores. A combinação cujas pressões aplicadas aos pneus foram as mais altas (P3) apresentou o maior valor médio de avanço cinemático, o que é explicado pelo aumento no raio de rolamento dos pneus quando estes são inflados com pressões maiores.

Observa-se no Quadro 6 que a relação entre raios apresentou valores iguais para as combinações de pressões P1 e P2. Tal fato pode ter sido o

principal responsável pela obtenção de valores de avanço cinemático estatisticamente iguais quando empregadas essas duas combinações.

Os valores negativos de avanço cinemático indicam que a velocidade tangencial dos pneus do eixo dianteiro é inferior a dos pneus traseiros, ou seja, tem-se uma relação de atraso. Furtado Júnior (2013) trabalhando com o mesmo trator utilizado no presente trabalho, obteve para as pressões internas de 82,74; 96,53 e 110,32 kPa, avanços cinemáticos de -0,1387%, -0,2461% e -0,0717%, respectivamente.

De acordo com Linares et al (2006) o desempenho do trator é otimizado quando o avanço cinemático está entre 1 e 5%, desde que o deslizamento dos rodados não ultrapasse 20%. Observa-se no Quadro 7, que apenas com o uso da combinação de pressão P3, foi obtido um avanço cinemático dentro do intervalo citado, devendo-se levar em conta que o trator não exercia esforço na barra de tração no momento das determinações, situação diferente da estudada por Furtado Júnior (2013).

Schlosser et al. (2001) trabalhando com um trator John-Deere, modelo 6400, equipado com pneus de diferentes marcas em cada eixo e inflados com diferentes combinações de pressões (100 e 220 kPa; 160 e 160 kPa; 220 e 160 kPa, respectivamente nos eixos dianteiro e traseiro) encontraram valores de avanço cinemático variando entre -2,5 e 8,8%, atribuindo tal variação aos diferentes raios estáticos obtidos com a variação da pressão interna dos pneus.

4.1.5. Deslizamento dos rodados

Comparando-se os valores de deslizamento observados para os pneus dos eixos dianteiro e traseiro não foram obtidas diferenças significativas entre os mesmos. A análise do deslizamento em função dos fatores estudados no presente trabalho foi então realizada utilizando-se a taxa média de deslizamento entre os dois eixos.

Nenhum dos fatores estudados, nem a interação entre eles, apresentaram efeito significativo sobre a taxa de deslizamento dos rodados do trator. Objetivando-se apenas a visualização dos resultados obtidos, a interação entre os fatores pressões e velocidades foi desdobrada, sendo as médias encontradas para os diferentes tratamentos apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4. Valores médios do deslizamento dos rodados do trator para as diferentes combinações entre pressões internas e velocidades de deslocamento e as respectivas equações ajustadas.

Deslizamento dos rodados (%)				
Combinação de pressões	V1	V2	V3	Equações
P1	-0,52 a	-1,25 a	-0,79 a	$\hat{y} = -0,85$
P2	1,42 a	1,03 a	-0,58 a	$\hat{y} = 0,63$
P3	0,50 a	1,69 a	-0,32 a	$\hat{y} = 0,82$

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. V1: 4,27 km h⁻¹; V2: 5,43 km h⁻¹; V3: 7,31 km h⁻¹. P1: (82,74; 96,53 kPa); P2: (96,53; 110,32 kPa); P3: (110,32; 124,11 kPa).

Os reduzidos valores obtidos para este parâmetro estão associados ao fato de que durante o tráfego na área experimental o trator não foi submetido a esforços na barra de tração. De acordo com Goering et al. (2003), quando se tem baixas taxas de deslizamento, a maior parte da força de tração é utilizada para superar a resistência ao movimento do trator. Nas condições em que o experimento foi desenvolvido, as forças que se opunham ao movimento do trator se restringiram a componente do peso e a resistência ao rolamento, o que contribuiu para o baixo deslizamento.

Ferreira et al. (2000) avaliando a influência da carga aplicada à barra de tração e da pressão interna dos pneus no deslizamento dos rodados para a condição de solo solto, observaram que menores pressões internas proporcionaram menores índices de deslizamento para todas as cargas testadas, diferindo dos resultados obtidos para este trabalho.

Já Furtado Júnior (2013), observou em seu trabalho que a redução da pressão interna dos pneus de 110,32 para 82,74 kPa levou à redução das taxas de deslizamento, a qual foi mais significativa quando a força de tração desenvolvida pelo trator foi superior a 10 kN, diferindo também dos resultados obtidos para este trabalho.

Gabriel Filho et al. (2010) trabalhando com um trator John Deere 6600 com a TDA acionada e exercendo esforço na barra de tração, observaram que ao se elevar gradualmente a velocidade do trator de 3,5 km h⁻¹ para cerca de 6,0 km h⁻¹ não foram obtidas variações significativas no deslizamento dos rodados, corroborando com os resultados aqui apresentados.

Não foram obtidas correlações significativas entre os valores de deslizamento (DR) medidos e os resultados obtidos para os parâmetros referentes ao solo (densidade (D_S), porosidade (P_T) e índice de cone (IC)), exceto para o índice de cone entre 0,30 e 040 m (Quadro 5).

Quadro 5. Coeficientes de correlação entre as variáveis: deslizamento dos rodados (D), densidade do solo (D_s), porosidade total (P_T) e índice de cone (IC).

Coeficientes de correlação entre as variáveis analisadas									
D	D_s			P_T			IC		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
	0,35 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,31 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,21 ^{ns}
									0,39*

P1: (0,0-0,10 m); P2: (0,10-0,20 m); P3: (0,20-0,30 m); P4: (0,30-0,40 m). ^{ns}: não significativo ao nível de 5% de probabilidade. *: significativo ao nível de 5% de probabilidade

4.1.6. Peso estático do trator

O peso total, o peso sobre cada eixo, bem como o peso estimado sobre cada rodado do trator, com 75 % de água nos pneus e com o tanque de combustível completo, obtidos por meio de pesagem em balança rodoviária, são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6. Peso estático do trator e sua respectiva distribuição entre os eixos e rodados

Eixo	Peso no eixo (kN)	Distribuição (%)	Peso por rodado (kN)	Peso/Potência (kN/kW)
Dianteiro	15,92	41,59	7,96	-
Traseiro	22,36	58,41	11,18	-
Total	38,28	100		0,6119

4.1.7. Área de contato pneu-solo em condições estáticas

A forma como se desenvolve a interação entre máquinas e solo depende fundamentalmente da superfície de contato estabelecida entre os mesmos. O comportamento da área de contato para os rodados de cada eixo em função das pressões internas aplicadas aos pneus, submetidos à carga constante, é apresentado nas Figuras 13 e 14.

As estimativas das áreas de contato foram realizadas em condições estáticas, ou seja, com os pneus estaticamente carregados e sem desenvolver nenhum movimento. Os dados apresentados correspondem à média entre os valores obtidos para os pneus direito e esquerdo de cada eixo.

A pressão interna dos pneus apresentou efeito linear nos valores da área de contato dos pneus traseiros (Figura 13), observando-se que o incremento de uma unidade de pressão resulta na redução da área de contato em 0,001 m².

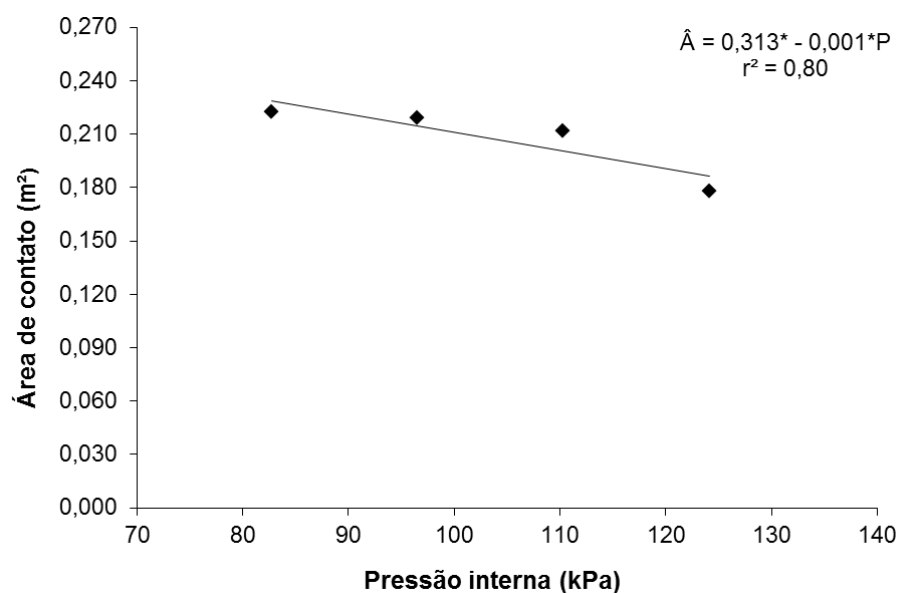


Figura 13. Área de contato entre os pneus traseiros e solo em função da pressão interna dos pneus. *: Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.

Para os pneus dianteiros não se verificou o efeito da pressão sobre a área de contato, sendo o seu comportamento descrito pela média dos valores obtidos quando aplicadas cada uma das pressões internas (Figura 14).

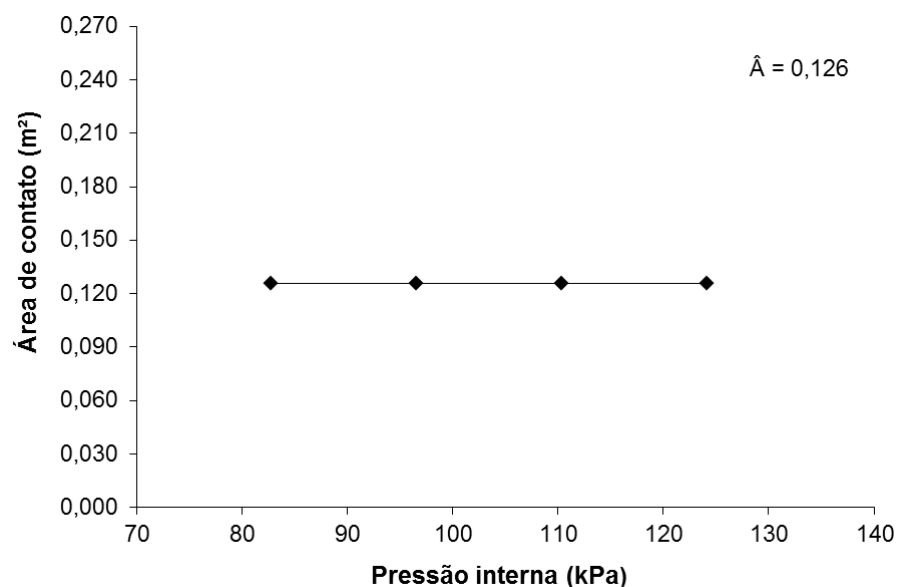


Figura 14. Área de contato entre os pneus dianteiros e o solo em função da pressão interna dos pneus.

