

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

Doi:<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n1p117-127/2015>

JARDÊNIA R. FEITOSA¹, HAROLDO C. FERNANDES², MAURI M. TEIXEIRA³,
PAULO R. CECON⁴

RESUMO: O tráfego intenso de tratores ocasiona alterações na qualidade física do solo, desencadeando processos de compactação e erosão. O presente trabalho teve como objetivo 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), em propriedades físicas de um solo usadas como parâmetros para a avaliação da compactação e em parâmetros operacionais do trator relacionados ao seu desempenho. Para tanto, foram determinadas a densidade do solo, a porosidade total e o índice de cone de amostras de solo coletadas antes e após a passagem do trator. Determinou-se, ainda, o avanço cinemático do trator, a patinagem dos rodados, a área de contato entre o pneu e o solo, e a pressão de contato aplicada à superfície do solo. O uso de diferentes combinações de pressões internas e de velocidades de deslocamento não alteraram a patinagem dos rodados do trator, nem o índice de cone do solo. A densidade foi afetada apenas pelas velocidades de deslocamento. A aplicação das pressões de 110 e 124 kPa, respectivamente, nos pneus dianteiros e traseiros do trator, combinada com a velocidade de deslocamento de 1,51 m s⁻¹ ocasionou a maior redução na porosidade total.

PALAVRAS-CHAVE: compactação, densidade do solo, patinagem dos rodados, porosidade.

INFLUENCE OF TIRE INNER PRESSURE AND TRAVELLING SPEED ON TRACTOR OPERATING PARAMETERS AND SOIL PHYSICAL PROPERTIES

ABSTRACT: Heavy traffic of tractors causes changes in soil physical quality triggering compaction and erosion. This study aimed to evaluate the influence of tire inner pressure and travelling speed of a 4x2 FWA (front wheel assist) farm tractor on soil physical properties, using the parameters of soil compaction evaluation, and tractor operating parameters related to the machine performance. For these purposes, soil bulk density, total porosity and cone index were determined from soil samples collected before and after tractor passage. Moreover, it was also analyzed tractor kinematic advance, wheel slipping, ground-tire interface and soil surface pressure beneath the tires. Varied inner pressure and travelling speed sets did not change both soil wheel slipping and cone index. On the other hand, soil density was affected only by travelling speed changes. A greater reduction in total porosity was observed by applying 124 and 110 kPa pressure in tractor front and rear tires, respectively, in combination with 1.51 m s⁻¹ travelling speed.

KEYWORDS: compaction, soil bulk density, wheel slipping, total porosity.

INTRODUÇÃO

O tráfego de máquinas agrícolas é apontado como a principal causa da compactação, intensificando-se pelo incremento no peso das máquinas e implementos, e pela intensidade do uso

¹ Eng^a Agrícola e Ambiental, Doutoranda em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV/Viçosa – MG, Fone: (31) 3899 1860, jardenia.feitosa@ufv.br.

² Eng^o Agrícola, Prof. Titular, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV/Viçosa – MG, haroldo@ufv.br.

³ Eng^o Agrônomo, Prof. Titular, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV/Viçosa – MG, mauri@ufv.br.

⁴ Eng^o Agrônomo, Prof. Titular, Departamento de Estatística, UFV/Viçosa – MG, cecon@ufv.br.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 17-2-2014

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 04-8-2014

do solo decorrentes do processo de modernização da agricultura (BERISSO et al., 2013; FOUNTAS et al., 2013).

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 de deslocamento; intensidade de tráfego e operações realizadas pelos tratores, são alguns dos fatores que influenciam as modificações ocasionadas pelo tráfego na estrutura do solo.

Segundo COUTO (2012), a capacidade de um rodado para desenvolver máxima força de tração com mínima compactação do solo é estabelecida pela distribuição e magnitude das pressões e tensões cisalhantes sobre uma área de contato. A pressão interna dos pneus tem grande importância na distribuição de tensões e influencia no tamanho da área de contato (BIRIS et al., 2011), cuja estimativa 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 (TAGHAVIFAR e MARDANI, 2013 b).

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

A velocidade de deslocamento dos tratores durante as operações agrícolas também é apontada como um fator que influencia na modificação das propriedades físicas do solo. TAGHAVIFAR & 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.

