

# SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

## COMPRESSIBILIDADE DE UM LATOSSOLO VERMELHO ARGILOSO DE ACORDO COM A TENSÃO DE ÁGUA NO SOLO, USO E MANEJO<sup>(1)</sup>

G. C. OLIVEIRA<sup>(2)</sup>, M. S. DIAS JUNIOR<sup>(3)</sup>, N. CURTI<sup>(3)</sup> & D. V. S. RESCK<sup>(4)</sup>

### RESUMO

Uma das principais conseqüências do manejo inadequado do solo é a sua compactação, que leva à perda da sustentabilidade agrícola. O objetivo deste trabalho foi o de estudar o comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho argiloso, sob quatro tensões de água no solo, sob cerrado, sob plantio direto e cultivo convencional, utilizando-se o arado de discos, após duas décadas de uso. Amostras não deformadas foram utilizadas na caracterização da porosidade do solo e nos ensaios de compressão uniaxial. As pressões de preconsolidação e os índices de compressão foram obtidos das curvas de compressão do solo. A densidade do solo foi também avaliada. Amostras deformadas foram utilizadas nas análises físicas e químicas do solo. As tensões de água no solo dentro da faixa compreendida entre capacidade de campo e ponto de murcha permanente e os sistemas de uso e manejo influíram na intensidade de deformação do solo, sendo os valores mais elevados na capacidade de campo do solo (6 kPa) e no cerrado. Os valores de pressões que podem reduzir a porosidade do solo a níveis críticos ao crescimento de plantas variaram em todos os sistemas de manejo, mas apresentaram os menores valores para as condições mais úmidas, sendo função também da porosidade inicial do solo. Independentemente do sistema de manejo, tensão de água e profundidade do solo, os valores percentuais da redução do volume total de poros nas pressões que não provocam compactação adicional do solo (pressão de preconsolidação) foram praticamente constantes e, em geral, abaixo de 10 %.

**Termos de indexação:** pressão de preconsolidação, índice de compressão, sistemas de manejo, compactação do solo.

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Projeto parcialmente financiado pelo CNPq. Recebido para publicação em abril de 2002 e aprovado em maio de 2003.

<sup>(2)</sup> Professor do Setor de Solos da Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás – UFG. Caixa Postal 131, CEP 74001-970 Goiânia (GO). Bolsista da CAPES. E-mail: gcesar@agro.ufg.br

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista do CNPq. E-mails: msouzadj@ufla.br; niltcuri@ufla.br

<sup>(4)</sup> Pesquisador da Embrapa, Centro de Pesquisa Agropecuária dos cerrados – CPAC. Caixa Postal 08223, CEP 73301-970 Planaltina (DF). Bolsista do CNPq. E-mail: dvsresck@cpac.embrapa.br

**SUMMARY:** *COMPRESSIBILITY OF A CLAYEY RED LATOSOL AS A FUNCTION OF WATER TENSION, USE AND MANAGEMENT OF THE SOIL*

*Soil compaction is one of the main consequences of inadequate soil management and can lead to a loss of the agricultural sustainability. The compressive behavior of a clayey Red Latosol (Oxisol) under four water tensions and under native vegetation, no-till, and conventional till with a disk plow for two decades was studied. Undisturbed soil samples were used to characterize the soil porosity and for uniaxial compression tests. Preconsolidation pressures and compression indexes were obtained from the soil compression curves, and the soil bulk density evaluated. Disturbed soil samples were used for physical and chemical characterization analyses. The soil water tensions of the range between the field capacity and the permanent wilting point, as well as the soil management systems affected the intensity of soil deformation. Highest values were observed for the field capacity (-6 kPa) and the native vegetation. The pressure values that could reduce the soil porosity to critical levels for the plant development, and which are also a function of the initial soil porosity, varied in all soil management systems. Lowest values were observed under wet conditions. Independent of the soil management system, water tension, and soil depth, the percentage of volume reduction in the total soil porosity at the pressures that do not cause additional soil compaction (preconsolidation pressure), were practically constant and, in general, below 10 %.*

*Index terms: preconsolidation pressures; compression indexes; management systems; soil compaction.*

## INTRODUÇÃO

Estima-se que cerca de 68 milhões de hectares das terras agrícolas do planeta estão em processo de degradação, ocasionado pela compactação (Flowers & Lal, 1998). Tal fato está relacionado com o intenso tráfego de máquinas, principalmente em condições inadequadas de umidade (Dias Junior & Pierce, 1996; Etana et al., 1997; Flowers & Lal, 1998; Imhoff et al., 2001).

