

# SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

## INFLUÊNCIA DA CARGA MECÂNICA DE MÁQUINA SOBRE PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO<sup>(1)</sup>

Karina Maria Vieira Cavaliere<sup>(2)</sup>, Álvaro Pires da Silva<sup>(3)</sup>, Johan Arvidsson<sup>(4)</sup> & Cássio Antonio Tormena<sup>(5)</sup>

### RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de diferentes cargas mecânicas de máquinas sobre as propriedades físicas de um Cambissolo Háplico classe textural franco-arenoso/franco-argilo-arenoso. A distribuição das pressões (kPa) no solo foi detectada por sensores localizados em diferentes camadas no solo. As propriedades físicas avaliadas foram a densidade do solo (Ds) e a resistência à penetração (RP) na linha e na entrelinha da cultura da beterraba-açucareira (*Beta vulgaris* L.), até a profundidade de 0,30 m. Os tratamentos foram: sem pressão extra exercida pela semeadora, denominado sem compactação (SC); pressão exercida pela semeadora considerada de baixa carga (BC); pressão exercida pela semeadora considerada de alta carga (AC); e pressão exercida pelas rodas do trator usado no preparo do solo ou carga do trator (CT). Em relação à distribuição das cargas no solo, na camada de 0-0,10 m foram detectados valores de pressão no solo acima de 120 kPa, considerados muito altos. O incremento de pressão do tratamento SC para AC resultou em maiores pressões na camada de 0-0,10 m comparada à de 0,10-0,20 m, enquanto o tratamento CT resultou em maiores pressões no solo na camada de 0,10-0,20 m, em relação aos outros tratamentos. Em decorrência das cargas mecânicas aplicadas, verificou-se aumento da Ds em superfície, na sequência SC < BC < AC < CT. A RP foi maior que 2,0 MPa na camada de 0,10-0,15 m sob preparo convencional no tratamento CT. Sob preparo reduzido, a RP

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao curso de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP. Apoio financeiro CAPES. Recebido para publicação em junho de 2007 e aprovado em fevereiro de 2009.

<sup>(2)</sup> Coordenadora Bolsista de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Regional – CNPq, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMT. R. Ranulfo Saldivar 822, CEP 79823-420 Dourados (MS). E-mail: karina\_cavaliere@yahoo.com.br.

<sup>(3)</sup> Professor Titular do Departamento de Ciência do Solo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP. Caixa Postal 9, Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: apisilva@esalq.usp.br

<sup>(4)</sup> Professor da Division of Soil Management Dep. of Soil Sciences, Swedish Agricultural Science University – SLU. Caixa Postal 7014, Uppsala, P.O Box 750 07, Uppsala - Suécia. E-mail: johan.arvidsson@mv.slu.se

<sup>(5)</sup> Professor Associado do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). Bolsista do CNPq. E-mail: catormena@uem.br.

mostrou valores acima de 1,5 MPa em todos os tratamentos, sendo maior que 2,5 MPa abaixo da camada de 0,25 m. Os tratamentos SC, BC e AC apresentaram diferenças de RP na linha e entrelinha na camada de 0,10–0,25 m, com os maiores valores na linha de plantio. Em geral, no tratamento CT o solo apresentou maiores valores de Ds e RP, em razão das maiores pressões nele aplicadas.

**Termos de indexação:** compactação, densidade do solo, resistência à penetração, semeadura.

#### **SUMMARY: INFLUENCE OF MECHANICAL LOAD LEVELS ON PHYSICAL PROPERTIES OF A EUTRIC CAMBISOL**

*The objective of this study was to evaluate the effects of different mechanical loads on soil physical properties of a Eutric Cambisol with loam sandy texture. The soil load distribution (kPa) was measured in situ by sensors placed in different soil layers. The soil physical properties evaluated were the bulk density (Ds) and the soil penetration resistance (RP) on sugarbeet (*Beta vulgaris* L.) row and interrow down to 0.30 m depth. The treatments were: without extra pressure exerted by the sowing machine, or no-compaction (SC); low pressure exerted by the sowing machine, named low load (BC); high pressure exerted by the sowing machine, named high load (AC) and load pressure exerted by the tractor wheels used in the seedbed preparation, or tractor load (CT). The soil load distribution data indicated that the 0–0.10 m layer had soil stresses values higher than 120 kPa, which are considered very high. The increase on soil stresses from treatments SC to AC caused higher stress on topsoil than in the 0.10–0.20 m depth, while that under CT treatment showed higher stress at the 0.10–0.20 m layer. As a consequence of the soil stress load it was verified an increase on Ds in the more superficial soil layer (0–10 cm), and it followed the sequence: SC<BC<AC<CT. The RP was higher than 2.0 MPa at the 0.10–0.15 m layer under conventional tillage for the CT treatment. Under minimum tillage the RP reached values above of 1.5 MPa in all treatments, and values higher than 2.5 MPa were observed below the 0.25 m soil layer. The soil under treatments SC, BC and AC presented significant differences in RP between row and interrow positions at the 0.10–0.15 m layer; higher RP values were found for the row position. In general, the CT treatment showed higher Ds and RP values due to the greater stress applied on the soil.*

*Index terms:* soil compaction, bulk density, resistance to penetration, seedbed.