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

Propriedades físicas do solo têm sido usadas como parâmetros para caracterizar o processo de compactação, destacando-se entre elas a densidade do solo, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade e a resistência do solo à penetração (MORAES et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2012), as quais influenciam significativamente o desenvolvimento das culturas.

Assim, objetivou-se com este 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), em propriedades físicas de um solo usadas como parâmetros para a avaliação da compactação, e em parâmetros operacionais do trator relacionados ao seu desempenho.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em uma área experimental 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). O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (EMBRAPA, 1999), de textura argilosa, e vinha sendo cultivado no sistema de plantio direto há aproximadamente seis anos.

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.

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 de deslocamento do trator; e nas subparcelas, as profundidades de amostragem, adotando-se o delineamento em blocos casualizados, com três repetições, totalizando 27 parcelas experimentais, cada uma com área de 30 m² (3 x 10 m).

Foi utilizado um trator John Deere[®], modelo 5705 4 x 2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e potência de 62,56 kW (85 cv) no motor a 2.400 rpm, que operou lastrado com água nos pneus a um nível de 75% de seu volume, com a tração dianteira auxiliar acionada e sem carga na barra de tração, e percorreu cada parcela apenas uma vez. O trator foi equipado com pneus diagonais modelos Pirelli[®] TM 95 18.4-30 no eixo traseiro e Goodyear[®] Dyna Torque II 12.4-24 no eixo dianteiro.

Foram utilizados três conjuntos de pressões internas, denominados P1 (83; 96 kPa), P2 (96; 110 kPa) e P3 (110; 124 kPa), sendo as pressões distribuídas nos pneus dos eixos dianteiro e traseiro, respectivamente; e três velocidades operacionais médias de 1,19; 1,51 e 2,03 m s⁻¹, denominadas, respectivamente, V1, V2 e V3, sendo os tratamentos compostos da combinação de cada conjunto de pressões com cada uma das velocidades utilizadas.

Para avaliar as possíveis modificações no teor de água do solo, densidade do solo e na porosidade total, foram realizadas amostragens nas parcelas experimentais, antes e após a aplicação dos tratamentos. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). Para tanto, em cada parcela, foram feitas duas amostragens, uma na área correspondente ao rastro direito e outra na correspondente ao rastro esquerdo deixados pelos pneus do trator. Os pontos iniciais de coleta foram demarcados, e as amostragens, após a aplicação dos tratamentos, foram feitas em locais próximos a estes, e sobre os rastros deixados pelos rodados, sendo as amostras coletadas em três profundidades: 0,0-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m. O teor de água do solo, a densidade de partículas e a porosidade total do solo foram determinados conforme EMBRAPA (1997), seguindo o mesmo esquema de amostragem feito para a densidade do solo.

A resistência do solo à penetração foi obtida utilizando-se de um penetrômetro, modelo PLG1020. Em cada parcela, foram feitas amostragens em 28 pontos espaçados entre si em 0,10 m, em um perfil transversal ao deslocamento do trator. 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. Os valores de índice de cone foram calculados a partir das médias de cada camada, ou seja, a cada 0,10 m de profundidade. Os valores obtidos para os pontos centrais de coleta situados na área trafegada (três pontos para o rastro do rodado direito e três para o rodado esquerdo) foram utilizados para compor o índice de cone de cada uma das parcelas experimentais.

Durante a realização do experimento, a velocidade operacional do trator, a pressão interna dos pneus e a rotação dos eixos motrizes foram monitoradas utilizando-se de um conjunto de transdutores conectados a um sistema de aquisição de dados, sendo os resultados obtidos utilizados na determinação da relação mecânica entre eixos, avanço cinemático e patinagem dos rodados.

O peso total do trator e o peso sobre cada eixo motriz foram determinados por meio de pesagem em balança rodoviária, durante a qual o trator se encontrava com tanque de combustível cheio e com lastro líquido nos pneus (75%). O peso sobre cada rodado foi obtido considerando-se que o peso total sobre cada eixo se distribuiu igualmente sobre os rodados direito e esquerdo.

