

COMPRESSIBILIDADE DE TRÊS LATOSSOLOS EM FUNÇÃO DA UMIDADE E USO⁽¹⁾

M. K. KONDO⁽²⁾ & M. S. DIAS JUNIOR⁽³⁾

RESUMO

Por meio do ensaio de compressibilidade, foram estudados os efeitos do manejo e da umidade na pressão de preconsolidação (σ_p) de três solos: Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-Escuro sob cultura anual, mata natural e pastagem, na região de Lavras (MG), em duas profundidades (0-0,03 e 0,27-0,30 m). Para cada condição, foram coletadas cinco amostras indeformadas e uma deformada, com três repetições. As amostras, indeformadas e com diferentes umidades, foram utilizadas no ensaio de compressão uniaxial, obtendo-se as curvas de compressão, das quais foram extraídas as respectivas pressões de preconsolidação. Com as amostras deformadas, determinaram-se os limites de plasticidade e de contração, textura e matéria orgânica. Os modelos de compactação testados foram baseados na pressão de preconsolidação e na umidade do solo. Para uma mesma condição e profundidade, houve diferença significativa entre os valores dos teores de argila e areia nos três solos. Os valores da densidade do solo inicial (D_s) foram estatisticamente diferentes para todas as condições na mesma profundidade, exceto na camada de 0-0,03 m para a cultura anual. À medida que a umidade do solo aumentou, a pressão de preconsolidação decresceu exponencialmente, indicando uma redução na capacidade de suporte de carga do solo. O LR apresentou, em geral, maior capacidade de suporte de carga do que o LE e LV. Essa maior capacidade de suporte de carga pode estar associada com o seu maior teor de argila e menor teor de areia. A capacidade de suporte de carga na zona de friabilidade variou de 154 a 167 kPa, para o LV; de 77 a 183 kPa, para o LR, e de 77 a 132 kPa, para o LE. As umidades 0,33 a 0,30 kg kg^{-1} , 0,42 a 0,27 kg kg^{-1} , e 0,35 a 0,33 kg kg^{-1} correspondem à faixa de friabilidade (LP-LC) do LV, LR e LE, respectivamente. O modelo baseado na história de tensão do solo evidenciou o efeito da compactação causada pelas máquinas de preparo do solo na camada de 0,27-0,30 m, para a cultura anual, enquanto, para a pastagem, ocorreu o efeito do pisoteio do gado na camada de 0-0,03 m.

Termos de indexação: curvas de compressão, modelos de compactação, manejo, pressão de preconsolidação.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada ao Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - UFLA. Projeto financiado pelo CNPq. Recebido para publicação em abril e aprovado em dezembro de 1998.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo, Pós-graduando do Departamento de Ciência do Solo, UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista da CAPES.

⁽³⁾ Engenheiro-Agrícola, Professor Adjunto do Departamento de Ciência do Solo, UFLA. Bolsista do CNPq.

SUMMARY: *SOIL COMPRESSIBILITY OF THREE LATOSOLS (OXISOLS) AS A FUNCTION OF MOISTURE AND USE*

Using the compressibility test, the effect of soil management and moisture content on the preconsolidation pressure (σ_p) of three soils, a Red-Yellow Latosol (LV), a Dusk Red Latosol (LR) and a Dark-Red Latosol (LE) under annual crop, natural forest and pasture, was studied in the area of Lavras (MG) at two depths (0-0.03 and 0.27-0.30 m). For each condition, five undisturbed soil samples and a disturbed one were collected, with three replications. The undisturbed soil samples with different soil moisture content were used in the uniaxial compression test, with compression curves being obtained, from which preconsolidation pressures were extracted. The plasticity and shrinkage limits, texture and organic matter were determined using the disturbed soil samples. The models of compaction tested were based on the preconsolidation pressure and on soil moisture. For the same soil management system and depth, significant difference was observed among the clay and sand content of the three soils. The values of the initial soil bulk density (D_s) were statistically different for all soil management systems in the same soil depth, except the 0-0.03 m for the annual crop. Increased soil moisture content caused an exponential decrease in the preconsolidation pressure, indicating a reduction in the load support capacity of the soil. The LR had in general higher load support capacity than LE and LV. This higher load support capacity may be associated with its higher clay content and lower sand content. The load support capacity of the friable zone varied from 154 to 167 kPa for LV, 77 to 183 kPa for LR and from 77 to 132 kPa for LE. The soil moisture contents 0.33 to 0.30 kg kg⁻¹, 0.42 to 0.27 kg kg⁻¹, and 0.35 to 0.33 kg kg⁻¹ correspond to the friable zone (LP-LC) of the LV, LR and LE, respectively. The model based on the stress history of the soil evidenced the effect of the compaction caused by the machines in the 0.27-0.30 m layer, for the annual crop, while for the pasture the cattle trampling effect was evidenced in the 0-0.03 m layer.

Index terms: soil compression curves, compaction models, soil management, preconsolidation pressure.

INTRODUÇÃO

Com a intensa utilização de tecnologias voltadas à motomecanização das operações agrícolas e florestais, o processo de compactação do solo tornou-se fator limitante à obtenção de maior produtividade agrícola. Assim, a determinação da suscetibilidade à compactação assume importante papel como fator de limitação econômica.