As áreas de contato médias entre os pneus traseiros e o solo nas pressões de 82,74 (12 psi), 96,53 (14 psi), 110,32 (16 psi) e 124,11 (18 psi) kPa foram 0,223, 0,219, 0,212 e 0,178 m², respectivamente. Já para os pneus dianteiros nas mesmas pressões, foram 0,136, 0,126, 0,124 e 0,118 m², respectivamente.

Taghavifar e Mardani (2012) determinaram em caixa de solo a área de contato de um pneu radial submetido a diferentes cargas e inflado com diferentes pressões (100, 150 e 290 kPa), obtendo para uma mesma carga, maior área de contato na pressão de 100 kPa. Os autores atribuíram esse efeito ao aumento da deflexão do pneu quando a pressão interna foi reduzida.

Por sua vez, Frantz (2011) verificou uma tendência linear de redução da área de contato de um rodado simples com o aumento da pressão interna dos pneus, obtendo um aumento de 11% no valor da área de contato quando a pressão foi reduzida de 152 para 124 kPa. Para o presente trabalho a área de contato aumentou cerca de 25% para os pneus traseiros quando reduziu-se a pressão interna dos pneus de 124,11 para 82,74 kPa.

Taghavifar e Mardani (2013 c) comparando a determinação da área de contato por meio do processamento de imagens com a obtenção por meio de equações, concluíram que o uso de imagens proporciona uma medição precisa desse parâmetro. Os autores concluíram ainda que a área de contato diminuiu de forma consistente com o aumento da pressão interna, ratificando os resultados obtidos neste trabalho.

4.1.8. Pressão de contato

De posse dos valores das áreas de contato e da carga atuante sobre os pneus, calculou-se a pressão média de contato aplicada a superfície do solo pelo trator, em condições estáticas.

A variação da pressão média de contato em função da pressão interna dos pneus foi avaliada por meio da análise de regressão linear, a qual se mostrou significativa apenas para os resultados referentes aos pneus traseiros (Figura 15), observando-se que o incremento de uma unidade na pressão interna resulta no aumento da pressão média de contato em 0,279 kPa. Para os pneus dianteiros (Figura 16), tal relação não foi significativa.

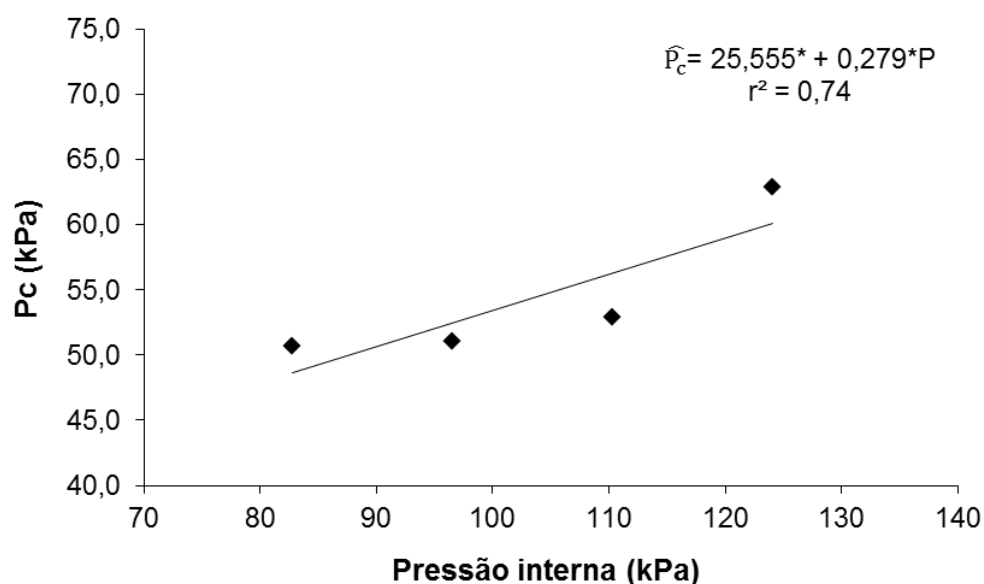


Figura 15. Pressão média de contato (P_c) aplicada à superfície do solo pelos pneus traseiros do trator nas diferentes pressões internas. *: Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.

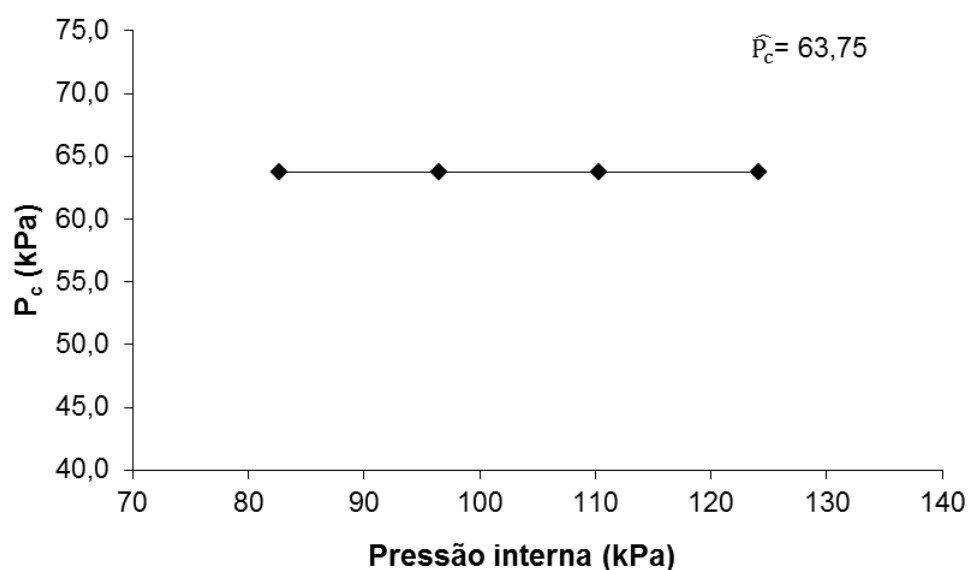


Figura 16. Pressão média de contato (P_c) aplicada à superfície do solo pelos pneus dianteiros do trator nas diferentes pressões internas.

Em média, a pressão de contato aplicada ao solo por cada pneu traseiro atingiu valores de 50,677, 51,060, 52,875 e 62,880 kPa, quando a pressão interna dos pneus foi calibrada para 82,74 (12 psi), 96,53 (14 psi), 110,32 (16 psi) e 124,11 (18 psi) kPa, respectivamente. Os valores médios obtidos para

cada pneu dianteiro nas mesmas condições de pressão foram de, respectivamente, 58,926, 63,575, 64,399 e 68,101 kPa.

Machado et al. (2005) avaliando a pressão aplicada ao solo pelos pneus de um trator quando inflados com diferentes pressões, concluíram que a área de contato entre o pneu e o solo diminuiu com o aumento da pressão interna do pneu, enquanto a pressão de contato aumentou. Mantendo-se a carga sobre o rodado constante os autores encontraram para as pressões internas de 55, 125 e 165 kPa, pressões de contato de 316,76, 353,04 e 438,36 kPa.

Biris et al. (2011) também concluíram que a pressão aplicada pelos pneus ao solo é dependente da pressão interna dos pneus, verificando tal relação tanto para os pneus dianteiros, quanto para os traseiros de um trator.

Uma vez que as áreas de contato determinadas para os pneus traseiros variaram em função das pressões estudadas, na Figura 17 é apresentado o comportamento da pressão de contato média em função das áreas obtidas para estes pneus. Houve efeito da área de contato na variável pressão de contato, obtendo-se para o acréscimo de 1 m² na área de contato uma redução de 281,9 kPa na pressão de contato, comprovando-se que para uma mesma carga aplicada, um aumento da área de contato leva a uma redução na pressão aplicada ao solo, diminuindo o risco de compactação superficial.

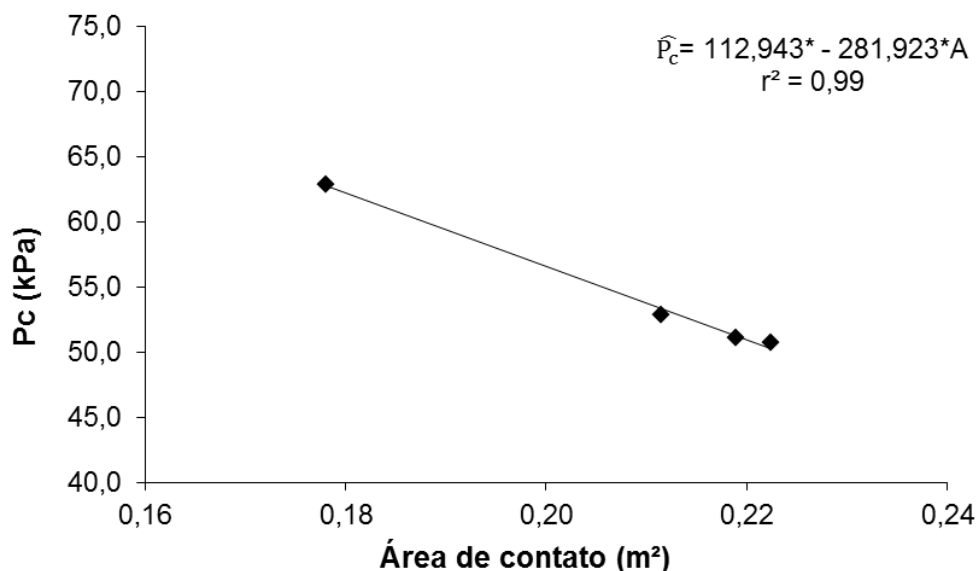


Figura 17. Pressão média de contato (P_c) aplicada à superfície do solo pelos pneus traseiros do trator em função das áreas de contato obtidas. *: Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t.