No Brasil, apesar da inexistência de levantamentos quantitativos de áreas agrícolas degradadas, um grande número de trabalhos científicos relacionados com o problema tem manifestado constante preocupação sobre este tema (Assouline et al., 1997; Kondo & Dias Junior, 1999; Silva et al., 2000; Silva & Rosolem, 2001; Imhoff et al., 2001; Beutler et al., 2001).

A compactação do solo depende, dentre outros fatores, do conteúdo de água, da pressão aplicada e do tipo de manejo do solo (Holtz & Kovacs, 1981) e tem sido avaliada por métodos que usam estes fatores (Holtz & Kovacs, 1981; Soane & Ouwerkerk, 1994; Camargo & Alleoni, 1997; Costa & Abrão, 1996). Atualmente, no Brasil, há uma tendência de avaliar a susceptibilidade do solo conjuntamente com a compactação e com o momento ideal para executar as operações mecanizadas no campo, por considerar racional o uso de medidas preditivas e preventivas da compactação, o que minimizaria os problemas de degradação dos solos agrícolas (Kondo & Dias Junior, 1999; Silva et al., 2000).

Para avaliar a susceptibilidade à compactação e o momento adequado para executar as operações mecanizadas no campo, propriedades físico-mecânicas do solo têm sido utilizadas (Lebert & Horn, 1991; Kondo & Dias Junior, 1999). Algumas destas propriedades relativas ao comportamento compressivo do solo são obtidas da curva de compressão, representada graficamente pela relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou índice de vazios (Holtz & Kovacs, 1981); como exemplos dessas propriedades, citam-se o índice de compressão e a pressão de preconsolidação (Dias Junior, 1994; Dias Junior & Pierce, 1996; Kondo & Dias Junior, 1999; Silva et al., 2000; Silva et al., 2001).

Apesar de as propriedades mecânicas permitirem uma estimativa da capacidade de suporte de carga dos solos, no Brasil, poucos são os trabalhos que quantificam os níveis de pressões que podem ser aplicados para evitar a compactação do solo (Kondo & Dias Junior, 1999; Silva et al., 2001).

Considerando tais aspectos, é importante, no processo preventivo da degradação das áreas agrícolas, caracterizar o processo de compressão do solo pelo índice de compressão e pela pressão de preconsolidação de acordo com o manejo e conteúdo de água no solo. Além disso, na curva de compressão, é possível determinar a densidade do solo de acordo com a pressão aplicada (Holtz & Kovacs, 1981) e o volume total de poros correspondente (EMBRAPA, 1997), permitindo inferir os níveis de pressões que podem reduzir a macroporosidade a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ,

consideradas críticas ao crescimento radicular (Vomocil & Flocker, 1966).

O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho argiloso da região do cerrado, quando submetido a diferentes sistemas de uso ou manejo e diferentes tensões de água no solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionadas duas parcelas experimentais de 50 x 25 m de um Latossolo Vermelho distrófico típico textura argilosa (EMBRAPA, 1999) da Embrapa - Centro de Pesquisa Agropecuária dos cerrados, Planaltina (DF) (latitude 15 ° 36 ' S; longitude 47 ° 42 ' W e altitude de 1.014 m). As parcelas experimentais foram, durante 20 anos, manejadas com arado de discos ou mantidas em plantio direto. Uma área sob vegetação natural de cerrado foi selecionada como referência. Em 1979, antes da instalação deste experimento, a área foi dividida em duas faixas iguais, sendo uma trabalhada com arado de discos e outra trabalhada com arado de aivecas, quando da incorporação de calcário e fertilizantes corretivos que continham fósforo e potássio.

No segundo ano agrícola (1980/1981), cada faixa foi dividida em quatro parcelas de 50m x 25m, recebendo cada uma os seguintes tratamentos de manejo: plantio direto (PD) (1), aração com

incorporação dos restos culturais após colheita da cultura principal (ADPC) (abril/maio) (2), aração com incorporação dos restos culturais na época que antecede o plantio da cultura principal (ADPP) (setembro/outubro) (3) e escarificação (4). Apenas os tratamentos 1 e 2, na faixa com arado de discos, foram selecionados para este trabalho.

O uso e a rotação de culturas que vêm sendo implementados nessas parcelas manejadas com arado de discos e plantio direto desde 1979 são apresentados no quadro 1.

No mês de fevereiro de 1999, por ocasião do florescimento da soja e, em outubro do mesmo ano, após preparo do solo com arado, no tratamento com preparo convencional, foram feitas amostragens em três pontos de uma linha diagonal, distantes 21 m entre si, com os pontos extremos a 6 m da borda limítrofe da parcela, constituindo-se nas três repetições. Foram coletadas, nas profundidades de 0-5 cm e 20-30 cm, 12 amostras não deformadas em cada época, em anéis com 63 mm de diâmetro e 25 mm de altura para análises físico-mecânicas.

