

O TRÁFEGO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS E AS PROPRIEDADES FÍSICAS, HÍDRICAS E MECÂNICAS DE UM LATOSSOLO DOS CERRADOS⁽¹⁾

R. B. SILVA⁽²⁾, M. S. DIAS JUNIOR⁽³⁾,
F. A. M. SILVA⁽⁴⁾ & S. M. FOLE⁽⁵⁾

RESUMO

No Brasil, o tráfego contínuo e inadequado de rodados de máquinas e a ação da soleira dos implementos sobre áreas agrícolas na região dos Cerrados têm provocado alterações dos atributos físicos e mecânicos dos solos. Com este entendimento, este estudo teve por objetivo avaliar a influência do rodado traseiro e da soleira de implementos agrícolas, usualmente utilizados na região dos Cerrados, sobre a compressibilidade de um Latossolo Vermelho distrófico típico. Os ensaios foram realizados em parcelas preparadas com arado de discos, arado de aivecas, grade aradora e semeadora/adubadora, que, desde novembro de 1994 até à data da amostragem, novembro de 1999, estiveram sob o sistema plantio direto. As alterações na compressibilidade foram avaliadas pela quantificação das pressões de preconsoidação, assim como por algumas propriedades físicas e hídricas (densidade do solo, porosidade e condutividade hidráulica do solo saturado) no momento do preparo e depois da colheita. No momento do preparo, logo depois da passada do rodado e antes que o implemento mobilizasse o solo, o solo foi avaliado em superfície (SP - 0,00 a 0,05 m) e na profundidade média de trabalho (PMT - 0,24 a 0,27 m). A influência da soleira dos implementos foi avaliada logo depois do corte, na profundidade de trabalho

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - DCS/UFLA. Projeto financiado pela CNPq. Recebido para publicação em junho de 2002 e aprovado em outubro de 2003.

⁽²⁾ Pós-Doutorado em Agronomia do Departamento de Engenharia Rural - FCA/UNESP. Faz. Experimental Lageado. Caixa Postal 237, CEP 18603-970 Botucatu (SP). E-mail: rbsilva@fca.unesp.br

⁽³⁾ Professor da Universidade Federal de Lavras - UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista do CNPq. E-mail: msouzadj@ufla.br

⁽⁴⁾ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura da FCA/Unesp/Botucatu. E-mail: alcivania@fca.unesp.br

⁽⁵⁾ Pesquisador da Embrapa Cerrados. Rod. Brasília-Fortaleza km 18, CEP 73301-970 Planaltina (DF). E-mail: franz@cpac.embrapa.br

abaixo da soleira de cada implemento (PT-SI). Depois da colheita, as amostragens foram repetidas, o que permitiu verificar a influência dos tráfegos subseqüentes. A intensidade de tráfego do rodado e a ação da soleira dos implementos alteraram a compressibilidade, a densidade do solo, a porosidade e condutividade hidráulica do solo saturado do Latossolo Vermelho distrófico nas profundidades: superfície (SP), profundidade média de trabalho (PMT) e profundidade de corte dos implementos (PT-SI). De maneira geral, a passada do rodado traseiro aumentou os valores de pressão de preconsolidação (σ_p) do solo na superfície (SP), enquanto o tráfego subseqüente, necessário ao cultivo, elevou esses valores em subsuperfície, tanto na PMP como em PT-SI. A passada do rodado elevou e reduziu a densidade do solo (Ds) e a macroporosidade, respectivamente, tendo sido o arado de aivecas o implemento que mais modificou essas propriedades. As soleiras dos órgãos ativos do arado de discos e da grade aradora foram as que mais elevaram a pressão de preconsolidação (σ_p), consolidando, portanto, a estrutura do solo na profundidade PT-SI. Com exceção da semeadora/adubadora, a soleira dos órgãos ativos dos demais implementos avaliados reduziram significativamente a condutividade hidráulica do solo saturado (Ks) na profundidade PT-SI, tendo o arado de aivecas se mostrado o implemento mais impactante, seguido da grade aradora e arado de discos.

Termos de indexação: compactação do solo, compressibilidade, sistema de manejo, trafegabilidade.

SUMMARY: *THE TRAFFIC OF THE TILLAGE TOOLS ON THE PHYSICAL, HYDRIC AND MECHANICAL PROPERTIES OF A LATOSOL OF THE CERRADOS*

The continuous and inadequate machine traffic and, or, the use of tillage tools on agricultural areas of the Cerrado region have been changing the soil physical and mechanical properties. The objectives of this study were to evaluate the influence of the rear wheel and the sill on the compressibility of a dystrophic Red Latosol, caused by agricultural tillage tools usually used in the Cerrado region. This study was carried out in plots tillage with disk plow, moldboard plow, heavy disk harrow and seeders, that since November of 1994 to the sampling date, November of 1999, they were under no-till system. The changes in the soil compressibility were assessed through the preconsolidation pressures, as well as, with some physical and hydric properties (Bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity), during tillage process and after harvest. During tillage operations, just after the rear wheel pass and before the implement mobilized the soil, the soil was evaluated in the surface (SP-0.00 to 0.05 m) and in the medium work depth (PMT - 0.24 to 0.27 m). The influence of the implements sill was evaluated just after the cut, in the work depth below the sill of each implement (PT-SI). After the harvest, the samplings were repeated, to verify the influence of the subsequent traffics. Traffic intensity and the implements sills altered the soil compressibility, the bulk density, the porosity and the saturated hydraulic conductivity of the dystrophic Red Latosol in the surface depths (SP), medium work depth (PMT) and cutting depth of the implements (PT-SI). In general, the rear wheel pass increased the preconsolidation pressure (σ_p) in the soil surface (SP), while the subsequent traffic, necessary to the cultivation, increase those values in subsurface, in PMT and in PT-SI depths. The wheels pass increase and reduced the bulk density (Ds) and the macro porosity, respectively, and the moldboard plow was the implement that caused more impact in those properties. The sills of the active organs of the disk plow and disk harrow were the ones that more increased the preconsolidation pressure (σ_p), compacting the soil at PT-SI depth. Except the seeders/fertilizer, the sill of the active organs of the other appraised implements reduced the saturated hydraulic conductivity (Ks) significantly in the PT-SI depth, and the moldboard plow was the implement that caused more soil impact, following by the disk harrow and the disk plow.