## **INTRODUÇÃO**

A mecanização das operações agrícolas tem-se intensificado, resultando em incremento das cargas mecânicas aplicadas ao solo, aumentando a sua degradação física tanto em superfície como em subsuperfície (Horn et al., 2000). As alterações físicas do solo devido ao tráfego de máquinas e implementos têm sido amplamente estudadas (Horn et al., 2003; Schäfer-Landefeld et al., 2004; Yavuscan et al., 2005; Chan et al., 2006; Schäffer et al., 2007), com destaque para os efeitos da compactação do solo sobre a produtividade das culturas.

A degradação da estrutura do solo devido ao processo de compactação depende de vários fatores, destacando-se a composição granulométrica do solo (Larson et al., 1980; Imhoff et al., 2004), o C orgânico do solo (Stone & Ekwue, 1995), o teor de água do solo durante o tráfego das máquinas (Horn et al., 1995) e a frequência e intensidade com que a carga é aplicada no solo pelas máquinas e implementos (Horn et al., 1995; Chamen et al., 2003). Por outro lado, verifica-

se aumento na área de contato dos pneus em função da massa dos veículos agrícolas, o que poderia atenuar a compactação superficial do solo (Alakukku et al., 2003). Além disso, a pressão de inflação, o tamanho e as características da carcaça do pneu controlam a distribuição das pressões no solo (Soane et al., 1986). A pressão aplicada ao solo que é transmitida às camadas mais profundas depende da massa por eixo e pode alterar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo se a pressão aplicada exceder a resistência mecânica interna deste (Horn & Rostek, 2000).

As distribuições das pressões decorrentes da carga mecânica aplicada ao solo e a compressibilidade dele (ou a capacidade de o solo ser deformado ou rearranjar suas partículas quando uma carga é aplicada) determinam o tipo e a intensidade da deformação do solo (Soane et al., 1981; Horn et al., 1995). Esses fatores são os responsáveis pelos diferentes níveis de compactação encontrados nos solos agrícolas; a influência deles é de importância fundamental para o desenvolvimento de estratégias para o manejo, bem como para a atenuação da compactação do solo em

profundidade. A distribuição espacial e em profundidade das cargas mecânicas exercidas pelas máquinas é complexa (Alakukku et al., 2003). Entretanto, é importante avaliar se essas pressões podem resultar na degradação da estrutura do solo, sobretudo na zona radicular. Segundo Keller et al. (2002), os efeitos detrimenais da compactação na camada superficial do solo podem ser considerados de menor importância, uma vez que essa compactação pode ser controlada por ocasião do preparo do solo. A maior preocupação deve estar focada na compactação do subsolo, visto que a redução ou eliminação da compactação no subsolo demanda altos custos, bem como implica reduções na produtividade das culturas (Alakukku et al., 2003; Chamen et al., 2003).

As diferentes cargas mecânicas aplicadas ao solo pelas máquinas agrícolas alteram o arranjo estrutural do solo, modificando a densidade e a distribuição dos poros, notadamente a distribuição dos poros de maior tamanho. Essas mudanças alteram propriedades físicas do solo que governam a disponibilidade de água, a aeração do solo e a resistência que a sua matriz oferece ao crescimento das raízes (Eavis, 1972; Letey, 1985; Hamblin, 1985). Arvidsson & Hakansson (1996), por exemplo, encontraram correlação linear negativa entre a produtividade e a intensidade de tráfego de até 300–400 Mg km ha<sup>-1</sup>. Esses autores reportam que, em geral, foi difícil explicar detalhada e consistentemente a resposta das culturas em função do tráfego, mas salientam que os efeitos sobre a produtividade foram decorrentes das alterações nas propriedades físicas do solo. Por outro lado, em função das condições climáticas que controlam a disponibilidade espacial e temporal de água no solo, nem sempre se verificam efeitos detrimenais da compactação na produtividade das culturas.

As modificações na estrutura do solo decorrentes da compactação podem ser monitoradas por propriedades físicas do solo que traduzem as alterações na distribuição do tamanho de poros ocasionadas pelo rearranjo das partículas e, ou, agregados (Soane et al., 1981). As propriedades físicas do solo mais frequentemente utilizadas nesses estudos são a densidade, a porosidade e resistência do solo à penetração de raízes, a condutividade hidráulica e a permeabilidade do solo ao ar (Schäfer-Landefeld et al., 2004; Yavuscan et al., 2005; Sweeney et al., 2006). Outras propriedades físicas integradoras também têm sido usadas, destacando-se o intervalo hídrico ótimo (Cavaliere et al., 2004; Araujo et al., 2004; Tormena et al., 2007).

O tráfego de máquinas durante o preparo e a semeadura pode influenciar negativamente as propriedades físicas do solo, com reflexos na emergência, no estabelecimento e na produtividade das culturas. A hipótese deste trabalho é de que diferentes cargas mecânicas aplicadas ao solo pelas semeadoras, com o intuito de melhorar o fechamento do sulco de plantio e o contato solo-semente, acarretam

alterações nas propriedades físicas do solo. Os objetivos deste trabalho foram determinar diferentes níveis de cargas mecânicas aplicadas ao solo durante o preparo e a semeadura da beterraba-açucareira (*Beta vulgaris* L.) e avaliar seus efeitos sobre algumas propriedades físicas do solo. Especificamente, foram avaliadas: (a) as pressões máximas detectadas no solo em diferentes camadas; (b) a densidade do solo na camada de 0–0,10 m; e (c) a resistência do solo à penetração de raízes, na linha e na entrelinha de semeadura.