Foram coletadas 24 subamostras deformadas com vistas em formar 12 amostras compostas, para caracterização dos óxidos, pelo ataque sulfúrico, textura, pelo método da pipeta (Quadro 2), densidade de partículas (Dp), pelo método do picnômetro e carbono orgânico (EMBRAPA, 1997).

As amostras não deformadas, após saturadas, foram submetidas a uma tensão de 6 kPa em unidade de sucção até atingir o equilíbrio (Grohmann, 1960) e, pelo aparelho de Richards

**Quadro 1. Histórico de uso e rotação de culturas na área experimental da Embrapa cerrados sob Latossolo Vermelho**

Ano	Cultura	Sistema de preparo do solo	
		Tratamento 1	Tratamento 2
1979/80	Arroz	Convencional <sup>(1)</sup>	Convencional <sup>(1)</sup>
1980/81	Arroz	Plantio direto	ADPC <sup>(2)</sup>
1981/82	Soja	Plantio direto	ADPC
1982/83	Guandu	Plantio direto	ADPC
1983/86		Pousio	Pousio
1986/87	Soja	Plantio direto	ADPC
1987/88	Soja	ADPC	ADPC
1988/89	Soja e Milho <sup>(3)</sup>	Plantio direto	Plantio direto
1989/90		Pousio	Pousio
1990/91	Milho	Plantio direto	Plantio direto
1991/92	Soja	Plantio direto	Plantio direto
1992/93	Soja e Milho <sup>(3)</sup>	Plantio direto	ADPC
1993/94	Soja e Milho <sup>(3)</sup>	Plantio direto	ADPC
1994/95	Arroz	Plantio direto	ADPC
1995/96	Soja	Plantio direto	ADPC
1996/97	Milho	Plantio direto	ADPC
1997/98	Soja	Plantio direto	ADPC
1998/99	Soja	Plantio direto	ADPC

<sup>(1)</sup> Convencional = discos com duas passagens de grade leve, para incorporação do calcário e fertilizantes corretivos (P e K), apenas no início do experimento. <sup>(2)</sup> ADPC = arado de discos com incorporação dos restos culturais após colheita da cultura principal.

<sup>(3)</sup> Nestes anos, as parcelas foram subdivididas em duas, sendo metade da área cultivada com soja e metade com milho.

(Klute, 1986), para as tensões de 33; 100 e 1.500 kPa, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial (Dias Junior, 1994), usando um consolidômetro da marca Boart Longyear. A aplicação das pressões se fez por meio de ar comprimido. As tensões extremas de 6 a 1.500 kPa foram escolhidas por serem consideradas como de equilíbrio da água na capacidade de campo e ponto de murcha permanente, respectivamente (Santos, 1997).

Salienta-se que o estado de umidade aproximadamente intermediário entre a capacidade de campo e seco ao ar corresponde à zona de friabilidade (Lemos & Santos, 1996), ou seja, condição ótima para o preparo do solo. Foram aplicados, em cada amostra, 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa de pressão, tendo sido a aplicação feita, até que 90 % da deformação máxima fosse alcançada (Holtz & Kovacs, 1981), aplicando-se logo a seguir nova pressão.

As amostras previamente submetidas à tensão de 6 kPa foram utilizadas na determinação da microporosidade (Grohmann, 1960; Oliveira, 1968). O volume total de poros (VTP) foi calculado pela expressão:  $VTP = (1 - D_s/D_p) 100$ , sendo  $D_s$  a densidade do solo e  $D_p$  a densidade de partículas. A macroporosidade foi determinada pela diferença

entre VTP (calculada) e microporosidade (Tormena et al., 1998). A relação entre VTP e macroporosidade foi estudada no Latossolo Vermelho, pela análise conjunta de 36 amostras referentes aos três sistemas de uso e manejo, duas profundidades, duas épocas e três repetições (Figura 1).

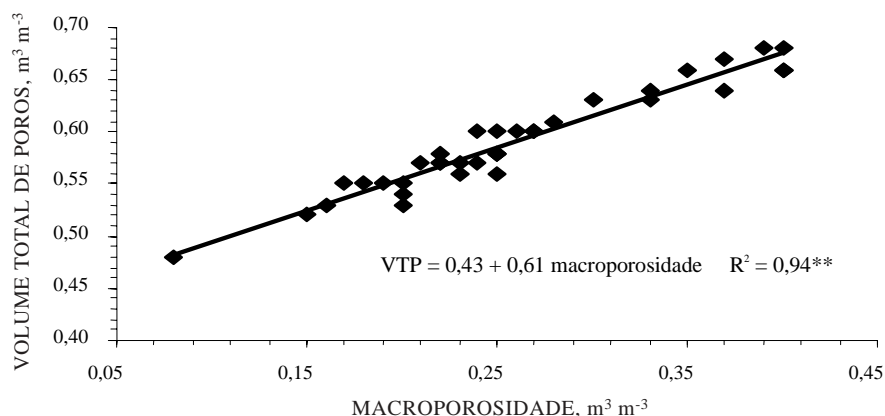
As curvas de compressão do solo foram obtidas, plotando-se a pressão aplicada no eixo das abscissas (escala logarítmica) e a densidade do solo correspondente a cada pressão aplicada, no eixo das ordenadas (escala decimal). Com base nas curvas de compressão, foram obtidos as pressões de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e os índices de compressão ( $m$ ), (Dias Junior & Pierce, 1995).