Index terms: soil compaction, compressibility, management system, trafegability.

INTRODUÇÃO

A aplicação de cargas dinâmicas por rodados e implementos agrícolas no solo produz tensões na interface solo/pneu e solo/implemento em superfície e profundidade, respectivamente. Essas tensões compactam as diferentes camadas do solo (Horn & Lebert, 1994) e, caso este carregamento dinâmico exceda a resistência interna do solo, mudanças nas propriedades físicas das camadas mais profundas ocorrerão (Horn, 1988). De acordo com Lowey & Schuler (1994), Alakukku & Elomen (1995) e Ball et al. (1997), a densidade do solo é significativamente elevada após o tráfego de máquinas agrícolas, com redução da macroporosidade e conseqüente diminuição da condutividade hidráulica. Way et al. (1995) verificaram aumento significativo da densidade do solo abaixo da linha de tráfego, sendo esse aumento tanto maior quanto maior o número de carregamentos. Wood et al. (1993) constataram que, antes do preparo, o tráfego de quatro passadas de uma carreta graneleira provocou decréscimos de até 50 % na porosidade e permeabilidade nas profundidades de 0,20 e 0,40 m, quando comparados com o efeito provocado por uma única passada. Constatações semelhantes foram feitas por Novak et al. (1992), Bailey et al. (1993), Horn (1994) e Way et al. (1995), segundo os quais repetidas passadas com rodados agrícolas aumentaram a degradação da estrutura do solo em profundidade. Todavia, Fenner (1999), fazendo um estudo de tráfego controlado em solos da Amazônia, verificou que as maiores deformações no solo ocorrem logo após a primeira passagem da máquina, sendo os efeitos das passagens subseqüentes mais reduzidos.

O aumento progressivo das cargas externas, combinadas com a insuflagem inadequada dos rodados, contribui para a degradação das camadas do solo em profundidade, em decorrência do deslizamento causado, geralmente, pelo aumento do cisalhamento na superfície, o que implica o rearranjo das partículas do solo, e, conseqüentemente, alterações da estrutura. A disponibilidade de água e nutrientes é comprometida pela alteração da estrutura do solo, tendo, como conseqüência, um declínio da produtividade (Wiermann et al., 1999; Wiermann et al., 2000).

No Brasil, são poucas as investigações (Jorge, 1986; Novak et al., 1992; Miranda, 2001; Castro Neto, 2001) que têm mostrado o efeito do tráfego contínuo e inadequado de máquinas e, ou, implementos sobre os atributos físicos e mecânicos dos solos agrícolas. Fazendo uma análise dos objetivos e da forma como são realizados trabalhos correlatos, percebe-se que a maioria deles é geralmente feita em uma condição estática e quase sempre voltada à obtenção de um resultado qualitativo e comparativo, cujas variáveis avaliadas são a densidade do solo e a porosidade. Neste caso, três ponderações podem ser feitas: a primeira é que

as operações agrícolas ocorrem de forma dinâmica, a segunda é que a densidade do solo e a porosidade são fortemente dependentes do manejo e a terceira é que quase sempre são desconsideradas informações, tais como o tipo de pneu, pressão de inflação, pressão de contato, umidade do solo, profundidade de trabalho e especificações técnicas dos implementos utilizados.

Todavia, diferentemente da pesquisa nacional, em outros países, os estudos que envolvem a influência do tráfego agrícola no comportamento da estrutura já estão bem avançados. Seus estudos vão desde a quantificação e distribuição da tensão aplicada no solo aos deslocamentos, vertical e horizontal, medidos *in situ* a partir de transdutores, como visto em Olson (1994); Horn (1994); Horn et al. (1998); Wiermann et al. (1999) e Wiermann et al. (2000). Esses estudos levam em consideração a relação tensão-deformação do solo, a qual se tem mostrado necessária para compreender o processo de compactação dos solos agrícolas (Koolen, 1994; Horn et al., 1998).

O presente trabalho teve por objetivos avaliar a influência da intensidade de tráfego do rodado de um trator agrícola e da soleira de quatro implementos sobre a compressibilidade e propriedades físicas e hídricas de um Latossolo Vermelho distrófico, na região dos Cerrados.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo esteve sob o sistema plantio direto por quatro anos e está sobre um Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 1999), localizada no Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados-Planaltina, DF, cuja localização geográfica é definida pelas coordenadas 15 ° 36 ' S e 47 ° 42 ' W. A área utilizada no experimento foi de aproximadamente um hectare, e as parcelas, com dimensões de 7 x 20 m, foram demarcadas em nível, com intervalos de 5,0 e 15,0 m para acesso e manobra do conjunto mecanizado.

Durante os ensaios de campo, para avaliar a influência do rodado e da soleira dos implementos, foram utilizados: (a) um trator 4 x 2 TODA, com potência do motor (na rotação nominal 2.200 rev/min) de 96 kW e massa total com lastro de 7.324 kg, pneu traseiro, com especificações técnicas 18.4-34R1, modelo TM 9, cuja pressão de inflação no momento dos ensaios foi de 137,90 kPa; (b) um arado de discos, modelo AR-328, com três discos de 28 " de diâmetro e massa total de 483 kg; (c) um arado de aivecas reversível, modelo AAR 3 x 14 ", número de aivecas três e massa total de 970 kg; (d) uma grade aradora, modelo GA12, com 12 discos de 24 " de diâmetro e massa total de 888 kg, e (e) uma semeadora/adubadora, modelo SHM13, com massa total de

2.444 kg. Para obter as curvas de compressão, monólitos de solo indeformado com dimensões de 0,0652 m de diâmetro por 0,0254 m de altura foram submetidos a ensaios uniaxiais em um consolidômetro.