## MATERIAL E MÉTODOS

No ano de 2006, foram realizados quatro experimentos na localidade de Skane, na região sul da Suécia, durante a semeadura da cultura da beterraba-açucareira (*Beta vulgaris* L.). Três locais, com topografia plana, foram usados para a instalação dos experimentos, sendo um deles com preparo convencional (PC1) e com preparo reduzido (PR1) e os outros dois apenas com preparo convencional (PC2 e PC3). O preparo convencional foi realizado no outono, utilizando uma aração a 0,25 m de profundidade, seguida de uma aração na primavera na profundidade de 0,20 m e gradagem a 0,03 m de profundidade. O preparo reduzido (PR1) foi realizado com gradagem a 0,03 m de profundidade, para o preparo do leito de semeadura. Esses locais foram cultivados nos últimos anos com a rotação de beterraba-açucareira (*Beta vulgaris* L.) e cereais (trigo, centeio, cevada, aveia). O solo, nos três locais, foi classificado como Eutric Cambisols (FAO, 1988) ou Cambissolo Háptico (Embrapa, 2006) (Quadro 1). Os tratamentos constaram de diferentes níveis de compactação exercidos pela semeadora e pelos pneus do trator usado no preparo do leito de semeadura. Os tratamentos foram: sem pressão extra exercida pela semeadora, denominado sem compactação (SC); pressão exercida pela semeadora considerada de baixa carga (BC); pressão exercida pela semeadora considerada de alta carga (AC); e pressão exercida pelas rodas do trator usado no preparo do solo com pressão de inflação nos pneus de 120 kPa, denominado carga do trator (CT). O delineamento estatístico utilizado foi o de blocos casualizados com quatro repetições. Cada parcela experimental apresentava área de 300 m<sup>2</sup> (20 m de comprimento e 15 m de largura). Entre os blocos havia uma bordadura com 15 m de largura, para a manobra das máquinas. A semeadura da beterraba-açucareira ocorreu no fim de abril, e sua colheita, em setembro de 2006. As medidas de pressões no solo foram determinadas durante a semeadura, enquanto as propriedades físicas do solo RP e Ds foram determinadas 45 dias após a semeadura.

As medidas de distribuição de cargas mecânicas no solo foram realizadas no experimento localizado em PC1, com um trator de massa aproximada de 4.745 kg e pressão de inflação do pneu de 120 kPa, para

**Quadro 1. Composição granulométrica e teor de água do solo nos locais estudados**

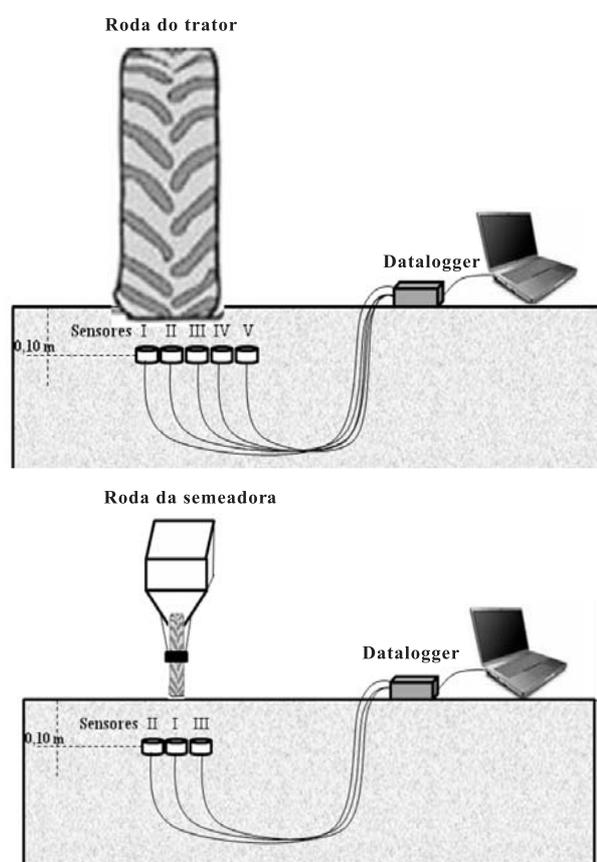
| Tipo de solo                          | Local      | Textura               | Argila             | Silte | Areia | Teor de água        |
|---------------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|-------|-------|---------------------|
|                                       |            |                       | g kg <sup>-1</sup> |       |       | kg kg <sup>-1</sup> |
| Cambissolo Háplico<br>(Embrapa, 2006) | Vagrerup 1 | Franco-argilo-arenoso | 210                | 260   | 530   | 0,21                |
|                                       | Vagrerup 2 | Franco-argilo-arenoso | 240                | 300   | 460   | 0,15                |
|                                       | Stävie     | Franco-argilo-arenoso | 210                | 310   | 480   | nd <sup>(1)</sup>   |
|                                       | Ädelholm   | Franco-arenoso        | 200                | 280   | 520   | 0,16                |

<sup>(1)</sup> Não determinado.

avaliação do tratamento CT. Este trator é usado na pré-semeadura e realiza uma gradagem superficial. Também foi utilizado um trator (massa de 6.760 kg) acoplado à semeadora específica para beterraba-açucareira, a qual foi ajustada hidráulicamente para aplicar cargas sobre a roda de solo em frente aos discos dosadores, de acordo com os níveis desejados nos tratamentos SC, BC e AC.