Usando a curva de compressão, foi estimado o volume total de poros após cada pressão aplicada e, com base na equação constante da figura 1, em cada sistema de manejo, estimaram-se pressões que podem reduzir a macroporosidade a níveis críticos de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Vomocil & Flocker, 1966).

Os resultados de densidade do solo, macroporosidade e índices de compressão foram submetidos à análise de variância, sendo a comparação das médias dos sistemas de manejo obtida pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

**Quadro 2. Caracterização química e física nas profundidades de 0-5 e 20-30 cm do Latossolo Vermelho**

Profundidade	Ataque sulfúrico			Granulometria				Ki (SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	
cm	g kg <sup>-1</sup>							
0-5	170	230	86	530	131	210	129	1,3
20-30	188	248	85	530	120	220	130	1,3



**Figura 1. Relação entre volume total de poros e macroporosidade no Latossolo Vermelho argiloso, nos três sistemas de uso ou manejo, duas profundidades e duas épocas (n = 36). VTP = volume total de poros.**

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O manejo alterou a estrutura do Latossolo Vermelho argiloso pela mecanização agrícola, evidenciado pelas alterações significativas na densidade do solo e na macroporosidade, nas duas profundidades (Quadro 3).

Uma das conseqüências relativa às alterações observadas (Quadro 3) é o maior conteúdo de água retido na menor tensão estudada (6 kPa), observado no solo sob plantio direto e sistema convencional (Quadro 4), o que, por outro lado, deve afetar o seu comportamento compressivo (Smith et al., 1997).

As curvas de compressão do solo (Figura 2) foram normalizadas para eliminar a influência da densidade do solo inicial ( $D_{si}$ ), na posição da curva de compressão (Dias Junior, 1994; Kondo & Dias Junior, 1999), evidenciando o efeito das tensões de água na forma da curva de compressão (Dias Junior, 1994). Independentemente do uso ou manejo a que foi submetido o solo, as várias tensões de água influenciaram o seu comportamento compressivo, concordando com Larson & Gupta (1980) e Smith et al. (1997).

Na curva de compressão secundária (intervalo da curva à esquerda da pressão de preconsolidação,  $\sigma_p$ ), observa-se que a variação da densidade do solo foi pequena (Figura 2). Nesta região, ocorreram deformações elásticas e recuperáveis sem causar alterações permanentes na estrutura do solo (compactação adicional) em conseqüência de aplicações de pressões inferiores ou iguais àquelas já aplicadas no passado (pressão de preconsolidação,  $\sigma_p$ ) refletindo a história do manejo do solo (Lebert & Horn, 1991; Dias Junior & Pierce, 1996; Imhoff et al., 2001).

**Quadro 4. Retenção de água do Latossolo Vermelho em duas profundidades, sob diferentes sistemas de uso ou manejo**

Sistema	Tensão de água (kPa)			
	6	33	100	1.500
————— $m^3 m^{-3}$ —————				
Profundidade, 0-5 cm				
Cerrado	0,30 B	0,25 A	0,23 A	0,17 B
Direto	0,35 A	0,27 A	0,23 A	0,20 A
ADPC	0,33 A	0,28 A	0,25 A	0,21 A
Profundidade, 20-30 cm				
Cerrado	0,30 B	0,25 A	0,23 A	0,21 A
Direto	0,35 A	0,28 A	0,25 A	0,20 A
ADPC	0,34 A	0,27 A	0,25 A	0,20 A

Dentro de cada profundidade, as médias, nas colunas, com a mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,5$ ).