Os dados de pressão de preconsolidação (σ_p), obtidos segundo método de Dias Junior (1994), assim como os dados de densidade do solo (D_s), macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), obtidos conforme método da EMBRAPA (1997), provieram de amostras coletadas em parcelas antes e depois da atuação do rodado traseiro e do corte dos implementos dos arados de aivecas e de discos, grade aradora e semeadora/adubadora.

A influência do rodado foi avaliada logo após a passagem do pneu traseiro em uma área referenciada, cuja amostragem foi feita no espaço entre o eixo e os órgãos ativos do implemento, evitando-se, com isto, a perturbação da amostra. Para avaliar a influência da soleira dos implementos, outras amostragens foram feitas logo abaixo da profundidade de corte, isto é, na soleira, o que permitiu analisar a influência dos órgãos ativos de cada implemento sobre as propriedades do solo, avaliadas neste estudo.

O delineamento experimental constou da combinação de quatro tipos de implementos: arado de aivecas (AA), arado de discos (AD), grade aradora (GA) e semeadora/adubadora (SA); três profundidades: superficial (SP-0,00 a 0,05 m), profundidade média de trabalho sob o rodado (PMT-0,24 a 0,27 m) e profundidade de trabalho sob a soleira do implemento (PT-SI); e três épocas de amostragens: antes do preparo (AP); no momento do preparo, imediatamente após a passada do rodado (DPR), porém, antes do corte do implemento; e depois da colheita (DC), no momento em que se considerou encerrado todo o tipo de tráfego necessário para o cultivo (preparo secundário, aplicação de herbicidas, trânsito de colhedoras, entre outros).

Para analisar o efeito da intensidade do tráfego, plotaram-se os valores médios das pressões de preconsolidação (σ_p) obtidos logo após a passada do rodado (DPR) e após a colheita (DC), nos modelos de compressibilidade ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$), obtidos na condição antes do preparo (AP). As pressões foram consideradas significativamente diferentes, quando as σ_p observadas ficaram fora do intervalo de confiança dos modelos de compressibilidade, que, neste caso, foi de 95 %. O mesmo procedimento já foi utilizado por Dias Junior et al. (1999).

Avaliaram-se também as σ_p medidas depois da passada do rodado (DPR) e logo depois da colheita (DC), em superfície (SP-0,00 a 0,05 m) e na profundidade média de trabalho (PMT-0,24 a 0,27 m), nos quatro tipos de preparos, o que permitiu verificar a interação entre estes fatores. Dessa combinação resultaram 16 tratamentos, que foram dispostos em um esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. Quanto à influência da soleira

do implemento, avaliaram-se as σ_p da profundidade PT-SI após o corte do implemento (DCI) e após a colheita (DC). Dessa combinação resultaram oito tratamentos, que foram dispostos também em um delineamento de parcelas subdivididas, com três repetições.

A análise de variância dos valores de σ_p , assim como das propriedades densidade do solo, volume total de poros e condutividade hidráulica do solo saturado, foi feita, utilizando-se o software Saneste (Zonta et al., 1984) e, constatada a significância ($F_c > F_t$ com $\alpha < 0,05$), aplicou-se o teste de médias (Scott & Knott, 1974).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificaram-se aumentos significativos da pressão de preconsolidação, quando comparados com os das pressões de preconsolidação, na profundidade SP, tanto depois da passada do rodado (DPR) como depois da colheita (DC), estimadas pelos modelos $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$, isto é, as pressões de preconsolidação obtidas antes da intervenção do rodado e dos implementos (Figura 1). Esses resultados são indicadores da degradação da estrutura do solo e estão de acordo com os resultados encontrados por Horn & Lebert (1994) e Wiermann et al. (1999).

Percebe-se, entretanto, uma redução da σ_p , quando se comparam as pressões de preconsolidação obtidas logo depois da passada do rodado (DPR) com as pressões obtidas depois da colheita (DC), muito embora essa redução tenha sido significativa apenas nas parcelas que foram preparadas com o arado de aivecas (Quadro 1). Esse comportamento se deve ao fato de que, se, por um lado, a passada do rodado causa recalque, por outro, os órgãos ativos dos implementos por meio da mobilização aliviam a consolidação da estrutura, principalmente nas camadas superficiais. Por esse motivo, alguns autores (Soane & van Ouwerkerk, 1994; Horn et al., 1995) acreditam que o maior enfoque nos estudos de distribuição de tensão e de compactação deva ser dado às camadas subsuperficiais, pois, segundo eles, elas são certamente as mais ameaçadas pelo modelo atual de agricultura.

Ainda analisando a influência da passada do rodado (DPR) e de todo tráfego utilizado até a colheita (DC) sobre a σ_p observada, em relação a σ_p estimada pelos modelos de compressibilidade da condição do solo antes da aplicação dos tratamentos da profundidade SP, percebe-se uma tendência de os maiores valores de pressão de preconsolidação ocorrerem logo depois da passada do rodado (DPR). Isto fica mais evidente na figura 2, na qual está apresentada o gradiente da pressão de preconsolidação (acréscimos e decréscimos) das parcelas, na condição antes do preparo (AP), depois da passada do rodado (DPR) e depois da colheita (DC).