A suscetibilidade do solo à compactação torna-se crítica todas as vezes que as pressões aplicadas ao solo excederem a sua capacidade de suporte de carga, a qual é uma função da umidade (U). Em solos secos, considerando sua alta capacidade de suporte de carga, o processo de compactação não ocorre ou é sem importância. Entretanto, quando o solo está úmido, sua capacidade de suporte de carga é baixa, tornando-o vulnerável ao processo de compactação (Larson et al., 1980). Portanto, a maior ou menor facilidade do solo de se deformar está relacionada com a sua umidade.

Para estudar a compressibilidade do solo, Larson et al. (1980); Horn (1988); Dias Junior (1994) e Dias Junior & Pierce (1996) usaram a curva de compressão do solo, obtida por meio do ensaio de compressão uniaxial. A curva de compressão do solo representa, graficamente, a relação entre o logaritmo

da pressão aplicada e algum parâmetro relacionado com a estrutura do solo, mais frequentemente com a densidade do solo (D_s) ou índice de vazios (Casagrande, 1936; Leonards, 1962; Holtz & Kovacs, 1981; Smith et al., 1997).

Quando o solo não sofreu nenhuma pressão prévia (solo de mata natural, por exemplo), esta relação teoricamente é linear, e a aplicação de qualquer pressão resultará em deformações não-recuperáveis (Larson & Gupta, 1980; Larson et al., 1980; Culley & Larson, 1987; Gupta & Allmaras, 1987; Lebert & Horn, 1991; Dias Junior & Pierce, 1995). Entretanto, quando o solo já experimentou pressões prévias (solo sob cultivo ou pastagem, por exemplo) ou ciclos de secagem ou umedecimento, a variação de pressões resultará em alguma deformação que pode ser relativamente pequena e recuperável, ou não-recuperável (Stone & Larson, 1980; Gupta et al., 1989; Lebert & Horn, 1991).

Embora se tenha vasto esclarecimento do processo de compactação (Barnes et al., 1971; Gupta et al., 1985; Gupta & Allmaras, 1987; Larson et al., 1989; Soane & Ouwerkerk, 1994), existem poucos estudos que quantificam o efeito da variação de umidade na pressão de preconsolidação do solo (Dias Junior, 1994), principalmente para as condições brasileiras (Dias Junior & Pierce, 1996).

Os modelos de compactação do solo têm sido agrupados de diferentes maneiras. Shafer et al. (1991) agruparam tais modelos em: (a) modelos hidrostáticos (Bailey et al., 1984, 1986); (b) modelos baseados na diferença entre a tensão principal maior e a tensão principal menor (fase I) (Grisso et al., 1987); (c) modelos baseados na diferença entre a tensão principal maior e a tensão principal menor (fase II) (Bailey & Johnson, 1989), e (d) modelos baseados na diferença entre a tensão principal maior e a tensão principal menor (fase III).

Gupta et al. (1989) agruparam os modelos de compactação do solo em: (a) modelos baseados na técnica do elemento finito (Perumpral et al., 1969, 1971; Coleman & Perumpral, 1974; Pollock Jr. et al., 1986; Raper & Erbach, 1990a,b), e (b) modelos analíticos (Soehne, 1958; Gupta & Larson, 1982; Gupta et al., 1985; van den Akker & van Wijk, 1987).

Gupta & Raper (1994) agruparam os modelos de compactação do solo nas seguintes categorias: (a) modelos baseados nas forças mecânicas provenientes de veículos agrícolas aplicadas à superfície do solo (Soehne, 1958; Trabbic et al., 1959; Gill & Vanden Berg, 1968; Koolen & Kuipers, 1983; Burt et al., 1989); (b) modelos baseados nas relações entre tensão e deformação do solo (Soehne, 1958; Dexter & Tanner, 1973; Amir et al., 1976; Larson et al., 1980; Gupta & Larson, 1982; Koolen & Kuipers, 1983; Grisso et al., 1987; Bailey & Johnson, 1989), e (c) modelos baseados na propagação das forças no solo os quais se subdividem em: (c.1) modelos baseados na técnica do elemento finito (Duncan & Chang, 1970; Perumpral et al., 1971; Pollock Jr. et al., 1986; Raper & Erbach, 1990a,b), e (c.2) modelos analíticos (Fröhlich, 1934; Soehne, 1958; Gupta & Larson, 1982; Boussinesq, 1985; Vanden Akker & van Wijk, 1987).

Mais recentemente, Dias Junior (1994) desenvolveu um modelo baseado na pressão de preconsolidação para solos parcialmente saturados, o qual poderá ser usado na prevenção da compactação adicional do solo.

Baseado nestas considerações, este estudo teve como objetivos: testar os modelos propostos por Dias Junior (1994) e Dias Junior & Pierce (1996) para um Latossolo Vermelho-Amarelo, um Latossolo Roxo e um Latossolo Vermelho-Escuro da região de Lavras (MG), sob as condições de cultura anual, mata natural e pastagem; propor a pressão de preconsolidação como um indicador quantitativo da sustentabilidade estrutural dos solos.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foram coletadas amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) sob cultura anual, localizado no município de Ijaci (MG), e sob mata natural e pastagem, localizado no município de Lavras (MG); um Latossolo Roxo (LR)

e um Latossolo Vermelho-Escuro (LE) sob cultura anual, mata natural e pastagem, localizados no município de Lavras (MG).