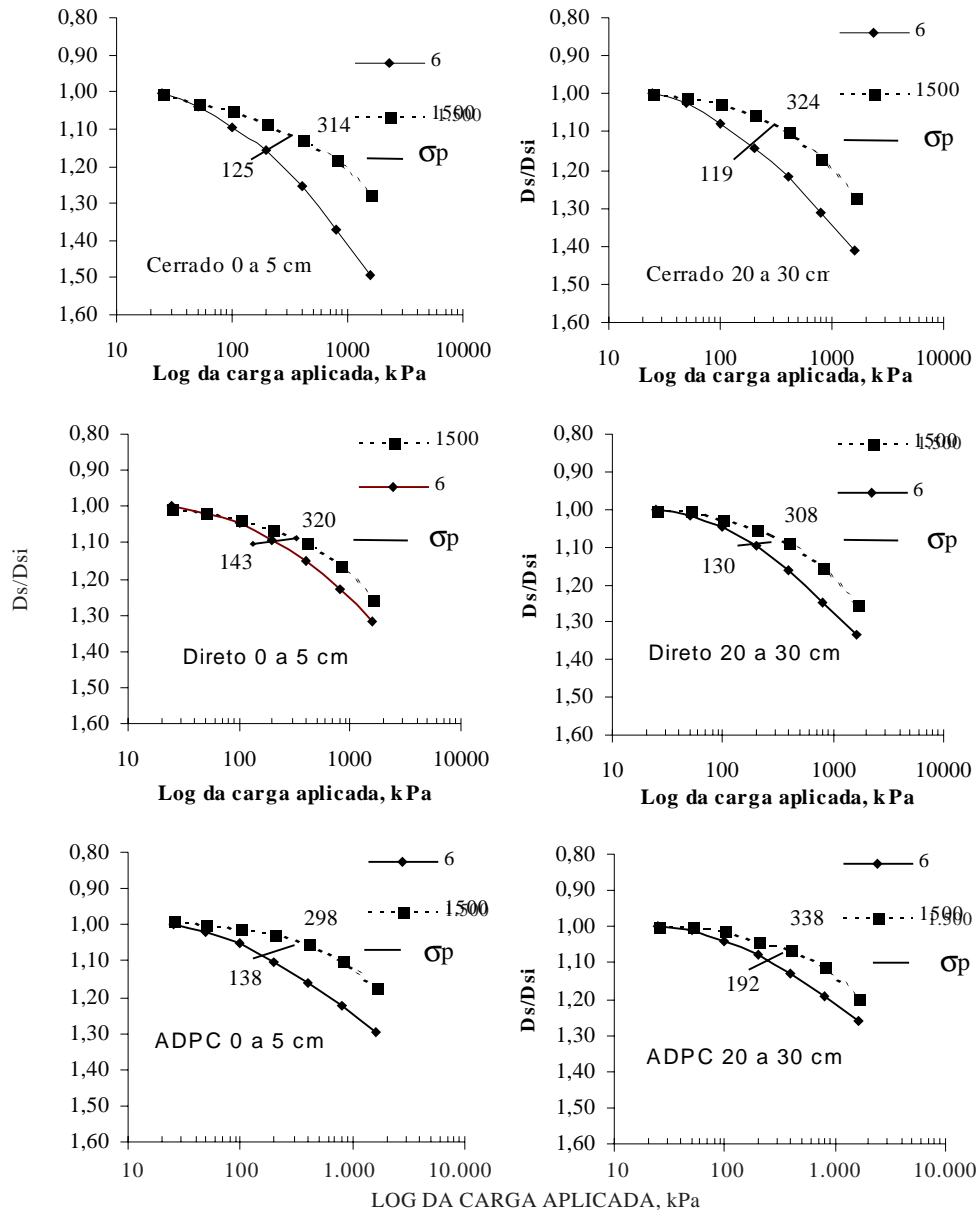
Com a aplicação de pressões maiores do que a pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), observa-se que alterações significativas ocorreram na estrutura do solo, evidenciadas pelas mudanças significativas dos valores de densidade do solo (Figura 2). Este fato pode ser explicado pelo aumento do número de contatos entre cada agregado com o aumento da pressão aplicada, até que os agregados se rompem e o solo adquire uma estrutura massiva (Larson & Gupta, 1980).

Comparando as curvas de compressão normalizadas, para o Latossolo Vermelho sob os vários sistemas de uso ou manejo (Figura 2),

**Quadro 3. Propriedades físicas e carbono orgânico do Latossolo Vermelho, em duas profundidades e três sistemas de uso ou manejo**

Sistema	$D_s^{(1)}$	$D_p^{(1)}$	$VTP^{(1)}$	Macroporosidade	Carbono orgânico
	————— $kg dm^{-3}$ —————		————— $m^3 m^{-3}$ —————		$g kg^{-1}$
Profundidade, 0-5 cm					
Cerrado	0,90 B	2,63 B	0,64 A	0,34 A	34 A
Direto	1,10 A	2,63 B	0,58 B	0,23 B	30 A
ADPC	1,14 A	2,72 A	0,56 B	0,23 B	20 B
Profundidade, 20-30 cm					
Cerrado	1,02 C	2,67 A	0,65 B	0,35 B	17 A
Direto	1,14 B	2,65 A	0,58 B	0,23 B	19 A
ADPC	1,22 A	2,65 A	0,53 C	0,19 C	17 A

<sup>(1)</sup>  $D_s$  = densidade do solo;  $D_p$  = densidade de partículas;  $VTP$  = volume total de poros. Média de seis repetições. Dentro de cada profundidade, as médias, nas colunas, com a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott ( $p \leq 0,05$ ).