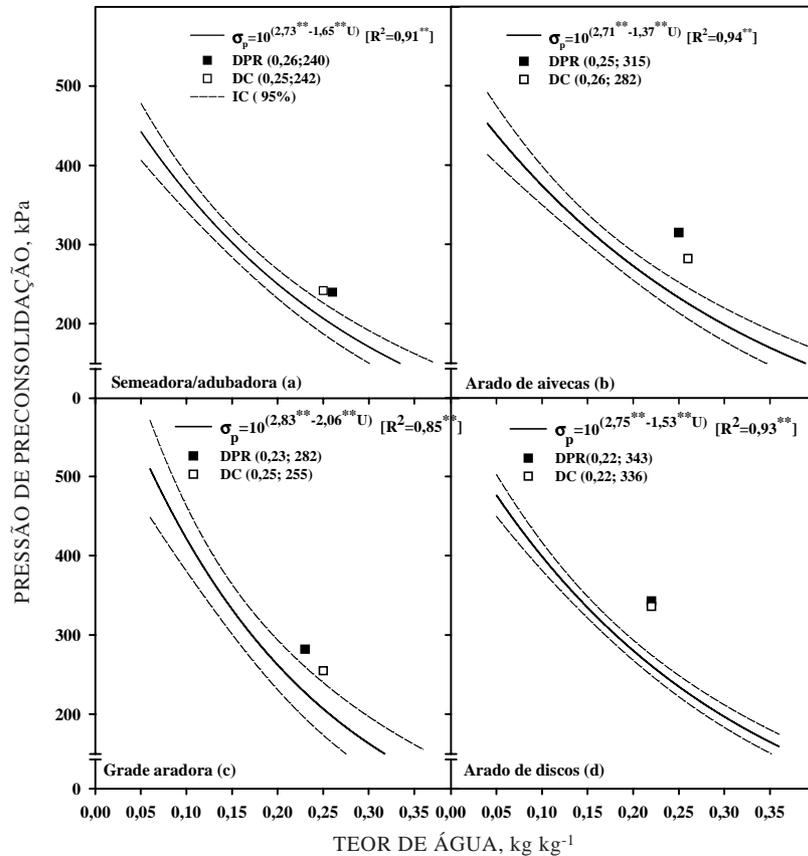


Figura 1. Pressões de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e observadas (■ □) da profundidade superficial (SP), avaliadas antes do preparo, depois da passada do rodado (DPR) e depois da colheita (DC) nas parcelas mobilizadas com a semeadora/adubadora, arado de aivecas, grade aradora e arado de discos.

Quadro 1. Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p) das profundidades superficial (SP) e profundidade média do trabalho (PMT), observados após passada do rodado (DPR) e após colheita (DC)

Implemento	Profundidade			
	SP		PMT	
	DPR	DC	DPR	DC
	Macroporos, m ³ m ⁻³			
Arado de aivecas	315,00 a	282,40 b	222,70 b	277,59 a
Arado de discos	343,06 a	335,90 a	246,86 b	372,00 a
Grade aradora	281,79 a	254,60 a	250,19 b	317,50 a
Semeadora/adubadora	240,90 a	242,09 a	211,66 b	298,49 a

Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente, pelo teste de Scott & Knott, a 5%. Letras minúsculas comparam intensidade de tráfego (colunas) para cada profundidade.

Observa-se, na profundidade SP, que as maiores deformações ocorreram logo depois da passada do rodado traseiro. O arado de aivecas provocou um incremento de 26 %, seguido do arado de discos, com 25 %; da grade aradora, com 20 % e, por último, da semeadora/adubadora, com 17 %. Detecta-se, ainda, uma redução da pressão de

preconsolidação nas amostras avaliadas logo depois da colheita. Verifica-se que, enquanto a atuação da semeadora/adubadora aumentou a σ_p em 0,8, o arado de aivecas reduziu-a em 11 %; a grade aradora, em 10 %, e o arado de discos, em 2 %, o que se deve à forma como cada implemento mobiliza o solo.

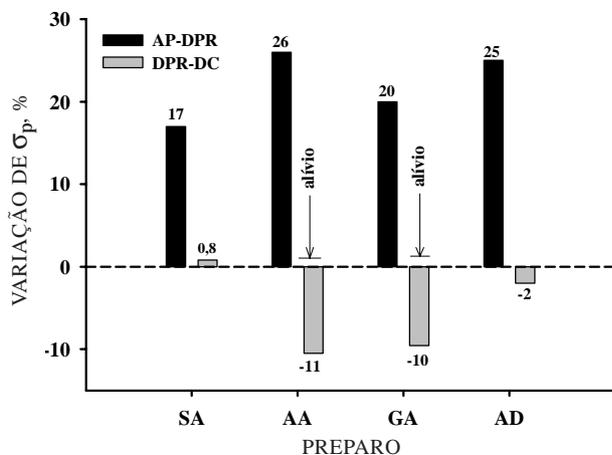


Figura 2. Variação relativa da pressão de preconsolidação (σ_p) e da profundidade superficial (SP), entre as épocas de amostragens antes do preparo (AP), depois da passada do rodado traseiro (DPR) e depois da colheita (DC). SA: semeadora/adubadora, AA: arado de aivecas, GA: grade aradora, AD: arado de discos.

Esses resultados concordam com os de Fenner (1999) que, fazendo um estudo de tráfego controlado em solos da Amazônia, verificou que as maiores deformações ocorrem logo após a primeira passada da máquina. Wiermann et al. (1999) chegaram a conclusões parecidas, quando testaram a influência de rodados sob diferentes pressões de insuflagem, cargas dinâmicas e passada do rodado em caixas de solo, utilizando transdutores para medir o deslocamento horizontal e vertical do solo. De acordo com esses autores, os valores de tensão no solo e o deslocamento vertical medidos para a primeira passada foram significativamente afetados pelo aumento das cargas dinâmicas e pressão de inflação dos rodados, que causou cerca de 25 % de deformação vertical, independentemente da carga aplicada. A intensidade da ação do rodado sobre esta profundidade certamente dependeu da pressão de contato aplicada na interface pneu/solo que, dentre outros fatores, está diretamente relacionada com o peso do implemento, força exigida na barra de tração, tipo de engate (se nos três pontos ou na barra de tração) e, por conseguinte, com a transferência de peso para o eixo traseiro.