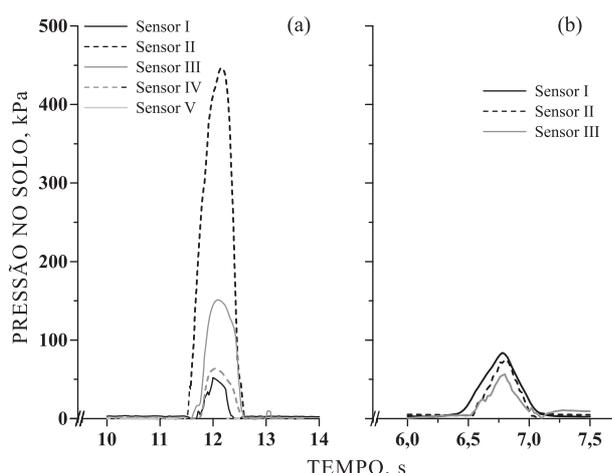
A distribuição das cargas mecânicas, abaixo da área de contato da roda com o solo, foi medida por sensores eletrônicos (DS Europe Series BC302) instalados no perfil do solo, nas camadas de 0–0,10 e 0,10–0,20 m de profundidade, para SC, BC e AC e CT. Cada sensor foi acoplado a um disco de alumínio (diâmetro: 17,5 mm; altura: 5,5 mm), colocados no centro de outro disco de maior diâmetro (diâmetro: 70 mm, altura: 15 mm). Sinais elétricos detectados pelos sensores no momento do tráfego foram obtidos em Volts (V), os quais foram transformados em pressão aplicada ao solo (kPa). A pressão obtida foi calculada conforme Keller & Arvidsson (2004). Os sensores foram colocados perpendicularmente à rota do tráfego (Figura 1), aproximadamente no centro do rodado das máquinas e nas profundidades de 0,10 e 0,20 m. Um sensor foi colocado no centro do rodado (I) e outros dois nas laterais para a semeadora (II e III). Para o rodado do trator, os cinco sensores foram colocados de tal forma que o sensor II ficou no centro e os demais nas laterais (Figura 1). Essa operação foi realizada em média quatro vezes em cada tratamento. Em cada instalação, as máquinas passaram pelo menos duas vezes no mesmo local, em que, no mínimo, dois sensores quantificaram as cargas máximas aplicadas ao solo. A média obtida das medidas dos sensores e das passadas compôs o valor médio da carga aplicada ao solo em cada tratamento.

Cada passada realizada pela semeadora ou pelo trator sobre os sensores instalados no solo produziu picos de pressão, dos quais foram obtidas as pressões máximas exercidas no solo. Exemplos da obtenção das pressões no solo durante o tráfego são apresentados na figura 2, correspondendo a uma única passada e ao sensor instalado na profundidade de 0,20 m. Em geral, os sensores localizados no centro do rodado detectaram a pressão máxima em cada passada.



**Figura 1. Ilustração do posicionamento dos sensores instalados no solo sob a roda do trator e da semeadora e da coleta dos dados.**

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada com um penetrômetro digital (Eijkelkamp Agrisearch Equipment©) e foram feitas na linha e entrelinha de plantio com cinco sub-repetições em cada parcela para os tratamentos SC, BC, AC e três sub-repetições para o tratamento CT. O teor de água do solo no momento das medidas de RP estava próximo à capacidade de campo. A profundidade de penetração foi de 0,30 m, em intervalos de 0,01 m. Na linha de plantio, foi feita a comparação entre tratamentos em intervalos de



**Figura 2. Medidas de pressão no solo em função do tempo de passagem da máquina sobre a área. (a) sensores instalados para as medições sob o pneu do trator e (b) sensores instalados para as medições sob a linha da semeadora.**

0,05 m de profundidade, para todos os experimentos (PC1, PR1, PC2 e PC3). Sob preparo convencional (PC1, PC2 e PC3), a RP foi avaliada na linha e entrelinha da cultura até 0,30 m de profundidade. Amostras indeformadas de solo para determinação da densidade do solo foram coletadas, utilizando anéis metálicos com 5 cm de altura e 7,2 cm de diâmetro. Quatro amostras foram coletadas na camada de 0–0,10 m em cada parcela (repetição), perfazendo 64 anéis por experimento. As amostras foram acondicionadas em filme plástico, para o transporte até o laboratório; posteriormente, elas foram preparadas e pesadas, para obtenção do conteúdo de água, e em seguida secas em estufa a 105 °C por 48 h. A densidade do solo foi determinada conforme Blake & Hartge (1986).

A comparação entre médias para densidade do solo, (Ds) e RP foi feita usando o intervalo de confiança (95 %). Todas as análises foram executadas usando o software SAS/STAT (SAS, 2000).

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados de pressões indicam aumento de valor no solo na sequência SC, BC e AC na camada de 0–0,10 m e de SC para CT na camada de 0,10–0,20 m (Quadro 2). Vários fatores influenciam essas medidas (Keller, 2004), de modo que as pressões máximas exercidas pelas máquinas podem ser dissipadas antes de chegarem até o sensor, resultando em dados subestimados. Como exemplo, tem-se a variação da posição exata entre o eixo que concentra a maior carga da máquina e a célula de carga do sensor que detecta a pressão exercida pela máquina. De acordo com