A seguir, é apresentado um histórico dos solos amostrados:

a) Latossolo Vermelho-Amarelo

- Cultura anual: cultivo convencional há mais de dez anos, com uso de arado de disco, grade aradora e grade niveladora, com um único plantio anual, de soja ou milho, no mês de outubro, relevo suave ondulado, latitude 21°09'38"S e longitude 44°55'05"W Gr.

- Mata natural: floresta tropical subcaducifolia, relevo suave ondulado, latitude 21°13'33"S e longitude 44°57'35"W Gr.

- Pastagem: plantio de forrageira (braquiária) há mais de cinco anos, com capacidade de suporte animal de 01 cabeça/ha, relevo suave ondulado, latitude 21°13'33"S e longitude 44°57'37"W Gr.

b) Latossolo Roxo

- Cultura anual: cultivo convencional há mais de dez anos, com uso de arado de disco, grade aradora e grade niveladora, com um único plantio anual, de milho ou soja, no mês de outubro, relevo suave ondulado, latitude 21°13'42"S e longitude 44°58'37"W Gr.

- Mata natural: floresta tropical subperenifolia, relevo suave ondulado, latitude 21°13'38"S e longitude 44°58'18"W Gr.

- Pastagem: plantio de forrageira (braquiária) há mais de cinco anos, com capacidade de suporte animal de 01 cabeça/ha, relevo suave ondulado, latitude 21°13'50"S e longitude 44°57'59"W Gr.

c) Latossolo Vermelho-Escuro

- Cultura anual: cultivo convencional há mais de dez anos, com uso de arado de disco, grade aradora e grade niveladora, com um único plantio anual, de milho ou sorgo, no mês de outubro, relevo suave ondulado, latitude 21°11'31"S e longitude 44°57'44"W Gr.

- Mata natural: floresta tropical subperenifolia, relevo suave ondulado, latitude 21°13'11"S e longitude 44°57'57"W Gr.

- Pastagem: plantio de forrageira (braquiária) há mais de cinco anos, com capacidade de suporte animal de 01 cabeça/ha, relevo suave ondulado, latitude 21°11'37"S e longitude 44°57'57"W Gr.

Para cada uma das condições estudadas, foi realizada a amostragem em três pontos, escolhidos aleatoriamente, nas profundidades de 0-0,03 e 0,27-0,30 m, sendo, em cada profundidade, coletadas cinco amostras indeformadas, usando um anel volumétrico de 0,064 m de diâmetro interno por 0,0254 m de altura. Essas amostras foram utilizadas no ensaio de compressão uniaxial. Coletou-se, também, uma amostra deformada, com três repetições, para cada condição, que foi usada nas determinações do

limite de plasticidade e do limite de contração. Na condição de cultura anual sob cultivo convencional, a amostragem foi realizada logo após a colheita da soja (LV) e do milho (LR e LE), época em que foram amostrados os outros usos.

Para determinar os limites de plasticidade (LP) (Sowers, 1965), limites de contração (LC) (Bowles, 1986), densidade do solo (Ds) (Blake & Hartge, 1986), carbono orgânico (C) (Raij & Quaggio, 1983) e textura (Gee & Bauder, 1986) foram utilizadas as amostras deformadas.

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados de acordo com Bowles (1986), modificado por Dias Junior (1994), utilizando as amostras indeformadas.

Para a simulação das diferentes umidades em laboratório, saturaram-se inicialmente as amostras indeformadas, as quais foram secas ao ar no laboratório até obter as umidades, variando na faixa de 0,05 a 0,49 kg kg⁻¹. As umidades foram obtidas por secagem pelo fato de ser o valor mínimo da água retida a 1.500 kPa ser igual em média a 0,22 kg kg⁻¹, para o LE; 0,23 kg kg⁻¹, para o LV, e 0,26 kg kg⁻¹, para o LR, não sendo possível em laboratório, utilizando o extrator de placa porosa, a aplicação de sucções maiores do que 1.500 kPa, o que permitiria a obtenção de valores de umidade menores, como, por exemplo, 0,05 kg kg⁻¹.

Após a obtenção das umidades desejadas, as amostras indeformadas foram submetidas ao ensaio

de compressão uniaxial, usando um consolidômetro da marca Boart Longyear, cuja aplicação das pressões se fez por meio de ar comprimido. As pressões aplicadas a cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, sendo cada uma aplicada até que 90% da deformação máxima fosse alcançada (Holtz & Kovacs, 1981) e somente então é que se aplicou uma nova pressão. Nos ensaios de compressão, foram utilizadas aplicações sucessivas de pressões conforme método usado por Römken & Miller (1971); Larson & Gupta (1980); Culley & Larson (1987); McNabb & Boersma (1993) e Veenhof & McBride (1996), não sendo usado, portanto, o descarregamento das pressões aplicadas às amostras durante os ensaios.