Taghavifar e Mardani (2013 c) atribuíram a variação obtida em seu trabalho para a pressão de contato aos diferentes valores de área de contato decorrentes da alteração da pressão interna dos pneus. Os autores observaram que a pressão de contato apresentou uma relação linear inversa com a área de contato e direta com a pressão interna dos pneus, assim como no presente trabalho.

Utilizando-se os valores médios das pressões de contato estimou-se a pressão aplicada ao solo pelo conjunto formado por um pneu dianteiro e um traseiro, nas três combinações de pressão utilizadas no experimento em campo. Os valores obtidos são apresentados no Quadro 7.

Quadro 7. Valores estimados da pressão média de contato total aplicada ao solo

Combinação de pressões (dianteiro/traseiro) (kPa)	Pressão média de contato (kPa)		
	Dianteiro	Traseiro	Total
P1: (82,74; 96,53)	58,926	51,060	109,986
P2: (96,53; 110,32)	63,575	52,875	116,450
P3: (110,32;124,11)	64,399	62,880	127,279

Uma vez que estes dados não foram obtidos em condições dinâmicas e que a distribuição das pressões no solo não ocorre de maneira uniforme, não é possível afirmar que o solo em estudo tenha sido submetido exatamente a tais valores de pressão de contato. No entanto, tem-se uma noção de como varia a pressão de contato em virtude do uso destas combinações de pressão.

Estudos mais elaborados sobre a distribuição das tensões decorrentes do tráfego de tratores no solo, tais como os desenvolvidos por Schjonning et al. (2008), Roth e Darr (2012), Mohsenimanesh e Ward (2010) e Berisso et al. (2013) permitem avaliar melhor os efeitos da aplicação de pressões ao solo e as modificações nas propriedades físicas do mesmo, decorrentes desse processo.

4.2. Avaliação dos parâmetros relacionados ao solo

A modificação das propriedades físicas do solo foi avaliada por meio dos parâmetros densidade do solo, porosidade total e índice de cone. Uma vez que os dados referentes a estes parâmetros foram coletados antes e após a aplicação dos tratamentos, a análise estatística das variáveis foi feita com base nos valores da diferença entre os dados obtidos nos dois momentos. Dessa

forma, tornou-se possível observar os efeitos dos tratamentos sem a interferência da heterogeneidade do solo.

4.2.1. Teor de água do solo

A homogeneidade do teor de água do solo ao longo da área experimental quando da aplicação dos tratamentos e nos dois momentos de coleta de dados, é de extrema importância para a avaliação da modificação das propriedades físicas do solo.

Comparando-se os dados do teor de água obtidos nas duas coletas (antes e depois da passagem do trator na área) não foram encontradas diferenças significativas entre as mesmas, comprovando-se que o teor de água do solo não sofreu grandes alterações durante o experimento. Em média o teor de água do solo foi de 0,381 kg kg⁻¹.

4.2.2. Densidade do solo (D_s)

A densidade do solo foi determinada antes e após a passagem do trator em dois pontos por unidade experimental, correspondentes aos rastros direito e esquerdo deixados pelo trator, sendo as coletas feitas em três profundidades (0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m). Para análise dos dados foram consideradas as médias dentro de cada parcela.

Uma análise inicial dos resultados obtidos mostrou que ocorreram diferenças significativas entre os valores de densidade coletados antes da passagem do trator e os coletados após, podendo-se supor que o tráfego alterou esta propriedade. As médias gerais para os dois momentos de coleta são apresentadas na Figura 18.

A densidade final do solo foi cerca de 5% superior ao valor médio obtido antes da passagem do trator, o que está de acordo com Hamza et al. (2011) que verificaram um aumento de 11% na densidade do solo, decorrente do tráfego de um trator pequeno (Massey Ferguson MF 240 - 25,87 kN) percorrendo apenas uma vez a área estudada a uma velocidade de 5 km h⁻¹.

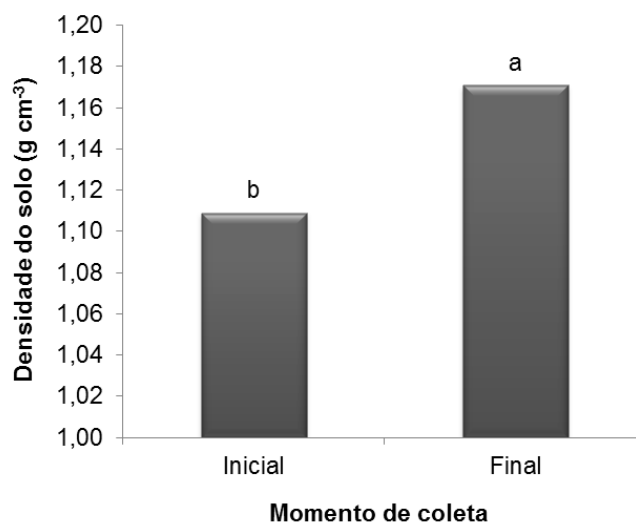


Figura 18. Densidade do solo antes e após o tráfego do trator na área. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste “t” ao nível de 5% de probabilidade.

Magalhães et al. (2009) procurando determinar valores de densidade crítica ao desenvolvimento de plantas com base no intervalo hídrico ótimo (IOH), para um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura muito argilosa da região de Lavras-MG, determinaram a densidade de $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ como crítica, na qual o crescimento das plantas é afetado por restrições físicas do solo (IHO = 0 para qualquer conteúdo de água).

Considerando o valor de densidade crítica obtido pelos autores acima citados, pode-se afirmar que o solo da área experimental após o tráfego do trator, não apresentava restrições de crescimento às plantas, uma vez que a sua densidade média final foi de $1,17 \text{ g cm}^{-3}$. Este valor também está abaixo dos considerados como críticos por Kiehl (1979) que afirma que solos com densidades entre $1,7$ e $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ já ocasionam dificuldade de penetração das raízes. No entanto, deve-se atentar ao fato de que o trator percorreu a área apenas uma vez, e que maiores intensidades de tráfego podem vir a elevar mais a densidade do solo tornando-a restritiva.

Para avaliar o efeito dos tratamentos compostos pela combinação de pressões internas dos pneus e diferentes velocidades de deslocamento na modificação da densidade do solo e, inferir sobre a ocorrência de compactação devido ao tráfego, a análise estatística dos dados de densidade foi feita com

base na diferença ($Y = \text{Final} - \text{Inicial}$) entre os valores determinados nas coletas inicial (antes do tráfego) e final (após o tráfego).

A análise de variância permitiu concluir que não houve efeito significativo da interação entre os fatores combinações de pressões e velocidades, bem como da interação destes com as profundidades de coleta, sobre a densidade do solo.

Analizando-se individualmente os fatores estudados, observou-se que o incremento nos valores de densidade foi significativamente afetado apenas pelas velocidades de deslocamento e pelas profundidades de amostragem. As diferentes combinações de pressões não contribuíram para a alteração da densidade do solo, sendo as médias obtidas para cada uma delas apresentadas na Figura 19.

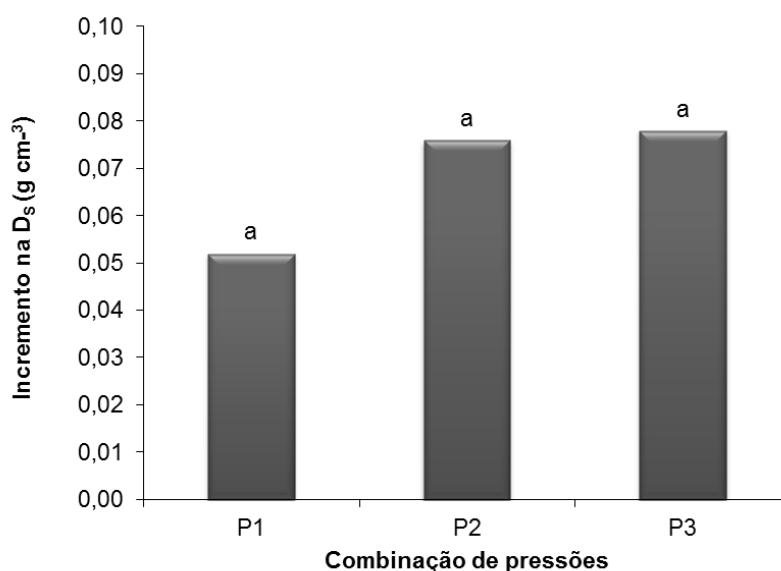


Figura 19. Incremento na D_s em função das combinações de pressões aplicadas aos pneus. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. P1: (82,74; 96,53 kPa); P2: (96,53; 110,32 kPa); P3: (110,32; 124,11 kPa).

Couto et al. (2013) avaliando a compactação de um Latossolo Vermelho de textura argilosa em função da aplicação de diferentes pressões internas aos pneus (96,5 e 137,9 kPa) e cinco intensidades de tráfego concluíram que as pressões, bem como a interação entre estas e os níveis de tráfego não ocasionaram mudanças significativas na compactação do solo avaliada por

meio da densidade, sendo a intensidade de tráfego o único fator que afetou tal propriedade, corroborando com os resultados obtidos para o presente trabalho.

O efeito das diferentes velocidades na modificação da densidade do solo foi estatisticamente significativo. Submetendo-se os dados à análise de regressão, ajustou-se a estes, a equação $\hat{y} = 0,0688$, a qual demonstra que a variação na D_s em função das velocidades usadas foi igual à média dos valores obtidos, uma vez que não ficou claro como a velocidade interferiu na alteração dessa propriedade (Figura 20).