Schäffer et al. (2007), um pequeno deslocamento lateral do sensor durante o tráfego pode interferir na medida de pressão, produzindo um valor maior ou menor que aquele exercido pela máquina, ampliando a variabilidade dos dados. Neste estudo, a posição do pneu sobre os sensores foi controlada por meio da demarcação na superfície do solo na posição exata dos sensores, nos quais apenas as informações da primeira e segunda passadas foram armazenadas para a composição do valor médio de pressão no solo. Alakukku et al. (2003) salientam que a pressão não é uniformemente distribuída sobre a área de contato do pneu e que essa distribuição é complexa e pode ampliar a variabilidade de pressão aplicada ao solo. Esses autores afirmam ainda que a distribuição do peso das máquinas durante as operações de campo pode facilmente variar entre eixos, bem como entre os rodados, num mesmo eixo, dependendo da magnitude da carga ou da transferência de massa durante as operações de preparo do solo. De acordo com Horn et al. (2003), quanto maior o tráfego de máquinas sobre o solo, mais compacto é o rearranjo das partículas do solo. Assim, pressões na interface pneu/rodado-solo são função das características do pneu/rodado e das características da carga aplicada, bem como das condições do solo (Keller, 2004).

As pressões detectadas em SC, BC, AC e CT na camada superficial (0–0,10 m) foram, respectivamente, 57, 39, 40 e 61 % superiores às da camada subjacente (0,10–0,20 m). Além disso, a pressão da carga do trator para a camada de 0–0,10 m foi ligeiramente menor, em comparação com o AC. No tocante à camada de 0,10–0,20 m, houve aumento crescente da pressão no solo do tratamento SC para CT; entretanto, o incremento entre os tratamentos foi menor do que na camada de 0–0,10 m. Contudo, a pressão no solo resultante do CT foi, em média, duas vezes maior do que nos demais tratamentos. Os elevados valores de pressão (acima de 150 kPa, conforme Horn & Fleige

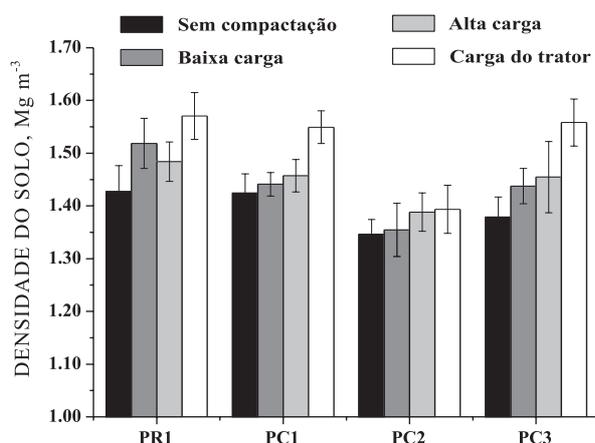
**Quadro 2. Pressão (kPa) exercida no solo nos diferentes tratamentos e nas camadas de 0–0,10 e 0,10–0,20 m no experimento localizado em PC1**

| Treatamento          | Pressão     |
|----------------------|-------------|
|                      | kPa         |
|                      | 0–0,10 m    |
| Sem Compactação (SC) | 124,17      |
| Baixa Carga (BC)     | 201,90      |
| Alta Carga (AC)      | 260,84      |
| Carga do Trator (CT) | 247,44      |
|                      | 0,10–0,20 m |
| Sem Compactação (SC) | 71,38       |
| Baixa Carga (BC)     | 78,82       |
| Alta Carga (AC)      | 105,09      |
| Carga do Trator (CT) | 151,34      |

(2003)), na camada de 0–0,10 m, indicam que a distribuição da pressão no solo foi mais concentrada em superfície. Segundo Keller et al. (2002), a compactação decorrente das elevadas pressões na camada superficial do solo pode ser minimizada pelo revolvimento do solo durante as operações de preparo. A maior preocupação, no entanto, é com a distribuição das pressões em profundidade, uma vez que a remoção da compactação no subsolo demanda altos custos (Chamen et al., 2003).

O valor médio da pressão detectada na camada de 0,10–0,20 m para o tratamento CT foi de 151 kPa, acima dos 116 kPa encontrados por Horn et al. (2003) na camada de 0,15 m para solos similares. Entretanto, a influência do tráfego do trator sobre as propriedades do solo pode ser amplamente dissipada na camada de 0,15–0,30 m (Liebig et al., 1993), o que torna difícil a comparação desse tipo de resultado.

Os valores da densidade do solo ( $D_s$ ) foram mais baixos no tratamento SC (Figura 3), independentemente dos locais estudados. Os experimentos em PC1, PR1 e PC3 apresentaram, respectivamente, valores médios de  $D_s$  variando de 1,38 a 1,56, 1,42 a 1,55 e 1,43 a 1,57  $Mg\ m^{-3}$ , ao passo que em PC2 a  $D_s$  variou entre 1,35 e 1,39  $Mg\ m^{-3}$ . A  $D_s$  refletiu consistentemente os efeitos das pressões exercidas no solo, verificando-se incremento de  $D_s$  de SC para CT, apesar de a pressão média na camada superficial do solo para o tratamento CT ter sido inferior à do tratamento AC. Em PR1, essa sequência foi diferente: o tratamento BC apresentou  $D_s$  maior que no tratamento AC. Estatisticamente, os valores de  $D_s$  não diferiram entre os tratamentos SC, BC e AC em todos os locais estudados. Entretanto, a  $D_s$  em SC foi significativamente menor quando comparada ao tratamento CT. Em PC1, os tratamentos SC, BC e AC não diferiram entre si (IC = 95 %), diferindo do solo sob CT, que



**Figura 3.** Densidade média do solo na camada de 0–0,30 m em cada local em função dos tratamentos com diferentes níveis de pressão nele exercida. As barras indicam o intervalo de confiança (95 %). As médias são estatisticamente diferentes quando não ocorre sobreposição das barras.

apresentou a maior  $D_s$ . O coeficiente de variação da  $D_s$  não ultrapassou 7 % nos tratamentos estudados. Esses resultados estão de acordo com os de Schäfer-Landefeld et al. (2004), que constataram incremento significativo da  $D_s$  após a passagem das máquinas. Também, Sweeney et al. (2006) estudaram o efeito da compactação em um solo franco-siltoso e verificaram que, no rodado do pneu do trator, a  $D_s$  foi maior que 1,65  $Mg\ m^{-3}$ .