A área de contato dos pneus do trator usados no experimento, quando inflados com as pressões 83; 96; 110 e 124 kPa, foi determinada utilizando-se de uma caixa de solo para a obtenção das impressões deixadas pelo pneu sobre o solo, as quais foram posteriormente fotografadas, sendo as imagens processadas no software AutoCad 2011, no qual foi feita a correção da escala e determinadas as áreas de contato. A pressão média de contato aplicada pelos rodados ao solo foi determinada dividindo-se a carga suportada pelos rodados pela área de contato pneu-solo.

Os dados obtidos para os parâmetros referentes ao solo foram submetidos à análise de variância no esquema de parcelas subdivididas. Já para os parâmetros patinagem 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 de deslocamento.

Para os fatores qualitativos, as médias foram comparadas, utilizando-se do teste de Tukey ou do 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).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O avanço cinemático do trator estudado variou significativamente em função das pressões empregadas (Tabela 1), 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 inflados com pressões maiores.

TABELA 1. Valores médios do avanço cinemático para cada combinação de pressões utilizada.
Kinematics advance means for each used pressure combination.

Combinação de pressões	Avanço cinemático (%)
P1: (83; 96 kPa)	-0,2849 b
P2: (96; 110 kPa)	-0,2524 b
P3: (110; 124 kPa)	1,2667 a

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

Os valores negativos de avanço cinemático indicam que a velocidade tangencial dos pneus do eixo dianteiro é inferior à dos pneus traseiros, ou seja, que se tem uma relação de atraso. FURTADO JÚNIOR (2013), trabalhando com o mesmo trator utilizado neste trabalho, obteve, para as pressões internas de 83; 96 e 110 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 a patinagem dos rodados não ultrapasse 20%, o que foi observado apenas com o uso da combinação de pressão P3 (Tabela 1).

A análise da patinagem dos rodados do trator em função dos fatores estudados foi realizada utilizando-se da taxa média de patinagem entre os eixos dianteiro e traseiro do trator. As pressões internas dos pneus e as velocidades de deslocamento não afetaram significativamente a patinagem dos rodados, conforme observado na Tabela 2.

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 têm baixas taxas de patinagem, 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 restringiram-se a componente do peso e a resistência ao rolamento, o que contribuiu para a baixa patinagem.

TABELA 2. Valores médios da patinagem dos rodados do trator para as diferentes combinações entre pressões internas e velocidades de deslocamento. **Tractor wheel slipping means for the different combinations of tire inner pressures and travelling speeds.**

Combinação de pressões	Patinagem dos rodados (%)			
	V1	V2	V3	Equações
P1: (83; 96 kPa)	-0,52 a	-1,25 a	-0,79 a	$\hat{y} = -0,85$
P2: (96; 110 kPa)	1,42 a	1,03 a	-0,58 a	$\hat{y} = 0,63$
P3:(110; 124 kPa)	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: 1,19 m s⁻¹; V2: 1,51 m s⁻¹; V3: 2,03 m s⁻¹.

GABRIEL FILHO et al. (2010), trabalhando com um trator Jonh Deere 6600 com a TDA acionada e exercendo esforço na barra de tração, observaram que, ao se elevar gradualmente a velocidade de deslocamento de 0,97 m s⁻¹ para cerca de 1,67 m s⁻¹, não foram obtidas variações significativas na patinagem dos rodados, corroborando os resultados aqui apresentados.

As estimativas das áreas de contato entre os pneus usados no experimento e o solo foram realizadas em condições estáticas, e 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 1), observando-se que o incremento de uma unidade de pressão resulta na redução da área de contato em 0,001 m².