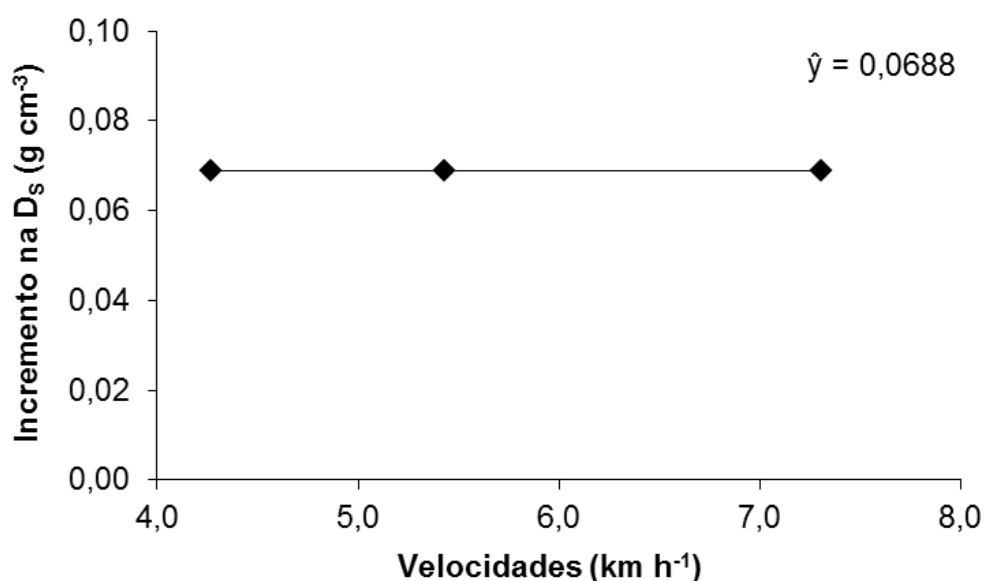


Figura 20. Incremento médio na D_s em função das velocidades do trator.

Os incrementos médios na densidade do solo obtidos para as velocidades de 4,27, 5,43 e 7,31 km h⁻¹, foram de respectivamente 0,07, 0,09 e 0,05 g cm⁻³. Çarman (1994) avaliando os efeitos da variação da carga dinâmica sobre os pneus traseiros e da velocidade de um trator na compactação do solo, observou que a densidade do solo sob os pneus, na profundidade de 0,0 a 0,10 m, aumentou com o aumento da carga sobre o pneu e diminuiu com o aumento da velocidade. Elevando a velocidade de 2,81 para 9 km h⁻¹, o autor obteve uma redução de 7,6% na densidade do solo.

A profundidade de amostragem afetou significativamente a alteração da densidade do solo, sendo os maiores incrementos encontrados entre 0,0 e 0,10 m (Quadro 8).

Quadro 8. Valores médios de densidade do solo (D_s) nas diferentes profundidades amostradas e momentos de coleta

Profundidade (m)	D_s (g cm^{-3})		
	Inicial	Final	Incremento
0,0-0,10	1,04 c	1,12 b	0,084 a
0,10-0,20	1,12 b	1,19 a	0,074 ab
0,20-0,30	1,17 a	1,20 a	0,049 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Observa-se que os menores valores de densidade inicial foram obtidos para a camada mais superficial do solo, o que pode ser atribuído ao efeito das operações de preparo realizadas antes da instalação do experimento. Pode-se então inferir, que uma vez que o solo desta camada encontrava-se mais desagregado, as pressões aplicadas ao mesmo durante o tráfego do trator foram suficientes para elevar a densidade em maior nível, quando comparada as demais profundidades.

O fato de que quanto maior a profundidade menor foi a alteração nesta propriedade pode estar relacionado ainda, à diminuição da influência da pressão interna dos pneus com o aumento da profundidade, uma vez que a compactação do subsolo é geralmente associada a carga atuante sobre o rodado.

Leite (2011) encontrou para o solo de uma área próxima a usada neste experimento, submetido a preparo convencional e cultivado com feijão, valores de densidade de 1,06, 1,23 e 1,33 g cm^{-3} para as profundidades de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente, os quais não foram muito diferentes dos encontrados neste trabalho.

4.2.3. Porosidade total do solo (P_T)

A porosidade do solo é uma das propriedades físicas que sofre grandes alterações com a compactação em decorrência do tráfego de máquinas. Assim como a densidade do solo, no presente trabalho a porosidade total foi determinada antes e após o tráfego do trator na área experimental, sendo os valores analisados a média de duas amostragens por parcela e, a análise estatística feita com base na diferença ($Y = \text{Inicial} - \text{Final}$) entre os valores determinados nas coletas inicial (antes do tráfego) e final (após o tráfego).

Uma análise inicial dos dados mostrou que a porosidade total do solo da área trabalhada teve seus valores reduzidos em decorrência do tráfego

(Figura 21), sendo a porosidade média final de $0,54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor superior ao apresentado como ideal por Lima et al. (2007) que foi de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

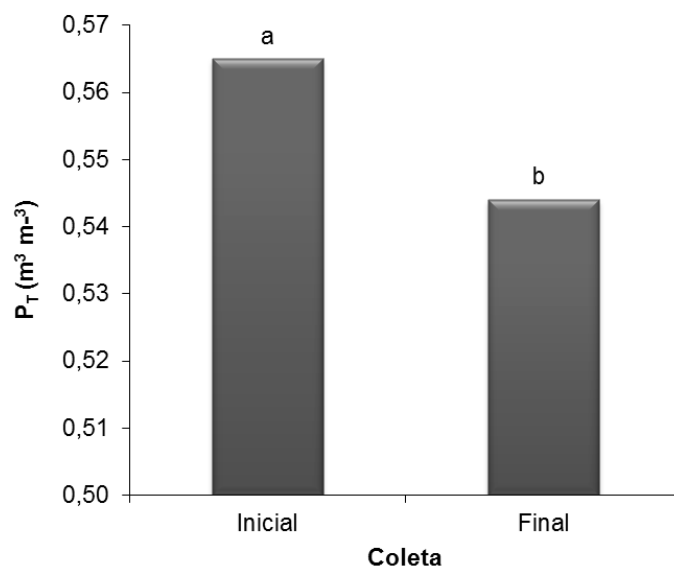


Figura 21. Porosidade total do solo (P_T) antes e após o tráfego do trator na área. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste “t” ao nível de 5% de probabilidade

Tal decréscimo era esperado, uma vez que a aplicação de pressões ao solo leva a um rearranjo das partículas, fazendo com que as partículas menores ocupem o espaço antes ocupado por ar e/ou água. A porosidade total apresentou, portanto, comportamento inverso ao da densidade, tendo em vista que quanto maiores foram os valores de densidade encontrados (Figura 18), menores foram os valores de porosidade.

Silva et al. (2003) avaliando a influência do rodado traseiro de um trator na compressibilidade de um Latossolo Vermelho distrófico típico verificaram a ocorrência de uma redução significativa da macroporosidade do solo entre 0,0 e 0,05 m de profundidade após apenas uma passada do rodado.

Kamimura et al. (2012), avaliando a capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura muito argilosa sobre o qual foi implantada uma lavoura cafeeira, observaram por sua vez, que na linha de tráfego do trator a porosidade total do solo foi alterada até a camada de 0,10-0,13 m e que a sua redução condicionou maiores valores de densidade no local, sendo tais resultados justificados pela grande intensidade de tráfego na área.

A análise de variância dos valores referentes ao decréscimo na porosidade do solo permitiu concluir que esta variável foi influenciada significativamente pela interação entre os fatores combinações de pressões e velocidades do trator, os quais constituíam os tratamentos aplicados; e pelas profundidades de amostragem. As demais fontes de variação não apresentaram efeito sobre esta propriedade.

Os valores médios dos decréscimos na porosidade do solo para cada tratamento aplicado e as equações obtidas para o desdobramento das velocidades dentro de cada combinação de pressões são apresentadas no Quadro 9.

Quadro 9. Decréscimos na porosidade total do solo (P_T) em função das pressões internas dos pneus e velocidades e as respectivas equações ajustadas.

Ajustados:		Decréscimo na P _T (%)			Equações
Combinação de pressões (kPa)	Velocidades (km h ⁻¹)				
	4,27	5,43	7,31		
P1: (82,74;96,53)	2,29 a	1,62 b	1,91 a	$\hat{y} = 1,94$	
P2: (96,53;110,32)	3,25 a	2,11 b	2,08 a	$\hat{y} = 2,47$	
P3: (110,32;124,11)	1,82 a	4,53 a	1,74 a	$\hat{y} = 2,70$	

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

Analisando-se o efeito das pressões no decréscimo da porosidade para cada uma das velocidades, foram observadas diferenças significativas apenas quando utilizada a velocidade de 5,43 km h⁻¹. Observa-se que neste caso, a maior redução na P_T do solo ocorreu quando os pneus do trator foram calibrados com as pressões da combinação P3, sendo a média final para esse tratamento de 0,548 m³ m⁻³, a qual não é considerada restritiva.

Os valores obtidos nesta velocidade para as combinações P1 e P2 não diferiram entre si, mas foram significativamente inferiores ao obtido para P3, a qual apresentou também menor área de contato com o solo e, conseqüentemente, maior pressão de contato, o que pode ter contribuído para a maior alteração na porosidade.

O maior incremento na densidade do solo e consequentemente maior redução da porosidade total, obtidos quando os pneus foram calibrados com as maiores pressões estudadas, provavelmente estão relacionados à influência exercida pela pressão interna dos pneus na tensão vertical no solo sob os mesmos.

Keller e Arvidsson (2004) concluíram em seu trabalho que a pressão interna afetou significativamente a tensão vertical no solo tanto na superfície, quanto no subsolo, a qual foi significativamente inferior para a menor pressão interna a 0,1 e 0,3 m de profundidade, não encontrando diferenças significativas a 0,5 e 0,7 m. Dessa forma, menores pressões internas levariam a menores tensões no solo e consequentemente a menores modificações em sua estrutura.