A resistência do solo à penetração (RP) apresentou valores não limitantes ao crescimento e desenvolvimento de raízes, conforme o critério estabelecido por Taylor et al. (1966) (Figura 4). Nos locais onde foi realizado o preparo convencional, verificaram-se valores de RP < 1,0 MPa em superfície (0,05 m), havendo aumento da RP em subsuperfície. Em PR1, único local sob preparo reduzido, os valores de RP em superfície foram superiores a 1 MPa e o incremento da RP se deu abaixo dos 0,25 m, em que RP > 2 MPa foi observada no tratamento CT. Os resultados demonstram que, na camada superficial de 0–0,05 m em PC2 e PR1, constataram-se diferenças significativas de RP entre o tratamento CT e os demais. Em PC3 e PC1, não houve diferença significativa de RP entre os tratamentos. Todos os locais sob preparo convencional apresentaram maior incremento de RP na camada de 0,10 m, comparado com as demais camadas. Além disso, nesta camada houve diferença significativa de RP entre o tratamento CT e os demais. Em PC1, a RP no tratamento SC diferiu estatisticamente (IC = 95 %) do tratamento BC, porém não apresentou diferença em relação ao AC.

Na camada de 0,15 m, observou-se que a RP apresentou diferenças significativas entre tratamentos, apesar de essas diferenças terem sido distintas entre os locais. A partir da profundidade de 0,20 m, os experimentos sob preparo convencional apresentaram redução da RP em profundidade, enquanto um aumento de RP pôde ser constatado em PR1 sob preparo reduzido, alcançando valores em torno de 2,5 MPa abaixo de 0,25 m. Nesta profundidade, PR1 apresentou valores de RP no tratamento SC maiores que nos demais locais. Abaixo da camada de 0,20 m, a RP mostrou valores similares em todos os experimentos sob preparo convencional.

As diferenças de RP entre tratamentos foram mais pronunciadas entre SC e CT, principalmente na camada de 0,10 e 0,15 m, indicando uma possível camada compactada em decorrência da carga exercida pelo trator. Assim como as outras propriedades estudadas, o tratamento SC apresentou valores mais baixos de RP quando comparado aos demais tratamentos, demonstrando o efeito das diferentes pressões aplicadas ao solo sobre suas propriedades físicas. Stone & Da Silveira (1999) verificaram valores limitantes de RP (> 2 MPa) na camada abaixo de 0,10 m de profundidade em um Latossolo Vermelho-Escuro e concluíram que a grade aradora usada no preparo do solo propiciou uma camada mais compacta