Realizado o ensaio, a curva de compressão do solo foi obtida, plotando-se a pressão aplicada no eixo das abscissas (escala logarítmica) versus a densidade do solo (Ds) correspondente no eixo das ordenadas (escala decimal), conforme Dias Junior & Pierce (1996).

A partir das curvas de compressão, obtiveram-se as σ_p , usando uma planilha eletrônica, proposta por Dias Junior & Pierce (1995). As pressões de preconsolidação obtidas foram então plotadas no eixo das ordenadas e as umidades simuladas em laboratório foram plotadas no eixo das abscissas, obtendo-se os modelos de compactação baseados na pressão de preconsolidação, conforme proposto por Dias Junior (1994) e Dias Junior & Pierce (1996). Os resultados obtidos estão apresentados no quadro 1.

Quadro 1. Teores de areia, silte, argila, carbono (C), limite de contração (LC), limite de plasticidade (LP), friabilidade, densidade do solo inicial (Ds_i) e densidade do solo na pressão de preconsolidação (Ds_{op}) de três Latossolos sob diferentes usos

Solo	Areia ⁽¹⁾	Silte ⁽¹⁾	Argila ⁽¹⁾	C ⁽¹⁾	LC ⁽¹⁾	LP ⁽¹⁾	Friabilidade	Ds _i ⁽²⁾	Ds _{op} ⁽²⁾
	g kg ⁻¹				kg kg ⁻¹			g kg ⁻¹	
Cultura anual (0-0,03 m)									
LV	447 a	316 ^{ns}	237 c	18 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,33 b	0,03 b	1,00 ^{ns}	1,12 ^{ns}
LR	88 c	254 ^{ns}	658 a	18 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,42 a	0,15 a	1,01 ^{ns}	1,09 ^{ns}
LE	232 b	299 ^{ns}	469 b	20 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,35 b	0,02 b	0,98 ^{ns}	1,08 ^{ns}
(0,27-0,30 m)									
LV	388 a	186 ^{ns}	426 b	12 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,35 c	0,03 b	1,00 b	1,08 b
LR	82 c	235 ^{ns}	683 a	14 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,44 a	0,14 a	1,11 a	1,16 a
LE	169 b	134 ^{ns}	697 a	14 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,37 b	0,04 b	0,94 c	1,06 b
Mata natural (0-0,03 m)									
LV	526 a	100 ^{ns}	374 b	27 b	0,25 c	0,29 b	0,04 b	1,18 a	1,28 a
LR	189 b	145 ^{ns}	666 a	40 a	0,39 a	0,44 a	0,05 b	0,71 c	0,86 c
LE	539 a	129 ^{ns}	332 b	51 a	0,31 b	0,44 a	0,13 a	1,05 b	1,18 b
(0,27-0,30 m)									
LV	432 a	105 ^{ns}	463 b	9 b	0,24 ^{ns}	0,29 c	0,05 b	1,23 a	1,29 a
LR	143 b	98 ^{ns}	759 a	19 a	0,29 ^{ns}	0,41 a	0,12 a	0,89 b	1,02 b
LE	398 a	108 ^{ns}	494 b	11 ab	0,22 ^{ns}	0,34 b	0,12 ab	1,21 a	1,30 a
Pastagem (0-0,03 m)									
LV	573 a	69 c	358 b	23 b	0,25 ^{ns}	0,31 c	0,06 b	1,23 a	1,34 a
LR	182 c	231 a	587 a	25 ab	0,32 ^{ns}	0,46 a	0,14 a	1,05 b	1,16 b
LE	477 b	125 b	398 b	27 a	0,33 ^{ns}	0,40 b	0,07 ab	1,04 b	1,18 b
(0,27-0,30 m)									
LV	473 a	67 c	460 b	7 b	0,22 b	0,28 b	0,06 ^{ns}	1,29 a	1,37 a
LR	173 c	216 a	611 a	15 a	0,28 a	0,43 a	0,15 ^{ns}	1,02 c	1,10 c
LE	398 b	106 b	496 b	13 a	0,27 ab	0,37 a	0,10 ^{ns}	1,17 b	1,27 b

⁽¹⁾ n = 3 ⁽²⁾ n = 15 ^{ns} não-significativo. Médias, na mesma coluna, dentro de cada uso e profundidade, seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5%.

Aos pontos de pressão de preconsolidação versus umidade foram ajustadas equações por meio de regressões da forma $\sigma_p = 10^{(a + b U)}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises físicas de caracterização dos solos são apresentados no quadro 1. Para uma mesma condição e profundidade, houve diferença significativa entre os valores dos teores de argila e de areia nos três solos. Os teores de silte não foram significativamente diferentes, exceto para a condição de pastagem nas duas profundidades (Quadro 1). O LR apresentou maiores teores de argila, enquanto o LV apresentou maiores teores de areia. Os valores da densidade do solo inicial (D_{s_i}) (antes do ensaio de compressão uniaxial) foram estatisticamente diferentes para todas as condições na mesma profundidade, exceto na camada de 0-0,03 m para a cultura anual, refletindo o efeito destrutivo do preparo na estrutura desses solos (Quadro 1). Os valores da densidade do solo correspondentes à pressão de preconsolidação ($D_{s_{op}}$) seguiram a mesma tendência dos valores da densidade do solo inicial. A faixa de valores entre as D_{s_i} e $D_{s_{op}}$ refere-se aos valores de densidade do solo correspondentes à curva de compressão secundária do solo, na qual não ocorre compactação adicional.