Quando as velocidades operacionais utilizadas foram de 4,27 e 7,31 km h⁻¹ o decréscimo na P_T não variou entre as pressões estudadas. As equações de regressão encontradas para o desdobramento da velocidade dentro de cada conjunto de pressões não explicaram significativamente a variação do decréscimo na porosidade total do solo, ajustando-se equações em que o \hat{y} é igual à média dos valores obtidos (Quadro 9).

Assim como a densidade do solo, a porosidade total variou em função da profundidade de coleta, sendo que as maiores reduções ocorreram entre 0,00 e 0,10 m (Quadro 10), o que pode ser explicado pela maior intensidade com a qual se desenvolvem tensões nessa camada do solo em decorrência do tráfego.

Quadro 10. Porosidade total do solo (P_T) nas diferentes profundidades amostradas e momentos de coleta

Profundidade (m)	P_T (m ³ m ⁻³)		Decréscimo (%)
	Inicial	Final	
0,0-0,10	0,589 a	0,557 a	3,21 a
0,10-0,20	0,560 b	0,537 b	2,32 ab
0,20-0,30	0,547 b	0,532 b	1,58 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Conforme esperado o menor decréscimo na porosidade do solo ocorreu para a profundidade em que a alteração na densidade foi menor, ou seja, entre 0,20 e 0,30 m. Observa-se, portanto, que o tráfego do trator afetou de forma

semelhante tais propriedades e que a influência das pressões aplicadas à superfície do solo diminuiu à medida que a profundidade de coleta aumentou.

Berisso et al. (2013) procuraram investigar em seu trabalho o impacto da passagem de um pneu agrícola na porosidade total e macroporosidade de um solo de textura franco-argilosa, avaliando essas características em um perfil transversal ao deslocamento do pneu. Os autores verificaram que a porosidade total do solo foi reduzida em maior grau no solo localizado sob o eixo central paralelo ao deslocamento da roda. Na medida em que se distanciou deste, os valores de porosidade obtidos foram maiores. Os autores destacam que tal desuniformidade na alteração dessa propriedade foi verificada em todas as profundidades analisadas e que a redução na porosidade total é devida a tensão normal gerada no solo durante o tráfego, a qual diminuiu com a profundidade e, a uma determinada profundidade, diminuiu com o aumento da distância lateral do eixo central da roda.

Levando-se em conta que no presente trabalho o trator percorreu a área experimental apenas uma vez, sendo observadas tais alterações na densidade e porosidade, pode-se inferir que maiores intensidades de tráfego levem a alterações mais expressivas, elevando o risco de compactação da área.

4.2.4. Índice de cone e perfil penetrométrico

O índice de cone é um dos parâmetros mais utilizados para se avaliar a ocorrência de compactação em áreas agrícolas. Consiste basicamente no valor médio da resistência que um solo oferece à penetração de uma ponta cônica e pode ser correlacionado com a resistência enfrentada pelas raízes das culturas ao se desenvolver no solo.

No presente trabalho a resistência a penetração foi determinada na área trafegada antes e após o tráfego do trator em um perfil transversal ao seu deslocamento, sendo os valores de índice de cone para cada unidade experimental calculados fazendo-se a média dos resultados obtidos para 6 dos 28 pontos de amostragem. A análise estatística dos dados foi feita com base na diferença ($Y = \text{Final} - \text{Inicial}$) entre os valores obtidos antes do tráfego (Inicial) e os obtidos após (Final).

A análise de variância para o acréscimo no índice de cone apresentou resultados significativos apenas para a fonte de variação profundidade de amostragem ao nível de 10% de probabilidade. Os fatores que constituíram os

tratamentos aplicados (combinações de pressões internas dos pneus e velocidades de deslocamento do trator), a interação entre estes e destes com a profundidade, não exerceram efeito estatisticamente significativo ao nível de 5 ou 10 % de probabilidade sobre a alteração no índice de cone (IC).

Para efeito de visualização dos dados, a interação entre as combinações de pressões e velocidades foi desdobrada, sendo as médias dos acréscimos no IC obtidas em função desses fatores apresentadas no Quadro 11.

Quadro 11. Acréscimos no índice de cone (IC) em função das combinações de pressões e velocidades de deslocamento e as respectivas equações ajustadas

Acréscimo no IC (MPa)				
Combinação de pressões (kPa)	Velocidade de deslocamento (km h ⁻¹)			Equações
	4,27	5,43	7,31	
P1: (82,74; 96,53)	0,859 a	0,685 a	0,636 a	$\hat{y} = 0,727$
P2: (96,53; 110,32)	0,621 a	0,674 a	0,422 a	$\hat{y} = 0,572$
P3: (110,32;124,11)	0,945 a	0,965 a	0,602 a	$\hat{y} = 0,837$

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Çarman (1994) avaliando os efeitos da variação da carga dinâmica sobre os pneus traseiros e da velocidade de deslocamento de um trator na compactação do solo, observou que o índice de cone aumentou com o aumento da carga dinâmica e diminuiu com o aumento da velocidade de deslocamento do trator, contrastando com os resultados obtidos neste trabalho. O autor constatou que a maior alteração ocorreu para a menor velocidade (2,81 km h⁻¹) e carga de 13,5 kN (maior aplicada), sendo o índice de cone encontrado no centro da linha de tráfego, entre 0,0 e 0,105 m, 3,02 vezes maior que o encontrado na mesma profundidade em área não trafegada.

O índice de cone diferiu entre as profundidades amostradas, sendo seus valores médios em cada profundidade apresentados no Quadro 12.

Nota-se que as maiores alterações foram obtidas entre 0,10 e 0,20 m, e as menores entre 0,30 e 0,40 m. É possível observar ainda que entre 0,0 e 0,10 m o índice de cone médio obtido após a aplicação dos tratamentos na área trafegada foi quase dez vezes superior ao valor determinado inicialmente.

Quadro 12. Índice de cone (IC) nas diferentes profundidades amostradas e momentos de coleta

Profundidade (m)	IC (MPa)		
	Inicial	Final	Incremento
0,0-0,10	0,073 d	0,711 d	0,637 ab
0,10-0,20	0,601 c	1,582 c	0,983 a
0,20-0,30	1,478 b	2,216 b	0,738 ab
0,30-0,40	2,504 a	2,996 a	0,491 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

Hamza et al. (2011) estudando a influência de combinações de cargas externas (peso de tratores de diferentes tamanhos) e teores de água em um solo de textura argilosa, observaram um aumento do índice de cone com a profundidade, obtendo para as profundidades de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m resistências médias do solo à penetração de 1,14, 1,70 e 2,38 MPa, sendo o aumento da resistência devido ao aumento da carga aplicada, superior em maiores teores de água do solo

A não obtenção de diferenças estatisticamente significativas para a alteração no índice de cone em decorrência dos tratamentos aplicados durante o tráfego do trator neste trabalho, pode estar relacionada a alta variabilidade dos dados obtidos, fruto da heterogeneidade do solo.

Tolon-Becerra et al. (2011) avaliando o efeito do tráfego de um trator leve e um pesado na compactação do solo, observaram que entre 0,0 e 0,20 m de profundidade o índice de cone e a densidade do solo responderam à pressão aplicada ao solo tanto para uma passada dos tratores, quanto para 3 e 5, sendo os maiores valores absolutos obtidos para o trator leve, o que foi justificado pelos autores pela menor área de contato pneu-solo apresentada por este. Entre 0,2 e 0,4 m o trator pesado causou maiores valores de índice de cone e densidade, a partir do que os autores inferiram que para profundidades superiores a 0,20 m, a carga do trator foi a responsável pela compactação.

De acordo com Reichert et al. (2007), a determinação de valores críticos de resistência do solo à penetração, capazes de restringir o crescimento das plantas, não é simples, uma vez que diferentes plantas respondem de maneira diferenciada a uma determinada resistência, além do fato desse parâmetro não ser sensível a bioporosidade. Por outro lado, tem-se que cada solo, para cada teor de umidade, possui um comportamento quanto a resistência à penetração.

Reichert et al. (2007) citam como valor restritivo de resistência do solo à penetração 3,0 MPa. Considerando esse valor e os dados apresentados na Tabela 16, apenas para a profundidade de 0,30 a 0,40 m são encontrados valores críticos ao desenvolvimento de plantas após o tráfego do trator.

Uma vez que a resistência do solo foi medida em 28 pontos em um perfil transversal ao deslocamento do trator, entre 0,0 e 0,4 m de profundidade, para representar os dados obtidos foram elaborados gráficos de isolinhas por meio do software Surfer 11 para cada tratamento aplicado durante o experimento, os quais constituíram assim, seus respectivos perfis penetrométricos. Estes são apresentados nas Figuras 22, 23 e 24, tanto para a amostragem inicial (anterior ao tráfego), quanto para a final (posterior ao tráfego do trator).

De maneira geral, os rodados esquerdo e direito do trator trafegaram na área compreendida entre 0,4 e 0,85 m e, entre 1,95 e 2,4 m, respectivamente, medidos no comprimento do perfil amostrado (CPA), indicado nas figuras.

Embora a análise dos perfis obtidos tenha permitido notar alterações no comportamento da resistência à penetração entre as amostragens realizadas, não ficou totalmente claro o efeito do tráfego do trator, uma vez que de maneira geral, foram notadas modificações ao longo de todo o comprimento do perfil (CPA).

A desuniformidade nas alterações encontradas nas camadas superficiais pode estar relacionada ao fato de que a tensão abaixo dos pneus do trator medida a 0,1 m de profundidade, distribui-se desigualmente tanto no sentido do deslocamento quanto perpendicularmente a este, conforme afirma Keller e Arvidsson (2004).

Roth e Darr (2012) avaliando um sistema de teste de campo desenvolvido pelos mesmos, capaz de medir a tensão normal na interface pneu-solo, concluíram que as tensões normais obtidas para condições típicas de solo e velocidades normais de trabalho do trator agrícola foram muito variáveis, impedindo inclusive o uso de medidas diretas dessa tensão como uma entrada para um sistema de controle de tração em tempo real, objetivo inicial dos autores.

Em geral, observa-se que para todos os tratamentos ocorreu um deslocamento das isolinhas de resistência à penetração para mais próximo da superfície do solo, o que indica a ocorrência de um acréscimo nos valores medidos para essa região.