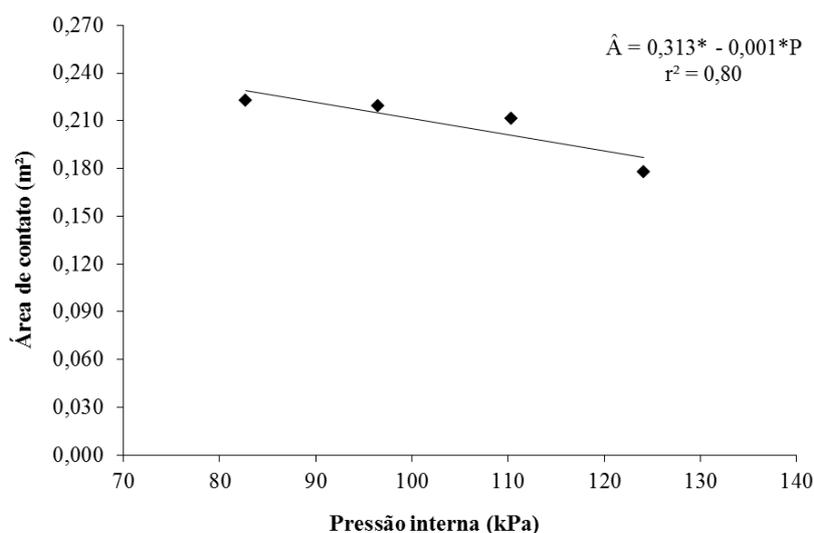


FIGURA 1. Área de contato entre os pneus traseiros e o solo em função da pressão interna dos pneus. *: Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste t. **Rear tire and soil surface contact area variation according to tire inner pressure changes. *: Significant at 5% probability by t-test.**

Para os pneus dianteiros, não se verificou efeito da pressão interna dos pneus sobre a variável área de contato. As áreas de contato médias entre os pneus traseiros e o solo, nas pressões de 83; 96; 110 e 124 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 & 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. Para o

presente trabalho, a área de contato aumentou cerca de 25% para os pneus traseiros quando se reduziu a pressão interna dos pneus, de 124 para 83 kPa.

De posse dos valores das áreas de contato e da carga atuante sobre cada pneu (pneu dianteiro: 7,96 kN; pneu traseiro: 11,18 kN), calculou-se a pressão média de contato aplicada à superfície do solo pelo trator. A variação da pressão média de contato em função da pressão interna foi avaliada por meio da análise de regressão linear, a qual se mostrou significativa apenas para os resultados referentes aos pneus traseiros (Figura 2), observando-se que a variação em uma unidade na pressão interna dos pneus resulta no aumento da pressão média de contato, em 0,279 kPa. Para os pneus dianteiros, não se verificou efeito da pressão interna na pressão de contato aplicada ao solo.

Em média, a pressão de contato aplicada ao solo pelos pneus traseiros atingiu valores de 50,68; 51,06; 52,87 e 62,88 kPa, quando a pressão interna dos pneus foi calibrada para 83; 96; 110 e 124 kPa, respectivamente. Os valores médios obtidos para cada pneu dianteiro nas mesmas condições de pressão foram de, respectivamente, 58,93; 63,57; 64,40 e 68,10 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 constante a carga sobre o rodado, 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.

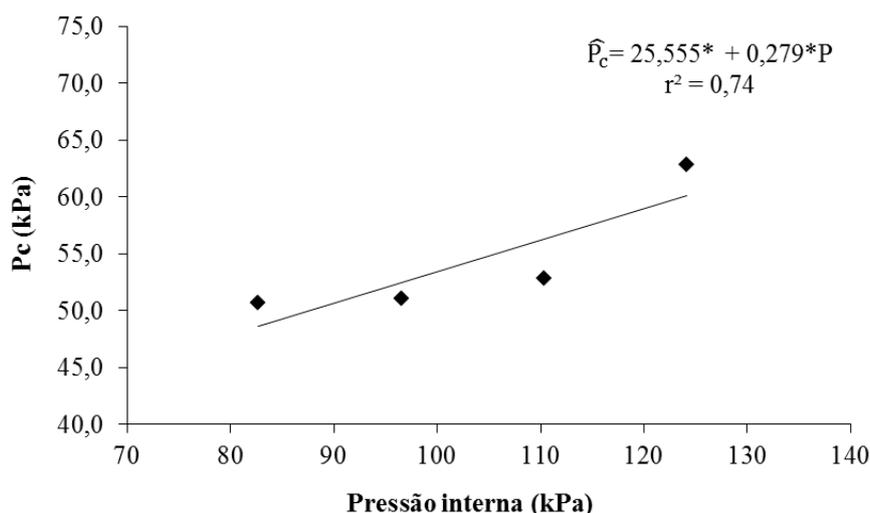


FIGURA 2. Pressão média de contato (P_c) aplicada à superfície do solo pelos pneus traseiros do trator nas diferentes pressões internas. *: Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste t. **Mean contact pressure (P_c) applied onto soil surface by tractor rear tires at different tire inner pressures. *: Significant at 5% probability by t-test.**

A modificação das propriedades físicas do solo foi avaliada por meio dos parâmetros densidade do solo, porosidade total e índice de cone. O teor de água do solo não diferiu entre os dois momentos de coleta, sendo a média geral de $0,381 \pm 0,03 \text{ kg kg}^{-1}$, garantindo-se assim que a umidade do solo não interferiu nos resultados obtidos.