As σ_p decresceram exponencialmente com U (Figuras 1 a 3) e seguiram o mesmo modelo proposto por Dias Junior (1994) para solos sob condições de clima temperado. Este modelo é da forma:

$$\sigma_p = 10^{(a + b U)}$$

em que σ_p é a pressão de preconsolidação (kPa), a e b são parâmetros empíricos, obtidos por meio do ajuste das curvas de regressão, e U a umidade gravimétrica (kg kg^{-1}). O parâmetro "a" variou de 2,63 a 3,01 e o "b" variou de -0,67 a -3,12, enquanto os coeficientes de determinações (R^2) variaram de 0,12 a 0,85 (Quadro 2), sendo os valores mais baixos para a mata natural.

Vários pesquisadores (Larson & Gupta, 1980; Larson et al., 1980; Gupta et al., 1982; O'Sullivan, 1992; Culley & Larson, 1987; McNabb & Boersma, 1996) têm mostrado o efeito do manejo e da umidade nas curvas de compressão do solo. Como σ_p depende da umidade do solo (Kassa, 1992; Dias Junior, 1994), as curvas de σ_p versus U refletiram a influência do manejo e da umidade na capacidade de suporte de carga do solo. Assim, as pressões aplicadas aos solos maiores do que σ_p para determinada umidade conduzirão à compactação adicional do solo (Figuras 1 a 3). Baseado neste aspecto, sugere-se que σ_p seja considerado como um indicador quantitativo da sustentabilidade estrutural dos solos. Assim as figuras 1 a 3 representam os modelos de compressibilidade do solo baseados na pressão de preconsolidação e na umidade, conforme proposto por Dias Junior (1994).

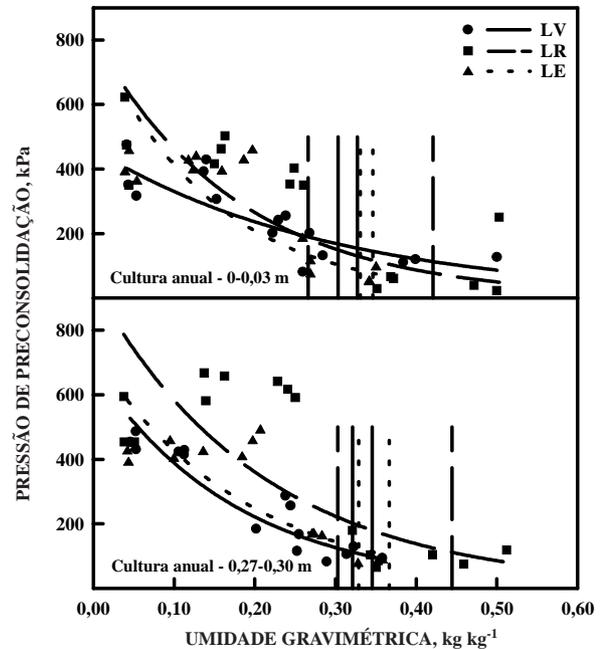


Figura 1. Modelos baseados na história de tensão para o LV, LR e LE sob cultura anual, nas profundidades de 0-0,03 e 0,27-0,30 m (pares de mesmo tipo de linha vertical indicam os limites de contração e plasticidade, à esquerda e direita, respectivamente).

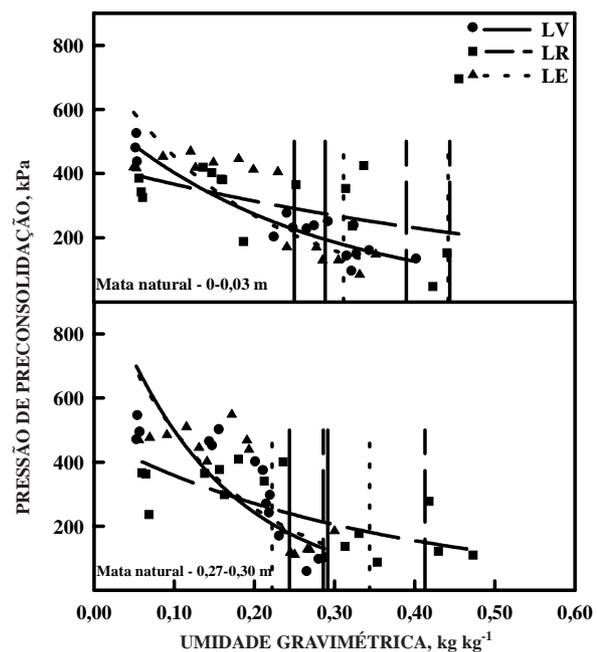


Figura 2. Modelos baseados na história de tensão para o LV, LR e LE sob mata natural, nas profundidades de 0-0,03 e 0,27-0,30 m (pares de mesmo tipo de linha vertical indicam os limites de contração e plasticidade, à esquerda e direita, respectivamente).