**Figura 2. Curvas de compressão normalizadas das profundidades de 0-5 cm e 20-30 cm de um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de uso ou manejo e tensões de água no solo de 6 a 1.500 kPa.  $\sigma_p$ : Pressão de preconsolidação.  $D_s$  - densidade do solo após a aplicação de carga;  $D_{si}$  - densidade inicial do solo; ADPC - Aração com incorporação dos restos culturais após a colheita da cultura principal.**

observa-se que, à medida que a tensão de água no solo vai aumentando (solo mais seco) e as pressões aplicadas vão aumentando, ocorreu um deslocamento das curvas de compressão para cima. Este é mais nítido para o solo sob cerrado, sob a tensão de água de 1.500 kPa e na profundidade de 0-5 cm. Assim, as deformações verificadas na reta de compressão virgem foram menores nesta tensão de água, fato este explicado pelo menor valor de água volumétrica sob a tensão 1.500 kPa (Quadro 4).

Por outro lado, para o sistema convencional (ADPC), na profundidade de 20-30 cm, notou-se que o deslocamento entre as curvas de compressão entre

6 e 1.500 kPa foi menor do que os deslocamentos encontrados para o solo sob cerrado. Este pode ser um reflexo dos maiores valores de densidade do solo (Quadro 3), já que as forças coesivas e atrito entre partículas atuam, com maior intensidade, em solos que já sofreram alguma alteração na sua estrutura (Michel, 1976), o que estaria sobrepondo ao efeito que a água exerce no comportamento compressivo do solo (Larson & Gupta, 1980; Smith et al., 1997; Kondo & Dias Junior, 1999), na faixa de tensões de água estudadas.

Na curva de compressão (Figura 2), existe uma parte linear denominada reta de compressão virgem (valores de pressão aplicada maiores que a pressão

de preconsolidação), cuja inclinação é chamada de índice de compressão (Larson & Gupta 1980; Lebert & Horn, 1991; Dias Junior & Pierce, 1996; Silva et al., 2001).

Analisando dentro de cada sistema de uso ou manejo (Quadro 5), observa-se que, na profundidade de 0-5 cm, no solo sob cerrado, os índices de compressão não foram diferentes, independentemente da tensão de água no solo (faixa de tensão entre 6 e 1.500 kPa). Segundo esses resultados, a variação da densidade do solo (Ds) foi a mesma para qualquer tensão de água no solo na reta de compressão virgem do solo. Entretanto, os valores da Ds final serão maiores à medida que aumenta o conteúdo de água no solo (menores tensões de água) (Figura 2). Para o solo sob plantio direto e sistema convencional (ADPC), na profundidade de 0-5 cm, foram encontradas diferenças significativas nos índices de compressão apenas na tensão de 6 kPa (Quadro 5).

Analisando os índices de compressão do solo entre os diferentes sistemas (Quadro 5), verifica-se, nas duas profundidades, que o solo sob cerrado apresentou o maior valor de "m" quando sob a tensão de 6 kPa. Este resultado revela uma tendência à maior deformação do solo sob cerrado para conteúdo de água mais elevado, o que está relacionado com sua menor densidade do solo e com o maior espaço poroso disponível à deformação. Kondo & Dias Junior (1999) também obtiveram, para um Latossolo Roxo, valores de índice de compressão na mata natural superiores àqueles encontrados para o solo sob cultivo.

Na profundidade de 0-5 cm, com o solo mais seco (tensões maiores), observou-se uma igualdade nos índices de compressão sob os diferentes sistemas.

**Quadro 5. Índices de compressão médios do Latossolo Vermelho, em duas profundidades, sob três sistemas de uso ou manejo e quatro tensões de água**

Manejo	Tensão de água (kPa)			
	6	33	100	1.500
Profundidade, 0-5 cm				
Cerrado	0,36 aA	0,40 aA	0,44 aA	0,41 aA
Direto	0,32 bB	0,40 aA	0,43 aA	0,43 aA
ADPC	0,32 bB	0,41 aA	0,46 aA	0,44 aA
Profundidade, 20-30 cm				
Cerrado	0,35 cA	0,42 bA	0,44 bA	0,50 aA
Direto	0,33 bB	0,37 bB	0,43 aA	0,45 aB
ADPC	0,32 bB	0,34 bC	0,42 aA	0,40 aC

Dentro de cada profundidade, as médias, nas colunas, com a mesma letra maiúscula e, nas linhas, com a mesma letra minúsculas não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott ( $p \leq 5\%$ ).