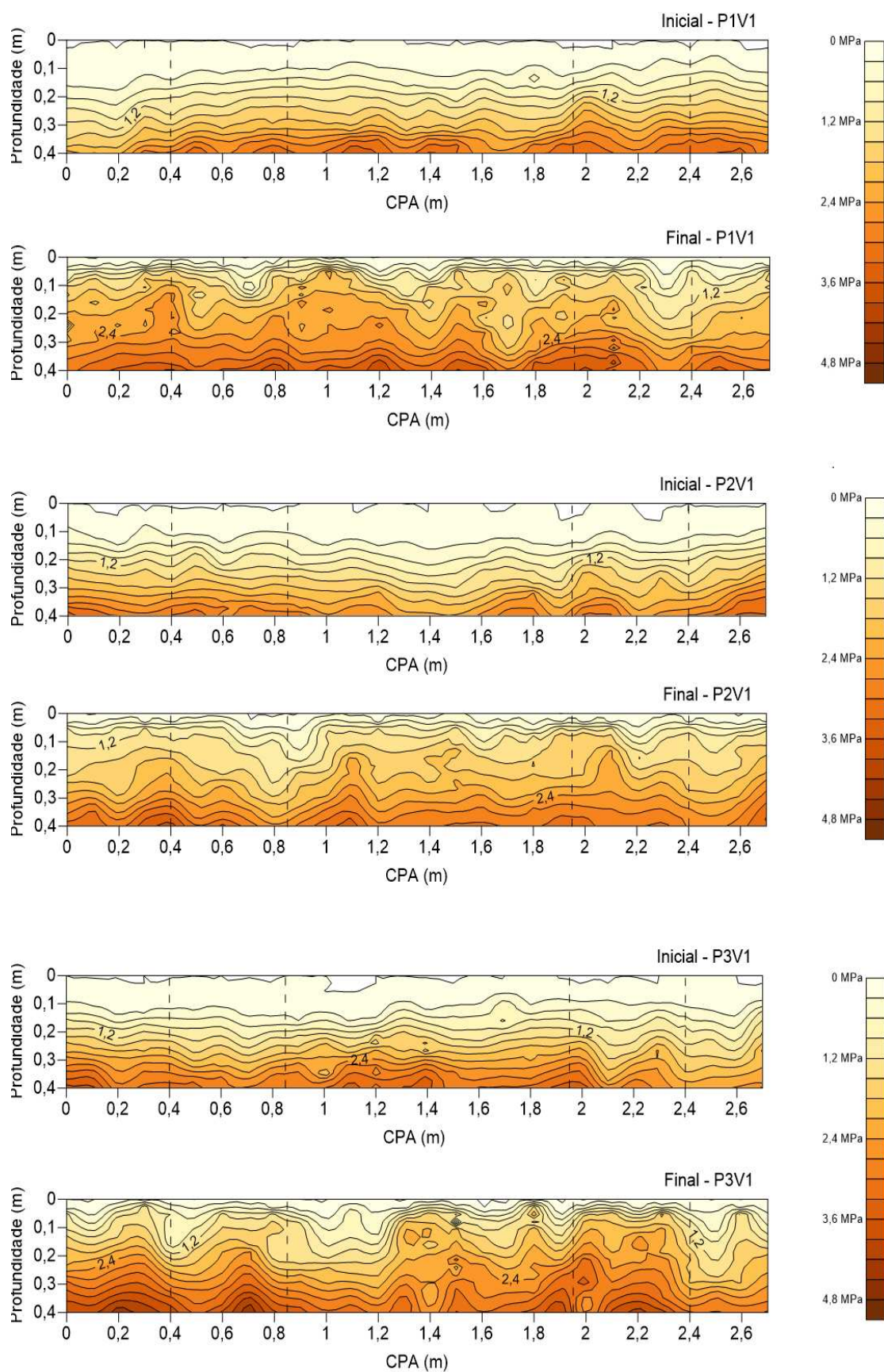


Figura 22. Perfis penetrométricos obtidos antes e após a passagem do trator para a velocidade V1: 4,27 km h⁻¹. P1: (82,74; 96,53 kPa); P2: (96,53; 110,32 kPa); P3: (110,32; 124,11 kPa). C P A: Comprimento do perfil amostrado.

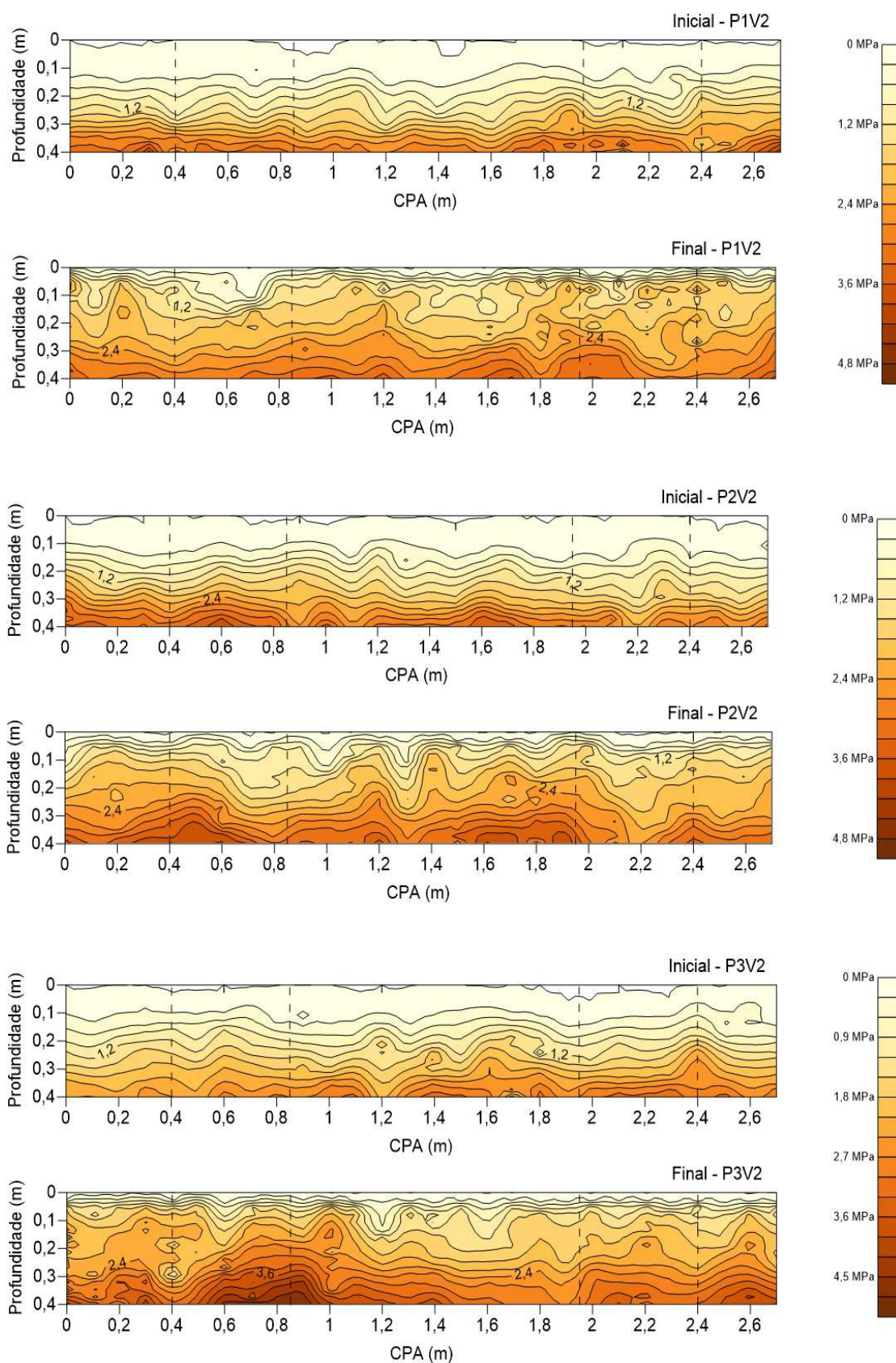


Figura 23. Perfis penetrométricos obtidos antes e após a passagem do trator para a velocidade V2: 5,43 km h⁻¹. P1: (82,74; 96,53 kPa); P2: (96,53; 110,32 kPa); P3: (110,32; 124,11 kPa). C P A: Comprimento do perfil amostrado.