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 alteração na densidade do solo (Tabela 3).

TABELA 3. Valores médios do incremento na densidade do solo (DS), nos diferentes tratamentos e profundidades amostradas. **Mean values of soil bulk density (SBD) raise at the different treatments and sampled depths.**

Profundidade (m)	Incremento na DS (g cm^{-3})			
	Combinação de pressões (kPa)	Velocidades (m s^{-1})		
		1,19	1,51	2,03
0,00 – 0,10	P1: (83; 96)	0,099 a	0,063 a	0,061 a
	P2: (96; 110)	0,124 a	0,083 a	0,056 a
	P3: (110; 124)	0,066 a	0,141 a	0,061 a
0,10 – 0,20	P1: (83; 96)	0,033 a	0,088 a	0,026 a
	P2: (96; 110)	0,109 a	0,092 a	0,061 a
	P3: (110; 124)	0,082 a	0,142 a	0,029 a
0,20 – 0,30	P1: (83; 96)	0,035 a	0,024 a	0,042 a
	P2: (96; 110)	0,075 a	0,043 a	0,043 a
	P3: (110; 124)	0,030 a	0,099 a	0,047 a

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

Analisando-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.

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 DS, 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.

Os incrementos médios na densidade do solo, obtidos para as velocidades de 1,19; 1,51 e 2,03 m s^{-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 deslocamento 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, que, quando elevada de 0,78 para 2,5 m s^{-1} , reduziu em 7,6% a 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 (Tabela 4). 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 inferir que, uma vez que o solo desta camada se encontrava mais desagregado, as pressões aplicadas ao mesmo durante o tráfego do trator foram suficientes para elevar a densidade em maior nível, quando comparada às demais profundidades.

TABELA 4. Valores médios de densidade do solo (DS) nas diferentes profundidades amostradas e nos momentos de coleta. **Mean values of soil bulk density (SBD) at the different sampling depths and times.**

Profundidade (m)	DS (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.

Considerando-se os valores obtidos para todas as profundidades e tratamentos avaliados, a densidade média final do solo foi de $1,17 \pm 0,06 \text{ g cm}^{-3}$, cerca de 5% superior ao valor médio obtido antes da passagem do trator ($1,11 \pm 0,08 \text{ g cm}^{-3}$), o que está de acordo com HAMZA et al. (2011), que verificaram o aumento de 11% na DS, decorrente do tráfego de um trator Massey Ferguson MF 240 percorrendo uma vez a área estudada, à velocidade de $1,4 \text{ m s}^{-1}$.

A porosidade do solo foi influenciada significativamente apenas pela interação entre os fatores combinações de pressões e velocidades de deslocamento, os quais constituíram os tratamentos aplicados; e pelas profundidades de amostragem. Os valores médios dos decréscimos na porosidade do solo para cada tratamento e as equações obtidas para o desdobramento das velocidades dentro de cada combinação de pressões são apresentados na Tabela 5. Os valores correspondem às médias obtidas para cada tratamento sem considerar a profundidade de coleta.

TABELA 5. Decréscimos na porosidade total do solo (PT) em função das pressões internas dos pneus e das velocidades de deslocamento e as respectivas equações ajustadas. **Soil total porosity (TP) decreases as a function of tire inner pressure and travelling speed variations and respective adjusted equations.**

Combinação de pressões (kPa)	Decréscimo na PT (%)			Equações
	Velocidades (m s^{-1})			
	1,19	1,51	2,03	
P1: (83; 96)	2,29 a	1,62 b	1,91 a	$\hat{y} = 1,94$
P2: (96; 110)	3,25 a	2,11 b	2,08 a	$\hat{y} = 2,47$
P3: (110; 124)	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 $1,51 \text{ m s}^{-1}$. Observa-se que, neste caso, a maior redução na PT do solo ocorreu quando os pneus do trator foram calibrados com as pressões da combinação P3, sendo a média final para esse tratamento de $0,548 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, a qual não é considerada restritiva, de acordo com LIMA et al. (2007).