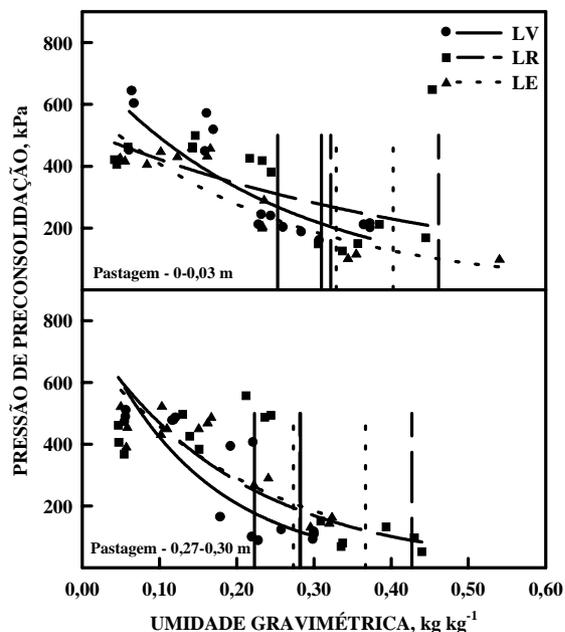


Figura 3. Modelos baseados na história de tensão para o LV, LR e LE sob pastagem, nas profundidades de 0-0,03 m e 0,27-0,30 m (pares de mesmo tipo de linha vertical indicam os limites de contração e plasticidade, à esquerda e direita, respectivamente).

O Latossolo Roxo sob cultura anual revelou maior capacidade de suporte de carga para níveis de umidade inferiores a $0,27 \text{ kg kg}^{-1}$ na profundidade de 0-0,03 m, indicando maior resistência ao tráfego de máquinas em comparação ao LE e LV. Para valores

de umidade superiores a $0,27 \text{ kg kg}^{-1}$, os três solos apresentaram comportamento semelhante em relação à capacidade de suporte de carga (Figura 1). Para a profundidade de 0,27-0,30 m, o LV e o LE mostraram comportamento semelhante, indicando uma resistência à compactação também semelhante, devido possivelmente, à similaridade de suas histórias de tensão e teores de argila e areia (Quadro 1). O LR nesta profundidade apresentou maior capacidade de suporte de carga do que os outros dois solos, sendo, conseqüentemente, mais resistente à compactação.

Para a condição de mata natural (Figura 2), o LV e o LE apresentaram comportamento semelhante para ambas as profundidades, com maior capacidade de suporte de carga do que o LR para umidades em torno de $0,16 \text{ kg kg}^{-1}$. Tal comportamento pode estar associado ao fato de não haver diferença significativa entre os seus teores de argila e areia (Quadro 1). Para valores de umidade maiores que este, o LR apresentou maior capacidade de suporte de carga do que os outros dois solos.

Na condição de pastagem (Figura 3), observou-se que, na profundidade de 0-0,03 m para umidades inferiores a $0,18 \text{ kg kg}^{-1}$, o LV mostrou maior capacidade de suporte de carga do que o LR e o LE. Entretanto, para umidades superiores a esta, o LR foi mais resistente à compactação do que os outros dois. Dentre os três solos estudados, o LE foi o mais suscetível à compactação pelo pisoteio do animal na profundidade de 0-0,03 m.

A maior capacidade de suporte de carga do LR pode estar associada ao seu maior teor de argila e menor teor de areia (Quadro 1). Esses resultados concordam com os de Dias Junior (1994).

Quadro 2. Comparação dos coeficientes das equações de regressão na forma ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) para os três Latossolos sob diferentes usos (n = 15)

Condição	0-0,03 m			0,27-0,30 m		
	a	b	R ²	a	b	R ²
Latossolo Vermelho-Amarelo						
Cultura anual	2,66	-1,45	0,67**	2,83	-2,44	0,85**
Mata natural	2,77	-1,68	0,79**	3,01	-3,12	0,66**
Pastagem	2,87	-1,73	0,75**	2,93	-3,09	0,71**
Latossolo Roxo						
Cultura anual	2,91	-2,43	0,60**	2,97	-2,09	0,65**
Mata natural	2,63	-0,67	0,12 ^{ns}	2,68	-1,22	0,53**
Pastagem	2,71	-0,88	0,28*	2,89	-2,22	0,67**
Latossolo Vermelho-Escuro						
Cultura anual	2,91	-2,97	0,75**	2,87	-2,36	0,75**
Mata natural	2,88	-2,27	0,73**	2,99	-2,90	0,68**
Pastagem	2,78	-1,69	0,82**	2,86	-1,98	0,80**

*, ** significativos a 5 e 1%. ^{ns} não-significativo.