Na figura 3, as informações são referentes à profundidade PMT (0,24 a 0,27 m). Nas parcelas em que atuaram semeadora/adubadora e arado de aivecas (Figura 3a,b, respectivamente), não foi verificada influência significativa na pressão de preconsolidação logo depois da passada do rodado (DPR).

A maior influência do rodado sobre a pressão de preconsolidação ocorreu nas áreas em que atuou a grade aradora (Figura 3c) e, principalmente, o arado de discos (Figura 3d). O maior efeito do arado de discos é associado à transferência de peso, já que

este implemento trabalha acoplado ao engate de três pontos, solicitando maior força de tração e, por conseguinte, maior transferência de peso para o eixo traseiro.

O maior efeito da ação do rodado sobre a estrutura do solo na profundidade PMT foi observado depois da colheita (Figura 3). Nesta etapa, todo o tráfego necessário ao cultivo já havia ocorrido, o que configurou maior número de eventos de carregamentos dinâmicos e, conseqüentemente, maior consolidação da estrutura de solo nessa profundidade. Respostas semelhantes foram encontradas por Novak et al. (1992); Wood et al. (1993); Horn (1994) e Way et al. (1995). Segundo esses autores, repetidos eventos com rodados agrícolas aumentam a degradação da estrutura do solo em profundidade. Essa constatação pode ainda ser respaldada quando se compara a média de pressão de preconsolidação observada logo depois da passada do rodado com as médias obtidas logo depois da colheita, como evidência o teste de Scott & Knott (1974), a 5 % (Quadro 1).

A influência do rodado sobre a pressão de preconsolidação pode ainda ser vista na figura 4, como mostram os acréscimos e decréscimos relativos da pressão de preconsolidação entre os momentos antes do preparo (AP), depois da passada do rodado (DPR) e depois da colheita (DC).

Nota-se que a maior influência do rodado na profundidade PMT foi observada depois da colheita, e não após a passada do rodado (Figura 4). Os maiores incrementos foram observados na área preparada com o arado de discos (34 %), seguido da semeadora/adubadora (29 %), grade aradora (21 %) e arado de aivecas (20 %). Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Wood et al. (1993), que verificaram uma redução na porosidade e na permeabilidade em até 50 %, na profundidade de 0,20 a 0,40 m, após quatro passadas de uma carreta graneleira de um eixo, com 15,2 t de peso total. O alívio na pressão de preconsolidação, observado logo depois da passada do rodado, quando comparado ao da pressão obtida antes do preparo na profundidade PMT, na parcela em que atuou o arado de aivecas (Figura 4), foi atribuído a uma heterogeneidade pontual do material de solo coletado naquela parcela. De maneira geral, segundo os resultados encontrados, os primeiros tráfegos influenciam inicialmente o comportamento da estrutura da camada superficial, enquanto os subseqüentes contribuem para uma perturbação das camadas mais profundas.

Verificou-se que a σ_p variou entre profundidades e tipos de preparo, para cada época de amostragem. Depois da passada do rodado traseiro, foram detectados maiores valores de σ_p na profundidade SP (Quadro 2); todavia, só foi verificada influência significativa nas parcelas em que atuaram os arados de aivecas e de discos. Quando se comparam os tipos de preparos, verifica-se também que foram esses dois

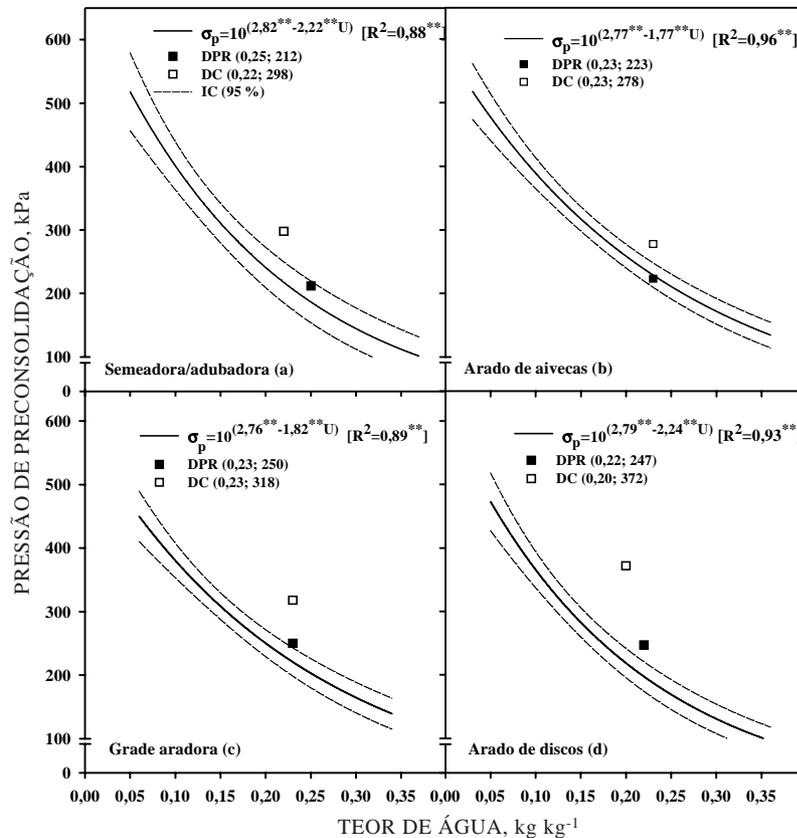


Figura 3. Pressões de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e observadas (■ □) da profundidade média de trabalho (PMT), avaliadas antes do preparo, depois da passada do rodado (DPR) e depois da colheita (DC) nas parcelas mobilizadas com a semeadora/adubadora, arado de aivecas, grade aradora e arado de discos.