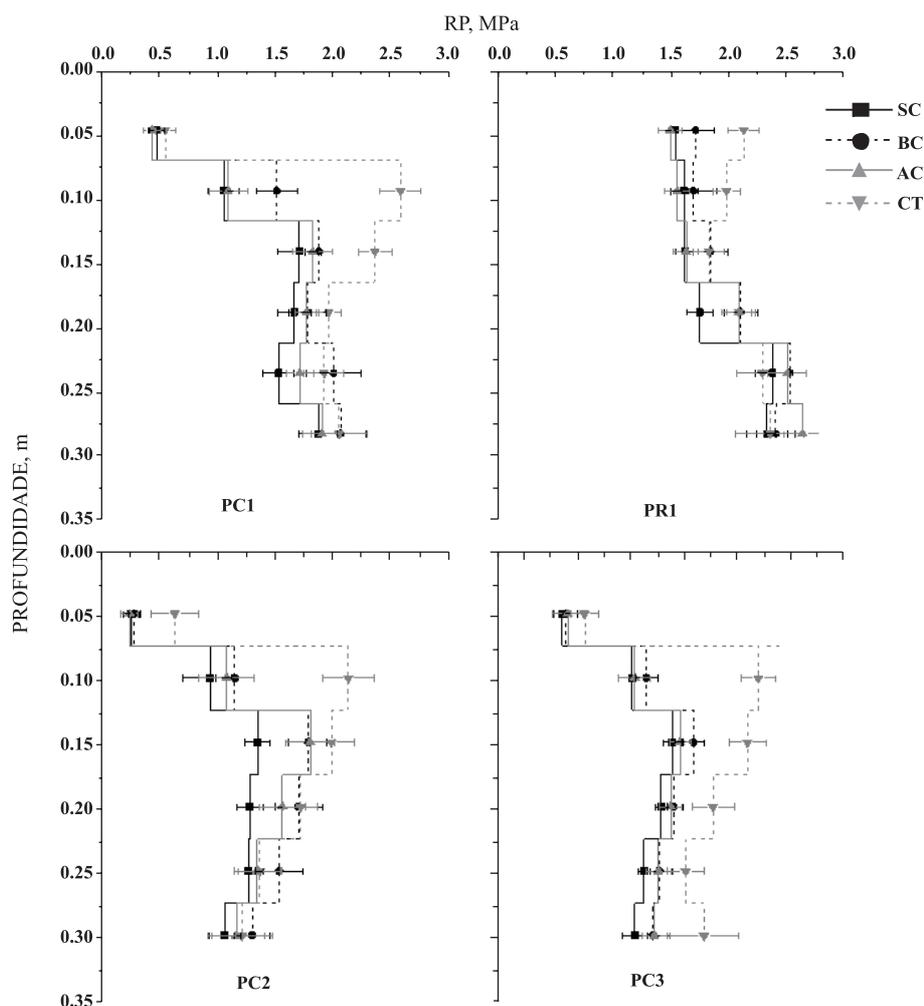


Figura 4. Resistência à penetração do solo (RP) de 0–0,30 m de profundidade nos vários locais estudados. As barras indicam o intervalo de confiança (95 %), e a não sobreposição destas indica que médias dos tratamentos são diferentes.

entre 0,10 e 0,24 m de profundidade. Resultados similares também foram obtidos por Sweeney et al. (2006). Por outro lado, em outro estudo com implementos pesados, a camada compactada, denominada de pé de arado, identificada através da RP, esteve a 0,27–0,32 m (Schäfer-Landefeld et al., 2004). Valores de densidade do solo relativamente altos na camada de 0,23–0,27 m, quando comparados aos das camadas adjacentes sob preparo convencional, também foram constatados por Riley et al. (2005). De acordo com Alakukku et al. (2003), o peso das máquinas e a pressão que estas exercem no solo influenciam diretamente a profundidade e a distribuição da camada compactada no subsolo.

O comportamento da RP sob preparo convencional foi semelhante para todos os tratamentos, sem diferenças significativas entre os locais dos experimentos (IC = 95 %). Assim, os dados dos três experimentos foram reunidos com o intuito de analisar o comportamento da RP de cada tratamento, na linha de plantio e na sua entrelinha (Figura 5). Observa-se que, nas

camadas superficiais (0–0,12 m), o tratamento CT apresentou valores de RP superiores aos encontrados nos demais tratamentos, tanto na linha de plantio quanto na entrelinha. Entretanto, até a profundidade de 0,06 m a RP é similar entre linha e entrelinha. Isso pode ser devido, principalmente, ao preparo do solo na pré-semeadura, o qual é realizado até 0,03 m de profundidade. Da Veiga et al. (2007) encontraram valores de RP menores que 2 MPa, utilizando um trator de 4 Mg, e não constataram diferenças entre a linha e a entrelinha para o preparo convencional. Em um solo franco-siltoso, Sweeney et al. (2006) obtiveram valores de RP menores que os do presente estudo. Esses autores verificaram que a RP na linha da cultura esteve acima de 2 MPa na profundidade de 0,10 m, enquanto na entrelinha e sob o rodado do trator ela variou em torno de 1,2 MPa. Isso sugere que o tratamento CT tem causado efeitos deletérios na estrutura do solo, principalmente abaixo da camada de 0,10 m, sinalizando maiores cuidados com as operações de campo realizadas com o trator.

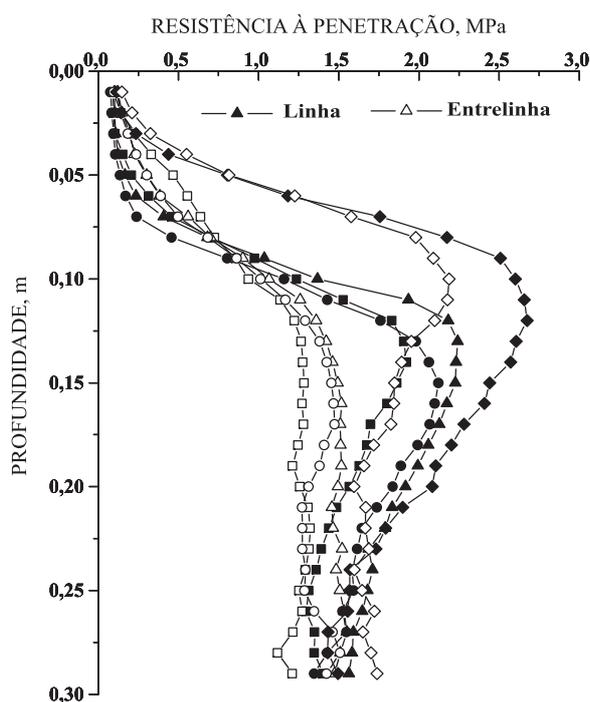


Figura 5. Resistência à penetração do solo média, em profundidade, na linha e entrelinha de plantio. ■ Sem Compactação; ▲ Baixa Carga; ● Alta Carga; ◆ Carga do Trator.

As diferenças entre a linha e a entrelinha tornam-se mais evidentes nos tratamentos SC, BC e AC nas camadas de 0,10 a 0,20 m, em que ocorre aumento dos valores de RP sob a linha de plantio. Além disso, valores de RP na linha em BC, AC e CT ultrapassaram 2 MPa, indicando que as pressões aplicadas no solo pelo rodado da semeadora ou do trator tendem a se concentrar nessa camada, dissipando-se na entrelinha. As cargas aplicadas pela semeadora (BC e AC) sugerem que a aplicação delas pela semeadora pode resultar em problemas ao crescimento de raízes e, conseqüentemente, à produtividade da cultura. Contudo, outros fatores, como as condições climáticas durante o ciclo da cultura, o tipo de cultura, etc., podem ter influência na magnitude dos efeitos negativos causados por esses valores limitantes de RP nessa camada.