A faixa de friabilidade (faixa de umidade entre o LP e LC) (Quadro 1) tem sido preconizada pela literatura clássica da Física do Solo (Hillel, 1982) como sendo a faixa de umidade na qual as operações de preparo do solo devem ser realizadas. A faixa de pressões que podem ser aplicadas aos solos sob cultura anual, na zona de friabilidade, variaram de 154-167 kPa, para as umidades 0,33-0,30 kg kg⁻¹, no LV; 77-183 kPa, para as umidades 0,42-0,27 kg kg⁻¹, no LR, e 77-132 kPa, para as umidades 0,35-0,33 kg kg⁻¹, no LE. Este fato mostra que pressões aplicadas aos solos maiores do que estes limites poderão provocar compactação dos solos na faixa de friabilidade pelo fato de ser a capacidade de suporte de carga dos solos excedida.

Considerando o conceito de friabilidade (Hillel, 1982), a umidade na qual se deve iniciar as atividades de preparo do solo para o LV é igual a 0,30 kg kg⁻¹; para o LR, igual a 0,27 kg kg⁻¹, e, para o LE, igual a 0,33 kg kg⁻¹. Entretanto, a amplitude da faixa de umidade para a realização das operações de preparo é variável, sendo igual a 0,03 kg kg⁻¹, para o LV; 0,15 kg kg⁻¹, para o LR, e 0,02 kg kg⁻¹, para o LE. Este fato constitui uma vantagem do LR em relação aos outros dois solos, pois, além de poder ser trabalhado em uma faixa mais ampla de umidade, ainda apresentou maior capacidade de suporte de carga, conforme mostrado anteriormente.

Assim, sugere-se que, na definição da faixa de friabilidade do solo, sejam considerados os níveis de pressões delimitados pela curva de σ_p versus U, para que a compactação adicional não venha a ocorrer na faixa de friabilidade do solo quando do seu uso.

CONCLUSÕES

1. Os modelos obtidos neste estudo foram semelhantes aos sugeridos por Dias Junior (1994) e Dias Junior & Pierce (1996).
2. O Latossolo Roxo foi o solo mais resistente à compactação, principalmente na sua faixa de friabilidade.
3. Os resultados deste estudo evidenciam que a compactação do solo pode ocorrer na zona de friabilidade do solo, caso seja aplicado ao solo pressões maiores do que a sua capacidade de suporte de carga.
4. Sugere-se que a pressão de preconsolidação seja considerada como um indicador quantitativo da sustentabilidade estrutural dos solos.

LITERATURA CITADA

AMIR, I.; RAGHAVAN, G.S.V.; MCKYES, E. & BROUGHTON, R.S. Soil compaction as a function of contact pressure and soil moisture. *Can. Agric. Eng.*, 18:54-57, 1976.

BAILEY, A.C. & JOHNSON, C.E. A soil compaction model for cylindrical stress state. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 32:822-825, 1989.

BAILEY, A.C.; JOHNSON, C.E. & SCHAFER, R.L. Hydrostatic compaction of agricultural soils. *Trans. ASAE*, 27:952-995, 1984.

BAILEY, A.C.; JOHNSON, C.E. & SCHAFER, R.L. A model for agricultural soil compaction. *J. Agric. Eng. Res.*, 33:257-262, 1986.

BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I. & VANDEN BERG, G.E. *Compaction of agricultural soils*. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1971. 471p. (Monogr.)

BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Parte 1. 2.ed. Madison, ASA/SSSA, 1986. p.363-375. (Agron. Monogr. 9)

BOUSSINESQ, J. *Application des potential à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Paris, Gauthier-Villais, 1985. 30p.

BOWLES, J.A. *Engineering properties of soils and their measurements*. 3.ed. New York, McGraw-Hill, 1986. 218p.

BURT, E.C.; WOOD, R.K. & BAILEY, A.C. Effects of dynamics load on normal soil-tire interface stresses. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 32:1843-1846, 1989.

CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: *CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, Cambridge, 1936. *Proceedings*. Cambridge, ICSMFE, 1936, p.60-64.

COLLEMAN, G.E. & PERUMPRAL, J.V. The finite element analysis of soil compaction. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 17:856-860, 1974.

CULLEY, J.L.B. & LARSON, W.E. Susceptibility to compression of a clay loam Haplaquoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:562-567, 1987.

DEXTER, A.R. & TANNER, D.W. Time dependence of compressibility for remolded and undisturbed soils. *J. Soil Sci.*, 25:153-164, 1973.

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. & PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technol.*, 8:139-151, 1995.

DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:175-182, 1996.

DUNCAN, J.M. & CHANG, C.Y. Nonlinear analysis of stresses and strain in soil. *J. Soil Mech. Found. Div., Proc. Am. Soc. Civil Eng.*, 96:1629-1653, 1970.

FRÖHLICH, O.K. *Druckverteilung im baugrunde*. Wien, Springer, 1934. 179p.

GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle size analysis. KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Parte 1. 2.ed. Madison, ASA/SSSA, 1986. p.383-411.