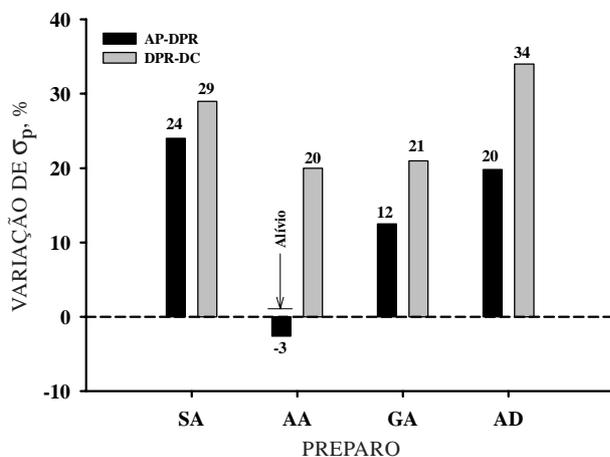


Figura 4. Variação relativa de preconsolidação (σ_p) e da profundidade média de trabalho (PMT), entre as épocas de amostragens antes do preparo (AP), depois da passada do rodado traseiro (DPR) e depois da colheita (DC). SA: semeadora/adubadora, AA: arado de aivecas, GA: grade aradora, AD: arado de discos.

os implementos que mais contribuíram para o aumento da σ_p , principalmente na profundidade SP,

visto que, na profundidade PMT, não foi observada diferença significativa entre os preparos.

Notou-se que, depois da colheita, quando se compararam as profundidades, percebe-se que a grade aradora e a semeadora/adubadora propiciaram maiores valores de pressões de preconsolidação (σ_p) na PMT, diferindo significativamente dos valores de σ_p encontrados na profundidade SP (Quadro 2). Estes resultados podem ser atribuídos à consolidação da estrutura, também conhecido como “pé de grade” do primeiro implemento, à não-mobilização do solo pela semeadora/adubadora, uma vez que os órgãos ativos desta, durante a adubação e semeadura, não ultrapassam os 0,07 m de profundidade.

Comparando a influência de cada implemento, depois da colheita (DC), verifica-se que as pressões de preconsolidação observadas nas parcelas preparadas com o arado de discos, em ambas as profundidades, superaram estatisticamente os demais preparos. Isto pode estar associado à forma e geometria dos órgãos ativos desse implemento, os quais, além de propiciar uma menor mobilização do solo, concomitantemente podem ter ocasionado espelhamento e, por conseguinte, ter favorecido a consolidação da estrutura do solo.

A densidade do solo (Ds) e o volume de macroporos, propriedades físicas do solo relacionadas com o comportamento compressivo, foram também influenciados logo após a passada do rodado (Quadro 3). A Ds foi aumentada significativamente na profundidade SP. Após a passada do rodado, os valores de Ds foram aumentados, tendo os valores decorrentes do preparo com arado de aivecas superado os valores de Ds dos demais preparos, diferindo estatisticamente.

Na profundidade PMT, os valores de Ds encontrados depois da passada do rodado traseiro também foram influenciados significativamente; entretanto, nas parcelas em que a semeadora/adubadora atuou, não foi verificada diferença estatística significativa. Comparando os preparos, verifica-se que, após a passada do rodado traseiro, o arado de aivecas foi o preparo que mais elevou a densidade do solo, superando estatisticamente os demais preparos. Na seqüência, estão a grade aradora e o arado de discos, que, embora não difiram significativamente, superaram significativamente os

valores de Ds causados pela mobilização do solo da semeadora/adubadora.

A macroporosidade do solo das duas profundidades foi significativamente alterada depois da passada do rodado traseiro (Quadro 4). Na profundidade SP, em todos os preparos, a passada do rodado reduziu significativamente o volume de macroporos. Antes da intervenção do rodado (AP), os preparos não diferiram estatisticamente; contudo, o mesmo não ocorreu depois da passada. Nas parcelas preparadas com o arado de aivecas, ocorreu uma maior redução da quantidade de macroporos, seguido do arado de discos, grade aradora e semeadora/adubadora. O volume de macroporos da profundidade PMT apresentou o mesmo comportamento da profundidade SP.

Alterações semelhantes dessas duas propriedades foram encontradas por Ball et al (1997), que verificaram um aumento significativo na densidade do solo após o tráfego de máquinas agrícolas, com conseqüente redução da macroporosidade. Resultados parecidos foram também obtidos por Way

Quadro 2. Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p) das profundidades superficial (SP) e média de trabalho (PMT), observados depois da passada do rodado e da colheita

Implemento	Época de amostragem			
	Após passada do rodado		Após colheita	
	SP	PMT	SP	PMT
	σ_p , kPa			
Arado de aivecas	315,00 Aa	222,70 Ba	282,40 Ab	277,59 Ab
Arado de discos	343,06 Aa	246,86 Ba	335,90 Aa	372,00 Aa
Grade aradora	281,79 Ab	250,19 Aa	254,60 Bb	317,50 Ab
Semeadora/adubadora	240,90 Ab	211,66 Aa	242,09 Bb	298,49 Ab

Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente, pelo teste de Scott & Knott, a 5 %. Letras maiúsculas comparam profundidades dentro de intensidade de tráfego (coluna) e letras minúsculas comparam preparos dentro de profundidades (linhas), para cada época de amostragem.