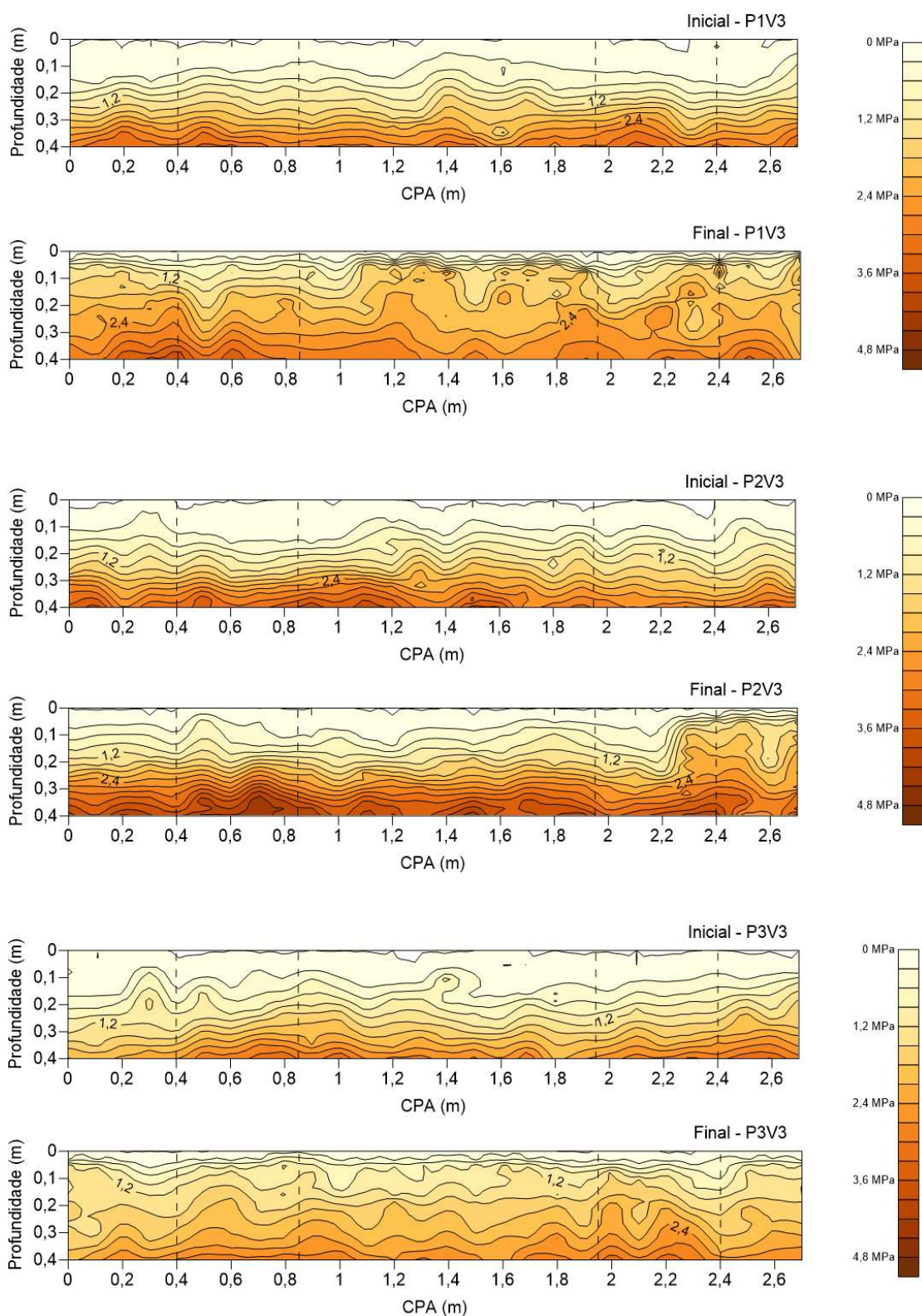


Figura 24. Perfis penetrométricos obtidos antes e após a passagem do trator para a velocidade V1: 7,31 km h⁻¹. P1: (82,74; 96,53 kPa); P2: (96,53; 110,32 kPa); P3: (110,32; 124,11 kPa). C P A: Comprimento do perfil amostrado.

Tal comportamento é facilmente observado comparando-se a profundidade na qual se encontra a isolinha de valor 1,2 MPa nas figuras

referentes as amostragens iniciais e finais. Observa-se que antes do tráfego esta é encontrada na maioria dos casos entre 0,10 e 0,20 m ou em profundidades superiores a 0,20 m, enquanto após a passagem do trator, passou a ser encontrada entre 0,0 e 0,10 m e, 0,10 e 0,20 m. Portanto, a espessura das camadas próximas a superfície com mesma resistência à penetração tornou-se menor. Observa-se ainda que os perfis referentes aos dados iniciais de resistência à penetração apresentam comportamento semelhante para todos os tratamentos.

Tomando como exemplo as figuras referentes ao tratamento P2V1 (Figura 22) nota-se que inicialmente a resistência do solo à penetração entre 0,0 e 0,20 m de profundidade variou de 0,0 a 0,9 MPa. Após o tráfego são encontrados para a mesma profundidade valores de até 2,1 MPa (entre 0,195 e 2,4 m no CPA).

Thagavifar e Mardani (2013 c) procuraram determinar a compactação do solo em três níveis de carga sobre a roda, três velocidades de deslocamento (1,8, 2,7 e 3,6 km h⁻¹) e três intensidades de tráfego (1, 2 e 3 passadas) em solo franco-argiloso disposto em um tanque de solo, com condições controladas. Os autores observaram que a resistência à penetração elevou-se já com a primeira passada da roda sobre o solo. Além disso, a redução da velocidade de 3,6 para 2,7 km h⁻¹ e de 2,7 para 1,8 km h⁻¹ ocasionou um aumento de 11,1% e 13,2% respectivamente para essa propriedade.

De forma semelhante ao presente trabalho, Machado et al. (2005) procuraram avaliar a influência da pressão interna dos pneus na compactação de um solo arenoso submetido ao tráfego de um trator agrícola, sendo executada uma passada sem condição de carregamento. A amostragem também foi realizada transversalmente ao deslocamento do rodado, abrangendo, no entanto, apenas seis pontos. Os autores concluíram que a diferença obtida na resistência do solo à penetração para as diferentes pressões usadas não foi muito pronunciada, verificando-se apesar disso, que o solo foi mais afetado pelo processo de compactação entre 0,10 e 0,30 cm. Neste caso, a identificação das regiões afetadas unicamente pelo tráfego por meio de figuras representativas dos dados, também não foi totalmente clara.

Apesar da avaliação da resistência do solo à penetração no perfil transversal ao deslocamento do trator não ter sido totalmente conclusiva, determinações com esse esquema de amostragem são válidas, como afirmam

Berisso et al. (2013). Os autores concluíram que a amostragem em um perfil transversal ao deslocamento proporcionou melhores informações sobre as alterações induzidas pelo tráfego nas propriedades físicas do solo do que amostragens em locais aleatórios.

5. Conclusões

Nas condições em que o trabalho foi realizado pode-se concluir que:

- O avanço cinemático do trator estudado é afetado pelas combinações de pressões internas dos pneus, alcançando-se um valor ideal quando aplicadas as pressões da combinação P3 (110,32; 124,114 kPa).
- O uso de diferentes pressões internas e velocidades não alteram o deslizamento dos rodados do trator.
- As modificações decorrentes do tráfego do trator nas propriedades físicas do solo, densidade do solo e porosidade total, são afetadas pela velocidade de deslocamento do trator.
- A combinação da pressão P3 (110,32; 124,11 kPa) e velocidade de deslocamento V2 (5,43 km h⁻¹) proporciona a maior redução na porosidade total do solo.

6. Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. São Paulo, 2013.

AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 91p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; van der LINDEN, J. P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, v. 73, p. 145-160, 2003. ISSN 0167-1987.

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

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004. ISSN 0100-0683.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 31, p.1099-1108, 2007.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. Piracicaba, 2004. 302 p.

BARROS, P. R. P. **Simulação da capacidade de tração de um trator 4 x 2 com tração dianteira auxiliar em diferentes condições de superfície**. 2012. 78f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

BERISSO, F. E.; SCHOJONNING, P.; LAMANDÉ, M.; WEISSKOPF, P.; STETTLER, M.; KELLER, T. Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. **Soil and Tillage Research**, v. 131, p. 36-46, 2013. ISSN 0167-1987.

BIRIS, S.S.; UNGUREANU, N.; MAICAN, E.; MURAD, E.; VLADUT, V. FEM model to study the influence of tire pressure on agricultural tractor wheel deformations. **Engineering for rural development**, v. 10, p. 223-228, 2011.

BRIXIUS, W. W. **Traction prediction equations for wheeled vehicles**. Moline: Technical Center Deere & Company, 1975. 23p.

ÇARMAN, K. Tractor forward velocity and tire load effects on soil compaction. **Journal of Terramechanics**, v. 31, n. 1, p. 11-20, 1994. ISSN 0022-4898.

CARVALHO, L. A.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C. A.; 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**, v. 15, n. 9, p. 940-949, 2011. ISSN 1807-1929.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; ARVIDSSON, J.; TORMENA, C. A. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um Cambissolo Háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 477-485, 2009. ISSN 0100-0683.

CORRÊA, I. M. Tração ideal. **Revista Cultivar Máquinas**, v. 1(2), n. 4, p. 31-34, 2001.

COUTO, R. F. **Compactação e recalque superficial de um Latossolo Vermelho em condição de campo e laboratório**. 2012. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 2012.

COUTO, R. F.; REIS, E. F.; VIANA, P. M. F.; HOLTZ, V.; OLIVEIRA, L. A.; ALVES, S. M. F. Compactação e recalque superficial de um Latossolo Vermelho em condição de campo e laboratório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 11, p. 1239-1245, 2013. ISSN 1807-1929.

CUNHA, J. P. A. R.; CASCÃO, V. N.; REIS, E. F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 371-375, 2009. ISSN 1807-8621.

CUNHA, J. P. A. R.; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, v. 10, n. 1-4, p. 1-7, 2002.

DAVIES, D. B.; FINNEY, J. B.; RICHARDSON, S. J. Relative effects of tractor weight and wheel-slip in causing soil compaction. **Journal of Soil Science**, v. 24, n. 3, p. 399-409, 1973. doi: 10.1111/j.1365-2389.1973.tb00775.x.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Solos. 1999. 412p.

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

FERREIRA, M. F.; SCHLOSSER, J. F.; NEUJAHR, E. B.; SCHNEIDER, V. Relação cinemática em um trator 4 x 2 com tração dianteira auxiliar equipado com pneus radiais na eficiência de tração. **Ciência Rural**, v. 30, n. 6, p. 983-986, 2000. ISSN 0103-8478.

FOUNTAS, S.; PARAFOROS, D.; CAVALARIS, C.; KARAMOUTIS, C.; GEMTOS, T. A.; ABU-KHALAF, N.; TAGARAKIS, A. A five-point penetrometer

with GPS for measuring soil compaction variability. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 96, p. 109-116, 2013. ISSN 0168-1699.

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

FURTADO JÚNIOR, M. R. **Análise operacional de um trator agrícola em função da pressão interna dos pneus e inclinação da linha de tração**. 2013. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Mecanização Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

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**, v. 14, n. 3, p. 333-339, 2010. ISSN 1415-4366.

GAO, W.; WATTS, C. W.; REN, T; WHALLEY, W. R. The effects of compaction and soil drying on penetrometer resistance. **Soil and Tillage Research**, v. 125, p. 14-22, 2012, ISSN 0167-1987.

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

HAMZA, M. A.; AL-ADAWI, S. S.; AL-HINAL, K. A. Effect of combined soil water and external load on soil compaction. **Soil Research**, v. 49, n. 2, p. 135-142, 2011. ISSN 1838-6768.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005. ISSN 0167-1987.