Apesar do maior espaço poroso disponível à deformação no solo sob cerrado, em relação aos sistemas: plantio direto e convencional (ADPC), sua deformação é evitada graças à maior resistência à deformação de seus agregados. Isto é explicado, dentre outros fatores, pelo maior teor de carbono orgânico (Horn et al., 1994; Etana et al., 1997; Silva et al., 2000) (Quadro 3), pelo menor conteúdo de água (Quadro 4 e Figura 2) e, provavelmente, pelo maior número de raízes presentes neste sistema.

Na profundidade de 20-30 cm, os menores valores de índice de compressão foram observados para o solo sob sistema convencional e plantio direto para tensões de água de 6, 33 e 1.500 kPa, graças à maior densidade do solo e menor macroporosidade (Quadro 3) aumentando a sua resistência mecânica e dificultando a sua deformação. Estes resultados concordam com observações de Carpenedo (1994) e Silva et al. (2000).

Para o crescimento e o desenvolvimento satisfatórios das plantas, sugere-se uma macroporosidade mínima de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Vomocil & Flocker, 1966). Assim, utilizando a equação de regressão (Figura 1), estimou-se o volume total de poros correspondente à macroporosidade. Além disso, a exemplo de Lebert & Horn (1991), pela curva de compressão, foram estimados os níveis de pressões necessários para que, em cada sistema de uso e manejo, ocorresse redução da porosidade do solo em níveis considerados críticos para o desenvolvimento da maioria das culturas (Quadro 6).

Independentemente do sistema de uso ou manejo, tensão de água e profundidade do solo, os valores percentuais da redução do volume total de poros nas pressões de preconsolidação foram praticamente constantes e, em geral, abaixo de 10%. Este valor foi uma quantificação das deformações pequenas e recuperáveis verificadas na curva de compressão secundária, conforme preconizado na literatura (Lebert & Horn, 1991; Dias Junior & Pierce, 1996).

No quadro 6, observa-se que os valores das pressões ( $\sigma_f$ ) que podem reduzir a macroporosidade a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , o que corresponde a uma porosidade total de  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 1), variaram em todos os sistemas de uso e manejo. Contudo, apresentaram menores valores para as condições mais úmidas do solo, sendo função também da porosidade inicial do solo.

O parágrafo anterior traz um alerta sobre os efeitos que operações realizadas em condições inadequadas de umidade podem causar ao solo. Por outro lado, estando o solo com sua estrutura alterada de forma negativa, uma menor pressão será suficiente para torná-lo inadequado, em termos de macroporosidade, para o bom crescimento e desenvolvimento de plantas, quando comparado com o mesmo solo em condições naturais e com o mesmo teor de umidade.

**Quadro 6. Porosidade predita do Latossolo Vermelho, em duas profundidades, sob três sistemas de uso ou manejo e quatro tensões de água, quando da aplicação de diferentes pressões**

Sistema	$\psi_m$	VTPi	$\sigma_p$	VTP $\sigma_p$	Redução	$\sigma_f$	VTPf	Redução
	kPa	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	kPa	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	%	kPa	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	%
Profundidade, 0-5 cm								
Cerrado	6	0,65	125	0,60	7,7	800	0,50	23,0
	33	0,65	182	0,59	9,3	800	0,50	23,0
	100	0,67	212	0,60	10,2	1.120	0,50	25,0
	1.500	0,65	314	0,59	9,1	1.600	0,50	23,0
Direto	6	0,59	143	0,54	8,2	400	0,50	15,0
	33	0,57	213	0,52	9,1	300	0,50	12,0
	100	0,60	238	0,54	9,6	563	0,50	17,0
	1.500	0,56	320	0,52	8,0	465	0,50	11,0
ADPC	6	0,56	138	0,51	9,7	200	0,50	11,0
	33	0,59	179	0,54	8,5	350	0,50	15,0
	100	0,56	243	0,50	10,4	243	0,50	10,4
	1.500	0,59	298	0,53	9,9	700	0,50	15,0
Profundidade, 20-30 cm								
Cerrado	6	0,63	119	0,57	9,5	500	0,50	20,6
	33	0,61	202	0,54	11,5	400	0,50	18,0
	100	0,63	253	0,57	9,5	800	0,50	20,6
	1.500	0,61	324	0,56	8,2	931	0,50	18,0
Direto	6	0,57	130	0,52	8,8	200	0,50	12,3
	33	0,57	156	0,52	8,6	267	0,50	12,3
	100	0,55	234	0,50	9,1	234	0,50	9,1
	1.500	0,58	308	0,52	10,3	500	0,50	13,8
ADPC	6	0,52	192	0,48	7,7	133	0,50	3,9
	33	0,54	229	0,50	7,4	229	0,50	7,4
	100	0,54	285	0,50	7,4	285	0,50	7,4
	1.500	0,54	338	0,50	7,4	338	0,50	7,4