Quadro 3. Valores médios de densidade do solo das profundidades superficial (SP) e média de trabalho (PMT), observados antes (AP) e depois da passada do rodado (DPR) em parcelas mobilizadas pelos implementos avaliados

Implemento	Profundidade			
	SP		PMT	
	AP	DPR	AP	DPR
	D_s , Mg m ⁻³			
Arado de aivecas	1,17 Ba	1,33 Aa	1,12 Ba	1,25 Aa
Arado de discos	1,19 Ba	1,21 Ab	1,14 Ba	1,17 Ab
Grade aradora	1,19 Ba	1,27 Ab	1,13 Ba	1,20 Ab
Semeadora/adubadora	1,12 Bb	1,24 Ab	1,04 Ab	1,08 Ac

Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente, pelo teste de Scott & Knott, a 5 %. Letras maiúsculas comparam época de amostragem (colunas) e letras minúsculas comparam preparos (linhas).

Quadro 4. Valores médios do volume de macroporos das profundidades superficial (SP) e média de trabalho (PMT), observados antes (AP) e depois da passada do rodado (DPR) em parcelas mobilizadas pelos implementos avaliados

Implemento	Profundidade			
	SP		PMT	
	AP	DPR	AP	DPR
Macroporos, m ³ m ⁻³				
Arado de aivecas	0,26 Aa	0,16 Bb	0,25 Aa	0,17 Bb
Arado de discos	0,24 Aa	0,19 Ba	0,24 Aa	0,18 Bb
Grade aradora	0,25 Aa	0,19 Ba	0,24 Aa	0,17 Bb
Semeadora/adubadora	0,26 Aa	0,20 Ba	0,25 Aa	0,20 Ba

et al. (1995), que verificaram aumento significativo da densidade do solo abaixo da linha de tráfego, que se intensificava com o aumento do número de passadas.

Logo depois que o implemento cortou o solo, amostras indeformadas foram coletadas na profundidade de trabalho sob a soleira do implemento (PT-SI), para que se determinasse a pressão de preconsolidação. Terminado o ciclo da cultura e, portanto, todo o tráfego necessário ao cultivo da área, logo depois da colheita, novas amostragens e avaliações da pressão de preconsolidação foram feitas. Assim, pôde-se comparar o efeito imediato da soleira de cada implemento com os efeitos dos tráfegos subseqüentes sobre a pressão de preconsolidação na profundidade de trabalho de cada implemento (Quadro 5).

Com exceção da semeadora/adubadora, os demais implementos provocaram alterações significativas na pressão de preconsolidação (σ_p) das amostras observadas na época DC em relação à época de amostragem DCI. Isso mostra que tão importante quanto impacto sobre a pressão de preconsolidação causado no momento do preparo por parte dos órgãos ativos dos implementos é a influência dos tráfegos subseqüentes, que elevaram, de forma significativa, a pressão de preconsolidação, comprometendo, ainda mais, a estrutura do solo.

Notou-se que, nas duas épocas avaliadas (DCI e DC), os implementos que contribuíram para maiores alterações da pressão de preconsolidação foram a grade aradora e o arado de discos (Quadro 5). Embora os efeitos desses implementos sobre a σ_p não tenham diferido estatisticamente, ambos implicaram maior consolidação do solo do que arado de aivecas e semeadora/adubadora, os quais só diferiram na época depois do cultivo (DC). As respostas diferenciadas de σ_p às intensidades de tráfego (DCI e DC), assim como da ação dos implementos sobre a pressão de preconsolidação, evidenciam a importância da escolha do implemento para a operação agrícola, visto que a arquitetura e a

Quadro 5. Valores médios de pressão de consolidação (σ_p) de amostras indeformadas coletadas na soleira do implemento (PT-SI) depois do corte do implemento e depois da colheita (DC)

Implemento	Época de amostragem	
	Após corte do implemento	Após colheita
———— σ_p , kPa ————		
Arado de aivecas	251 Bb	334 Ab
Arado de discos	304 Ba	409 Aa
Grade aradora	303 Ba	442 Aa
Semeadora/adubadora	228 Ab	251 Ac

Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente, pelo teste de Scott & Knott, a 5 %. Letras maiúsculas comparam época de amostragem (coluna) e letras minúsculas comparam preparos (linhas), para cada época de amostragem.

forma como os seus órgãos ativos atuam no solo são determinantes na manutenção e sustentabilidade da estrutura do solo durante e após as operações agrícolas.

O efeito da soleira de cada implemento sobre o comportamento da estrutura do solo pode também ser evidenciado nos valores da condutividade hidráulica do solo saturado (Ks) (Quadro 6). Com exceção das parcelas em que atuou a semeadora/adubadora, foi verificada redução significativa de Ks nas amostras coletadas na soleira dos implementos (Quadro 6). Isto mostra, mais uma vez, a influência diferenciada sobre a estrutura do solo que cada implemento pode causar e a intensidade dessa influência mostra-se dependente das características técnicas e forma de ação do implemento no solo. Antes da atuação do implemento, naturalmente não havia diferenças entre condutividade hidráulica das parcelas, e, logo em seguida, esse quadro foi significativamente alterado, confirmando, portanto, o efeito degradante do arado de discos, seguido da

Quadro 6. Valores médios de condutividade hidráulica do solo saturado (Ks) de amostras indeformadas coletadas na soleira do implemento (PT-SI), antes do corte (ACI) e depois do corte (DCI)

Implemento	Época de amostragem	
	Antes corte do implemento	Após corte do implemento
	———— Ks, cm h ⁻¹ ————	
Arado de aivecas	53 Aa	18 Bc
Arado de discos	56 Aa	29 Bb
Grade aradora	58 Aa	27 Bb
Semeadora/adubadora	52 Aa	47 Aa

Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente, pelo teste de Scott & Knott, a 5 %. Letras maiúsculas compararam profundidades época de amostragem (coluna) e letras minúsculas comparam preparos (linhas), para cada época de amostragem.

grade aradora e do arado de aivecas, sobre a estrutura do solo, com conseqüente redução dos valores de Ks, logo abaixo da soleira destes implementos (Quadro 6).