HORN, R.; BLACKWELL, P. S.; WHITE, R. The effect of speed of wheeling on soil stresses, rut depth and soil physical properties in a ameliorated transitional red-brown Earth. **Soil and Tillage Research**, v. 13, n. 4, p. 353-364, 1989. ISSN 0167-1987.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil and Tillage Research**, v. 73, n. 1-2, p. 89-99, 2003. ISSN 0167-1987.

KAMIMURA, K. M.; DIAS JÚNIOR, 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 Ciência do Solo**. V. 36, n. 5, p. 1457-1465, 2012. ISSN 0100-0683.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 2, p. 191-205, 2004. ISSN 0167-1987.

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

KNOB, M. J. **Estudo de trafegabilidade aplicado a veículos de roda em transporte e tração**. 2010. 153p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Mecanização agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

KÖPPEN, W. **Climatologia com un studio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p.

LEITE, D. M. **Avaliação da compactação do solo por meio de imagens digitais em diferentes sistemas de preparo do solo na cultura do feijão**. 2011. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Mecanização Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1233-1244, 2007. ISSN 0100-0683.

LINARES, P.; CATALÁN, H.; MÉNDEZ, V. **Teoría de la tracción de tractores agrícolas**. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 215p. Madrid, 2006.

LOPES, S. E. **Compactação de um Latossolo submetido ao tráfego de máquinas de arraste de madeira**. 2003. 62p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

MACHADO, A. L. T.; REIS, A. V.; FERREIRA, M. F. P.; MACHADO, R. L. T.; MACHADO, A. L. C.; BAUER, G. B. Influência da pressão de inflação do pneu do trator na resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 11, n. 4, p. 481-486, 2005.

MAGALHÃES, E. N.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; COSTA, K. A. P.; CASTRO, M. B. Recuperação estrutural e produção de capim-Tifton 85 em um Argissolo Vermelho-Amarelo compactado. **Ciência Animal Brasileira**, v. 10, n. 1, p. 68-76, 2009. ISSN 1809-6891.

MASIERO, F. C. **Determinação do rendimento na barra de tração de tratores agrícolas com tração dianteira auxiliar (4 x 2 TDA)**. 2010. 79f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura). Faculdade de Ciências Agrônômicas – Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, SP, 2010.

MAZIERO, J. V. G.; MIALHE, L. G.; CORRÊA, I. M.; YANAI, K.; MENEZES, J. F. Efeito da patinação da roda motriz de um trator agrícola na compactação do solo. **Bragantia**, v. 56, n. 1, p. 191-197, 1997. ISSN 1678-4499.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: EPU: Ed. Da Universidade de São Paulo, v.1-2, 1980.

MOHSENI MANESH, A.; WARD, S. M. Estimation of a three-dimensional tyre footprint using dynamics soil-tyre contact pressures. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 6, p. 415-421, 2010. ISSN 0022-4898.

MOHSENI MANESH, A.; WARD, S. M.; OWENDE, P. O. M.; JAVADI, A. Modelling of pneumatic tractor tyre interaction with multi-layered soil. **Biosystems Engineering**, v. 104, n. 2, p. 191-198, 2009. ISSN 1537-5110.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 584-590, 2012. ISSN 1415-4366.

MOLINA JR, W. F.; PIEDADE, S. M. S.; AMARAL, J. R. Penetration resistance in a latosol under different moisture and penetration speeds. **Revista Ceres**, v. 60, n. 5, p. 715-721, 2013. ISSN 0034-737X.

MONTEIRO, L. A. **Desempenho operacional e energético, segundo a norma OECD-CODE 2 de dois tratores agrícolas 4 x 2 TDA com motores de 132 kW em pista de concreto e solo agrícola**. 2011. 85f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2011.

MORAES, M. T.; DEBIASE, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Soil penetration resistance in a rhodic eutrudox affected by machinery traffic and soil water content. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 4, p. 748-757, 2013. ISSN 0100-6916.

NASIRI, M.; SOLTANI, M.; MOTLAGH, A. M. Determination of agricultural soil compaction affected by tractor passing using 3D finite element. **Agriculture Engineering International: CIGR Journal**, v. 15, n. 3, p. 11-16, 2013. ISSN 1682-1130.

OLIVEIRA, A. S. **Desenvolvimento de um sensor para avaliar a pressão exercida ao solo decorrente do tráfego de máquinas agrícolas**. 2010. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2010.

OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. S.; BÁRBARO JÚNIOR, L. S.; ROSSETI, K. V. Qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja submetido a níveis de compactação e de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.2, p. 587-597, 2012. ISSN 0100-0683.

PEDROTTI, A.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. **Avanços em Ciência do Solo: A Física do solo na Produção Agrícola e Qualidade Ambiental**. São Cristovão: Editora UFS, Acaraju: Fapitec, 2009. 212p.

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

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v. 42, n. 3-4, p. 259-280, 2005. ISSN 0022-4898.

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

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007. ISSN 1413-7054.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**. v. 26, n.3, p.321-344, 2005. ISSN 1679-0359.

ROTH, J.; DARR, M. J. Measurement of normal stresses at the soil-tire interface. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 2, p. 325-331, 2012.

SANTOS, P. I. B. **Método dos elementos finitos para determinação da área de contato, entre rodado e superfície deformável**. 2003. 332p. Tese (Doutorado em Agronomia- Energia na Agricultura). Faculdade de Ciências Agrônômicas – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2003.

SCHJONNING, P.; LAMANDÉ, M.; TOGERSEN, F. A; ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 1, p. 119-133, 2008. ISSN 1537-5110.

SCHLOSSER, J. F.; LINARES, P. MÁRQUEZ, L. Influência do avanço cinemático das rodas dianteiras sobre a eficiência em tração de tratores com quatro rodas motrizes não isodiamétricas. **Ciência Rural**, v. 34, n. 6, p. 1801-1805, 2004. ISSN 0103-8478.

SCHLOSSER, J. F.; MÁRQUEZ, L.; LINARES, P. Desenvolvimento de metodologia para previsão do fenômeno de vibrações decorrentes da interferência entre eixos de um trator com tração dianteira auxiliar (TDA). **Ciência Rural**, v. 31, n. 6, p. 985-989, 2001. ISSN 0103-8478.

SILVA, R. B.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 973-983, 2003. ISSN 0100-0683.

SILVA, S. G. C. **Variação temporal da densidade do solo e do grau de compactação de um Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado**. 2011. 65p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Solo e Nutrição de Plantas). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2011.

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**, v. 30, n. 5, p. 795-801, 2000. ISSN 0103-8478.

SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade *versus* resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no Recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 659-667, 2010.

ŠMERDA, T.; ČUPERA, J. Tire inflation and its influence on drawbar characteristics and performance – Energetic indicators of a tractor set. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 6, p. 395-400, 2010. ISSN 0022-4898.

SPAGNOLO, R. T.; VOLPATO, C. E. S.; BARBOSA, J. A.; PALMA, M. A. Z.; BARROS, M. M. Fuel consumption of a tractor in fuction of wear, of ballasting and tire inflation pressure. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 131-139, 2012. ISSN 0100-6916.

STAFFORD, J. V.; MATTOS, P. C. The effect of forward speed on wheel-induced soil compaction: Laboratory simulation and field experiments. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 26, n. 4, p. 333-347, 1981. ISSN 0021-8634.

TAGHAVIFAR, H.; MARDANI, A. Contact área determination of agricultural tractor wheel with soil. **Cercetari Agronomice in Moldova**, v. 45, n. 2, p. 15-20, 2012. ISSN 2067-1865.

TAGHAVIFAR, H.; MARDANI, A. Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 2013. ISSN 1658-077X.

TAGHAVIFAR, H.; MARDANI, A. Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. **Journal of Terramechanics**, v. 50, n. 2, p. 99-106, 2013. ISSN 022-4898.

TAGHAVIFAR, H.; MARDANI, A. Potential of functional image processing technique for the measurements of contact area and contact pressure of a radial ply tire in a soil bin testing facility. **Measurement**, v. 46, n. 10, p. 4038-4044, 2013. ISSN 0263-2241.

TOLON-BECERRA, A.; LASTRA-BRAVO, X. B.; BOTTA, G. F.; TOURN, M.; LINARES, P.; RESSIA, M.; BALBUENA, R. Traffic effect on soil compaction and yields of wheat in Spain. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 2, p. 395-403, 2011. ISSN 2171-9292.

UFV – UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **SAEG – Sistema para Análises Estatísticas**. Versão 9.1: Fundação Arthur Bernardes – UFRV, Viçosa, 2007.

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**, v. 16, n. 9, p. 969-977, 2012. ISSN 1415-4366.

VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; MARIA, I. C.; TULLER, M. Modelling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v.166, n. 1, p. 92-101, 2011. ISSN 0016-7061.

VOGELMANN, E. S.; MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; ROSA, D. P.; BARROS, C. A. P.; REINERT, D. J. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo trafegado e escarificado. **Ciência Rural**, v. 42, n. 2, p. 291-297, 2012. ISSN 0103-8478.

WULFSOHN, D. Part II: Soil-Tire Contact Area, of Chapter 2: Traction Mechanics. In: UPADHYAYA, S. K.; CHANCELLOR, W. J.; PERUMPRAI, J. V.; WULFSOHN, D. WAY, T. R. **Advances in Soils Dynamics**. St. Joseph, Michigan: ASABE, 2009. v. 3, cap. 2, p. 59-84.

YANAI, K.; SILVEIRA, G. M.; LANÇAS, K. P.; CORRÊA, I. M.; MAZIERO, J. V. G. Desempenho operacional de trator com e sem o acionamento da tração dianteira auxiliar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 8, p. 1427-1434, 1999. ISSN 0100-204X.

ZOZ, F. M.; GRISSE, R. D. **Traction and Tractor Performance**. ASAE Distinguished Lecture Series – Tractor Design No. 27, Agricultural Equipment Technology Conference , 9-11 February 2003, Louisville, Kentucky, USA, ASAE Publication Number 913C0403.