## CONCLUSÕES

1. Os efeitos da pressão no solo acarretaram aumento da densidade do solo em superfície, ocasionando, em geral, aumento na sequência SC < BC < AC < CT.

2. A resistência à penetração variou em profundidade. O tratamento CT apresentou os maiores valores de RP enquanto SC mostrou os menores valores ou não diferiu dos demais (BC e AC), na maioria das profundidades estudadas.

3. A RP atingiu valores considerados limitantes na linha entre a profundidade de 0,10 e a de 0,20 m para os tratamentos BC, AC e CT.

## LITERATURA CITADA

- ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; van der LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMERF, C. & SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review Part 1. Machine/soil interactions. *Soil Till. Res.*, 73:145-160, 2003.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; INOUE, T.T. & COSTA, A.C.S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico após treze anos de semeadura direta. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:495-504, 2004.
- ARVIDSSON, J. & HAKANSSON, I. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil Till. Res.*, 39:175-197, 1996.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.363-375.
- CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A. & COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:137-147, 2004.
- CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMERD, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F. & WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 2. Equipment and field practices. *Soil Till. Res.*, 73:161-174, 2003.
- CHAN, K.Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R.C.; DEAR, B.S. & PEOPLES, M.B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil Till. Res.*, 89:13-21, 2006.
- DA VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. & REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from Southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. *Soil Till. Res.*, 92:104-113, 2007.
- EAVIS, B.W. Soil physical conditions affecting seedling root growth: I. Mechanical, impedance, aeration and moisture availability as influenced by bulk density and moisture level in a sandy loam soil. *Plant Soil*, 36:613-622, 1972.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- FAO. FAO/UNESCO soil map of the world, revised legend. World Resources Report 60. Rome, Wageningen, FAO, ISRIC, 1988. 138p. (Reprinted as Technical Paper, 20)
- HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.*, 38:95-158, 1985.

- HORN, R. & ROSTEK, J. Subsoil compaction processes – State of knowledge. In: HORN, R.; van den AKKER, J.J.H. & ARVIDSSON, J., eds. Subsoil compaction – Distribution, processes and consequences. Reiskirchen, Catena Verlag, 2000. p.44-54.
- HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. & van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Till. Res.*, 35:23-36, 1995.
- HORN, R.; van den AKKER, J.J.H. & ARVIDSSON, J., eds. Subsoil compaction: Distribution, processes and consequences. Reiskirchen, Catena Verlag, 2000. 462p.
- HORN, R. & FLEIGE, H. A method assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil Till. Res.*, 73:89-99, 2003.
- HORN, R.; WAY, T. & ROSTEK, J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil Till. Res.*, 73:101-106, 2003.
- IMHOFF, S.; DA SILVA, A.P. & FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 68:17-24, 2004.
- KELLER, T. Soil compaction and soil tillage – Studies in agricultural soil mechanics. Uppsala, Sweden, Swedish University of Agricultural Sciences, 2004. 201p. (Tese de Doutorado)
- 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 Till. Res.*, 79:191-205, 2004.
- KELLER, T.; TRAUTNER, A. & ARVIDSSON, J. Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. *Soil Till. Res.*, 68:39-47, 2002.
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. & USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:450-457, 1980.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- LIEBIG, M.A.; JONES, A.J.; MIELKE, L.N. & DORAN, J.W. Controlled wheel traffic effects on soil properties in ridge tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1061-1066, 1993.
- RILEY, H.C.F.; BLEKEN, M.A.; ABRAHAMSEN, S.; BERGJORD, A.K. & BAKKEN, A.K. Effects of alternative tillage systems on soil quality and yield of spring cereals on silty clay loam and sandy loam soils in the cool, wet climate of central Norway. *Soil Till. Res.*, 80:79-93, 2005.
- SAS INSTITUTE INCORPORATION. SAS/GRAPH<sup>®</sup>. Software: Reference. Version 8. Cary, 2000.1272p.
- SCHÄFER-LANDEFELD, L.; BRANDHUBER, R.; FENNER, S.; KOCH, H.-J. & STOCKFISCH, N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. *Soil Till. Res.*, 75:75-86, 2004.
- SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W. & SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery: Soil physical and mechanical aspects. *Soil Till. Res.*, 93:28-43, 2007.
- SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W. & PAINTER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: A review. II. Compaction under tyres and other running gear. *Soil Till. Res.*, 1:373-400, 1981.
- SOANE, G.C.; GODWIN, R.J. & SPOOR, G. Influence of deep loosening techniques and subsequent wheel traffic on soil structure. *Soil Till. Res.*, 8:231-237, 1986.
- STONE, L.F. & DA SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. *Pesq. Agric. Bras.*, 34:83-91, 1999.
- STONE, R.J. & EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. *J. Agric. Eng. Res.*, 60:15-24, 1995.
- SWEENEY, D.W.; KIRKHAM, M.B. & SISSON, J.B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil. *Agron. J.*, 98:637-643, 2006.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relations to coarse textured materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- YAVUZCAN, H.G.; MATTHIES, D. & AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: Impacts of tillage method and soil water content. *Soil Till. Res.*, 84:200-215, 2005.