CONCLUSÕES

1. A intensidade de tráfego do rodado e a ação da soleira dos implementos alteraram a compressibilidade, a densidade do solo, a porosidade e a condutividade hidráulica do solo saturado nas profundidades: superficial (SP), profundidade média de trabalho (PMT) e profundidade de corte dos implementos (PT-SI).

2. De maneira geral, a passada do rodado traseiro aumentou os valores de pressão de preconsolidação (σ_p) do solo na superfície (SP), enquanto o tráfego subsequente, necessário ao cultivo, elevou esses valores em subsuperfície, tanto na PMT como em PT-SI.

3. A passada do rodado elevou a densidade do solo (Ds) e reduziu a macroporosidade, mostrando ser o arado de aivecas o implemento que mais modificou essas propriedades.

4. As soleiras dos órgãos ativos do arado de discos e da grade aradora foram as que mais elevaram a σ_p , consolidando, portanto, a estrutura do solo na profundidade PT-SI.

5. Com exceção da semeadora/adubadora, as soleiras dos órgãos ativos dos demais implementos avaliados reduziram significativamente a condutividade hidráulica do solo saturado na profundidade PT-SI, tendo o arado de aivecas se mostrado o implemento mais impactante, seguido da grade aradora e arado de discos.

LITERATURA CITADA

- ALAKUKKU, L. & ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. *Soil Till. Res.*, 36:141-152, 1995.
- BAILEY, A.C.; RAPER, R.L.; JOHNSON, C.E. & BURT, E.C. An integrated approach to soil compaction prediction. *J. Agric. Eng. Res.*, 61:73-80, 1993.
- BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J.; DOUGLAS, J.T.; HENSHALL, J.K. & O'SULLIVAN, M.F. Soil structural quality, compaction and land management. *Europ. Soil Sci.*, 48:593-601, 1997.
- CASTRO NETO, P. Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas. Botucatu, Universidade Estadual de São Paulo, 2001. 155p. (Tese de Doutorado)
- DIAS JUNIOR, M.S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114p. (Tese de Doutorado)
- DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M.; FONSECA, S.; SILVA, A.R. & FERREIRA, D.F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. *R. Árvore*, 23:371-378, 1999.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solo. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.
- FENNER, P.T. Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita da madeira. Botucatu, Universidade Estadual de São Paulo, 1999. 135p. (Tese de Livre Docência)
- HORN, R. Compressibility of arable land. *Catena*, 11:53-71, 1988.
- HORN, R. Stress transmission and recompaction in tilled and segmently disturbed subsoils under trafficking. In: JAYAWARDANE, N. & STEWART, B.A., eds. *Subsoiling management techniques*. *Adv. Soil Sci.*, p.187-210, 1994.
- HORN, R. The effect of static and dynamic loading on stress distribution, soil deformation and its consequences for soil erosion. In: BLUME, H.P.; FLEISCHHAUER, M. & HEBEL, T., eds. *Sustainability, environmental protection*. *Catena, Publ. Cremlingen In Press*, 1998. p.23.
- HORN, R.; BAUMGARTL, T.; KAYSER, R. & BAASCH, S. Effect of aggregate strength on changes in strength and stress distribution in structured bulk soils. In: HARTGE, K.H. & STEWART, R., eds. *Soil structure - its development and function*, 1995. p.31-52.
- HORN, R. & LEBERT, M. Soil compactibility and compressibility. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69. (Developments in Agricultural Engineering, 11)

- HORN, R.; RICHARDS, B.G.; GRASLE, W.; BAUMGARTL, T. & WIERMANN, C. Theoretical principles for modelling soil strength and wheeling effects - a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 161:333-346, 1998.
- JORGE, J.A. Compactação do solo: causa, conseqüências e maneiras de evitar a sua ocorrência. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 22p. (Circular Técnica)
- KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69. (Developments in Agricultural Engineering, 11)
- LOWERY, B. & SCHULER, T.T. Duration and effects of compaction on soil and plant growth in Wisconsin. *Soil Till. Res.*, 29:205-210, 1994.
- MIRANDA, E.E.V. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um Latossolo sob cultivo de cafeeiro na região do cerrado. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2001. 57p. (Tese de Mestrado)
- NOVAK, L.R.; MONTOVANI, E.C.; MARTYN, P.J. & FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro Álico, em dois níveis de umidade. *Pesq. Agropec. Bras.*, 27:1587-1595, 1992.
- OLSON, H.J. Calculation of subsoil compaction. *Soil Till. Res.*, 29:105-111, 1994.
- SCOTT, A.J. & KNOTT, M. Accounter analysis methods for grouping means in the analysis of variants. *Biometrics*, 30:507-512, 1974.
- SOANE, B.D. & van OUWERKERK C. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier, 1994. (Development in Agricultural Engineering, 11)
- WAY, T.R.; BAILEY, A.C.; RAPER, R.L. & BURT, E.C. Tire lug height effect on soil stresses and bulk density. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 38:669-674, 1995.
- WIERMANN, C.; WAY, T.R.; HORN, R.; BAILEY, A.C. & BURT, E.C. Effect of various dynamic loads on stress and strain behaviour of a Norfolk sandy loam. *Soil Till. Res.*, 50:127-135, 1999.
- WIERMANN, C.; WERNER, D.; HORN, R.; ROSTEK, J. & WENER, B. Stress/strain processes in a structured silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. *Soil Till. Res.*, 53:117-128, 2000.
- WOOD, R.K.; REEDER, R.C.; MORGAN, M.T. & HOLMES, R.G. Soil physical properties as affected grain cart traffic. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 36:11-14, 1993.
- ZONTA, E.P.; MACHADO, A.A. & SILVEIRA JÚNIOR, P. Sistemas de análise para microcomputadores (SANEST). Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 1984. 151p.