$\psi_m$  = tensão de água no solo; VTPi= volume total de poros inicial;  $\sigma_p$ = pressão de preconsolidação; VTP $\sigma_p$ = volume total de poros na pressão de preconsolidação;  $\sigma_f$ = pressão a ser aplicada para se atingir níveis considerados críticos de porosidade no solo; VTPf= volume total de poros considerado crítico ao crescimento e desenvolvimento das culturas.

## CONCLUSÕES

1. As tensões de água e os sistemas de uso ou manejo influíram nas deformações do solo, as quais se mostraram mais elevadas nas tensões mais baixas e na condição de solo mais poroso, evidenciando a necessidade de um controle rigoroso da umidade do solo na tomada de decisão da entrada de máquinas em áreas agrícolas.

2. Os valores de pressões que podem reduzir a porosidade do solo a níveis críticos ao crescimento e desenvolvimento de plantas variaram em todos os sistemas de manejo, apresentando os menores valores para as condições mais úmidas, sendo função também da porosidade inicial do solo.

3. Independentemente do sistema de uso ou manejo, tensão de água e profundidade do solo, os valores percentuais da redução do volume total de poros

nas pressões de preconsolidação foram, em geral, menores que 10 %, demonstrando a importância da utilização desta propriedade para o manejo racional baseado na predição do comportamento compressivo do solo.

## LITERATURA CITADA

- ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J. & TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:390-398, 1997.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; PEREIRA FILHO, I.A. & CRUZ, J.C. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos cerrados no estado de Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:129-136, 2001.



- CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas. Piracicaba, Escola Superior "Luiz de Queiroz", 1997. 132p.
- CARPENEDO, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 106p. (Tese de Doutorado)
- COSTA, L.M. & ABRAHÃO, W.A.P. Compactação e adensamento de solos relacionados às propriedades químicas, físicas e sedimentológicas. In: ALVARES, V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F., eds. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. p.429-443.
- 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.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- ETANA, A.; COMIA, R.A. & HÅKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. *Soil Till. Res.*, 44:13-21, 1997.
- FLOWERS, M.D. & LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a Mollic Ochraqualf in northwest Ohio. *Soil Till. Res.*, 48:21-35, 1998.
- GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solos do estado de São Paulo. *Bragantia*, 19:319-328, 1960.
- HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. An introduction to geotechnical engineering. Englewood, Cliffs, Prentice-Hall, 1981. 733p.
- HORN, R.; TAUBNER, H.; WUTTKE, M. & BAUMGARTL, T. Soil physical properties related to soil structure. *Soil Till. Res.*, 30:187-216, 1994.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:11-18, 2001.
- KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soils. Madison, America Society Agronomy, 1986. p.253-261. (Monograph, 9)
- KONDO, M.K. & DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:211-218, 1999.
- 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.
- LEBERT, M. & HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Till. Res.*, 19:575-286, 1991.
- LEMONS, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 3.ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 83p.
- MICHEL, J.K. Fundamentals of soil behavior. New York, John Wiley, 1976. 422p.
- OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:197-200, 1968.
- SANTOS, M.N. Influência de diferentes sistemas de manejo nos teores de carbono orgânico e nutrientes e no tamanho e distribuição de poros em um Latossolo Vermelho Escuro Argiloso na Região dos cerrados. Brasília, Universidade de Brasília, 1997. 133p. (Tese de Mestrado)
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24: 239-249, 2000.
- SILVA, R.H. & ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:253-260, 2001.
- SILVA, R.B.; LIMA, J.M.; DIAS JUNIOR, M.S. & SILVA, F.A.M. Influência da adição de fósforo no índice de compressão e propriedades de consistência de um Latossolo Vermelho Escuro. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:261-268, 2001.
- 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 water content and applied pressure on uni-axial compaction. *Soil Till. Res.*, 41:53-73, 1997.
- SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. Soil compaction problems in word agriculture. In: SOANE, B.D. & VAN OUWERKERK, C., eds. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.1-21.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. & SÁ, J.C. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:301-309, 1998.
- VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effect os soil compaction on storage and movement of soil, air and water. *Tras. Am. Soc. Agric. Eng.*, 4:242-246, 1966.