Os valores obtidos nesta velocidade, para as combinações P1 e P2, não diferiram entre si, mas foram significativamente inferiores ao obtido para P3, combinação que 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 PT.

Quando as velocidades operacionais utilizadas foram $1,19$ e $2,03 \text{ m s}^{-1}$, o decréscimo na PT 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 PT do solo, ajustando-se então uma reta horizontal igual à média dos valores obtidos (Tabela 5).

Avaliando-se apenas o efeito da profundidade sobre os valores de porosidade, observou-se que, assim como a DS, a porosidade total variou em função da profundidade de coleta, sendo as maiores reduções encontradas entre $0,00$ e $0,10 \text{ m}$ (Tabela 6), o que pode ser explicado pela maior intensidade com a qual se desenvolvem tensões nessa camada do solo em decorrência do tráfego.

TABELA 6. Porosidade total do solo (PT) nas diferentes profundidades amostradas e nos momentos de coleta. **Soil total porosity (TP) at the different sampling depths and times.**

Profundidade (m)	PT (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), procurando investigar o impacto da passagem de um pneu agrícola na porosidade total de um solo de textura francoargilosa, avaliando essas características em um perfil transversal ao deslocamento do pneu, verificaram que a PT 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 obtidos foram maiores. Os autores destacam que tal desuniformidade foi verificada em todas as profundidades analisadas e que a redução na PT é devida à 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 na porosidade, pode-se inferir que maiores intensidades de tráfego levem a alterações mais expressivas, elevando o risco de compactação.

A análise dos dados referentes ao acréscimo no índice de cone (IC) 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 IC.

Os valores médios do IC em cada profundidade amostrada são apresentados na Tabela 7. 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. Observa-se ainda que, entre 0,0 e 0,10 m, o IC médio obtido após a aplicação dos tratamentos na área trafegada foi quase dez vezes superior ao valor determinado inicialmente.

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.

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 à alta variabilidade dos dados obtidos, fruto da heterogeneidade do solo.

TABELA 7. Valores médios do índice de cone (IC) nas diferentes profundidades amostradas e nos momentos de coleta. **Cone index (CI) mean values at the different sampling depths and times.**

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.

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.

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 maiores pressões; que o uso de diferentes pressões internas e velocidades de deslocamento não alteram a patinação dos rodados do trator quando se desloca sem carga na barra de tração; e que a aplicação das pressões de 110 e 124 kPa, respectivamente, nos pneus dianteiros e traseiros do trator, combinada com a velocidade de deslocamento de 1,51 m s⁻¹, ocasionou a maior redução na porosidade total.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo suporte financeiro que permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 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*, Amsterdam, v. 131, p. 36-46, 2013.
- 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*, Berlin, v. 10, p. 223-228, 2011.
- ÇARMAN, K. Tractor forward velocity and tire load effects on soil compaction. *Journal of Terramechanics*, Oxford, v. 31, n. 1, p. 11-20, 1994.
- 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, 2012.
- 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**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- 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*, New York, v. 96, p. 109-116, 2013.

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, 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*, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 333-339, 2010.

GOERING, C. E.; STONE, M. L.; SMITH, D. W.; TURNQUIST, P. K. Traction and transport devices. In: *Off-Road Vehicle Engineering Principles*. St. Joseph: ASAE, 2003. cap. 13, p. 351-382.

HAMZA, M. A.; AL-ADAWI, S. S.; AL-HINAI, K. A. Effect of combined soil water and external load on soil compaction. *Soil Research*, Rome, v. 49, n. 2, p. 135-142, 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*, Viçosa, MG, v. 31, n. 6, p. 1233-1244, 2007.

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

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*, Pelotas, v. 11, n. 4, p. 481-486, 2005.

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

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*, Viçosa, MG, v.36, n.2, p. 587-597, 2012.

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

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

TAGHAVIFAR, H.; MARDANI, A. Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, Saudi Arabia, v.13, n.1, p.57-66, 2013.

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*, Oxford, v. 50, n. 2, p. 99-106, 2013.

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*, Madrid, v. 9, n. 2, p. 395-403, 2011.

UFV – Universidade Federal de Viçosa. *SAEG – sistema para análises estatísticas*. Versão 9.1. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes, UFRV, 2007.