GILL, W.R. & vanden BERG, G.E. *Soil dynamic in tillage and traction*. Washington, USDA-ARS, 1968. p.355-362. (Agric. Handbook, 316)

- GRISSE, R.D.; JOHNSON, C.E. & BAILEY, A.C. Soil compaction by continuous deviatoric stress. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 30:1293-1301, 1987.
- GUPTA, S.C. & ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.*, 6:65-100, 1987.
- GUPTA, S.C. & LARSON, W.E. Modeling soil mechanical behavior during tillage. In: UNGER, P.W.; VAN DOREN Jr., D.M.; WHISLER, F.D. & SKIDMORE, E.L. (eds.). *Predicting tillage effects on soil physical properties and process*. Madison, American Society of Agronomy, 1982. p.151-178. (Spec. Pub., 44).
- GUPTA, S.C. & RAPER, R.L. Prediction of soil compaction under vehicles. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.71-90.
- GUPTA, S.C.; HADAS, A. & SCHAFER, R.L. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B. & GUPTA, S.C., eds. *Mechanics and related process in structured agricultural soils*. Dordrecht, Kluwer Academic, 1989. p.137-152.
- GUPTA, S.C.; HADAS, A.; VOORHEES, W.B.; WOLF, D.; LARSON, W.E. & SCHNEIDER, E.C. Development of quids for estimating the ease of compaction of world soils. Bet Dagan, Israel, Research Report, Binational Agric. Res. Development, University of Minnesota, 1985. 178p.
- HILLEL, D. *Introduction to soil physics*. San Diego, Academic Press, 1982. 365p.
- HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. *An introduction to geotechnical engineering*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1981. 733p.
- HORN, R. Compressibility of arable land. *Catena Sup.*, 11:53-71, 1988.
- KASSA, Z. Pore water pressure and some associated mechanical responses to uniaxial stress in structured agricultural soils. St. Paul, University of Minnesota, 1992. 80p. (Tese de Mestrado)
- KOOLEN, A.J. & KUIPERS, H. *Agricultural soil mechanics*. New York, Springer, 1983. 241p.
- LARSON, W.E. & GUPTA, S.C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:1127-1132, 1980.
- LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B. & GUPTA, S.C. *Mechanics and related processes in structured agricultural soils*. Dordrecht, Kluwer Academic, 1989. 273p. (Nato Applied Science, 172)
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. & USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soils orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:450-457, 1980.
- LEBERT, M. & HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage. Res.*, 19:274-286, 1991.
- LEONARDS, G.A. *Foundation engineering*. New York, McGraw-Hill, 1962. 1136p
- McNABB, D.H. & BOERSMA, L. Evaluation of the relationship between compressibility and shear strength of Andisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:923-929, 1993.
- McNABB, D.H. & BOERSMA, L. Nonlinear model for compressibility of partly saturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:333-341, 1996.
- O'SULLIVAN, M.F. Uniaxial compaction effects on soil physical properties in relation to soil type, and cultivation. *Soil Tillage Res.*, 24:257-269, 1992.
- PERUMPRAL, J.V.; LIJEDAHL, J.B. & PERLOFF, W.H. The finite element method for predicting stress distribution and soil deformation under a tractor tire. St. Joseph, American Society Agruculture Engineering. 1969. (ASAE paper, 69-680)
- PERUMPRAL, J.V.; LIJEDAHL, J.B. & PERLOFF, W.H. The finite element method for predicting stress distribution and soil deformation under a tractive device. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 14:1184-1188, 1971.
- POLLOCK Jr., D.; PERUMPRAL, J.V. & KUPPUSAMY, T. Finite element analysis of multipass effects of vehicles on soil compaction. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 29:45-50, 1986.
- RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agronômico, 1983. (Boletim Técnico, 81)
- RAPER, R.L. & ERBACH, D.C. Prediction of soil stresses using the finite element method. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 33:725-730, 1990a.
- RAPER, R.L. & ERBACH, D.C. Effect of variable linear elastic parameters on finite element prediction of compaction. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 33:731-736, 1990b.
- RÖMKENS, M.J.M. & MILLER, R.D. Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data - A mathematical model. *Plant Soil*, 35:337-248, 1971.
- SHAFER, R.L.; BAILEY, A.C.; JOHNSON, C.E. & RAPER, R.L. A rationale for modeling soil compaction behavior: An engineering mechanics approach. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 34:1609-1617, 1991.
- SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A. & LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. *Soil Tillage Res.*, 41:53-73, 1997.
- SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. 660p.
- SOEHNE, W.H. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractors tires. *J. Agric. Eng.*, Pannagar, p.276-291, 1958.
- SOWERS, G.F. Consistency. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, ASA, 1965. p.391-399.
- STONE, J.A. & LARSON, W.E. Rebound of five one-dimensionally compressed unsaturated granular soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:819-822, 1980.
- TRABBIC, G.W.; LASK, K.V. & BUCHELE, W.F. Measurement of soil-tire interfase pressures. *Agric. Eng.*, 40:678-681, 1959
- Vanden AKKER, J.J.H. & van WIJK, A.L.M. A model to predict subsoil compaction due to field traffic. In: MONNIER, G. & GOSS, M.J. eds. *Soil structure and regeneration*. Rotterdam, 1987. p.69-84.
- VEENHOF, D.W. & McBRIDE, R.A. Overconsolidation in agricultural soils: I. Compression and consolidation behavior of remolded and structured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:362-373, 1996.