

MÉTODOS DE OBTENÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE UM ARGISSOLO CULTIVADO⁽¹⁾

David Peres da Rosa⁽²⁾, José Miguel Reichert⁽³⁾, Marcelo Ivan Mentges⁽⁴⁾, Davi Alexandre Vieira⁽⁵⁾, Eduardo Saldanha Vogelmann⁽⁴⁾, Vanderleia Trevisan da Rosa⁽⁶⁾ & Dalvan José Reinert⁽³⁾

RESUMO

O controle da capacidade de suporte à carga do solo pode minimizar os efeitos danosos da compactação. O objetivo deste estudo foi avaliar o uso de métodos de determinação da tensão de pré-consolidação num Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado e submetido a diferentes condições. Os tratamentos empregados foram: semeadura direta (testemunha), semeadura direta com intensidade de tráfego de 24,79 Mg km ha⁻¹ e 49,59 Mg km ha⁻¹, cultivo mínimo há cinco meses e cultivo mínimo em solo compactado pelo tráfego de uma pá-carregadora (260 kPa de pressão ao solo e 24,67 Mg km ha⁻¹). Os métodos usados para estimação da capacidade de suporte foram: (1) interseção da reta de compressão virgem (RCV) com o eixo x na deformação zero; (2) intercepto da RCV pela regressão com os primeiros dois pontos da curva; (3) intercepto da RCV pela regressão com os três pontos da curva; (4) resistência do solo a 2,5 % da deformação; (5) Casagrande, por meio do ajuste sigmoidal da equação de van Genuchten (1980); e (6) Pacheco & Silva (ABNT, 1990), também por esse meio. Os métodos de 2,5 % da deformação e a interseção da RCV com eixo x estimaram, no geral, valores abaixo da referência ao longo de todas as camadas analisadas. Já o método de regressão teve comportamento dependente da inclinação da RCV; em inclinações elevadas houve superestimação; e em inclinações baixas, ocorreu o contrário.

Termos de indexação: tensão de pré-consolidação, intensidade de tráfego, manejo do solo.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 13 de maio de 2010 e aprovado em 7 de julho de 2010.

⁽²⁾ Professor de Ensino Técnico, Básico e Tecnológico do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Sertão. Rodovia RS 135, Km 25, Distrito Eng. Luiz Englert, CEP 99170-000 Sertão (RS). E-mail: david.darosa@sertao.ifrs.edu.br

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Av. Roraima 1000, Camobi, CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mails: reichert.jm@googlegmail.com; dalvanreinert@gmail.com

⁽⁴⁾ Mestrando em Ciência do Solo na UFSM. E-mails: marcelomentges@gmail.com; eduardovogelmann@hotmail.com

⁽⁵⁾ Engenheiro-Agrônomo pela UFSM. E-mail: daviperigoti@yahoo.com.br

⁽⁶⁾ Professora Horista do Instituto de Desenvolvimento Educacional do Alto Uruguai – IDEAU. E-mail: vandetrevisan@gmail.com

SUMMARY: ESTIMATION METHODS OF SOIL LOAD SUPPORT CAPACITY OF A HAPLUDALF

The control of soil load support capacity can reduce the damaging effects of compaction. The main objective of this study was to evaluate the use of prediction models of consolidation stress under different conditions for a Hapludalf. The treatments consisted of: (a) soil under no-tillage (control) (b) soil under no-tillage with traffic intensity of 24.79 Mg km ha⁻¹ and (c) 49.59 Mg km ha⁻¹; (d) soil after five months of minimum tillage; and (e) soil under minimum tillage compacted by traffic (soil stress of 260 kPa and 24.67 Mg km ha⁻¹). The soil support capacity was predicted by the following methods: (1) intersection of virgin compression line (VCL) with x-axis at zero deformation; (2) intercept of the VCL and regression with the first two points of the curve; (3) intercept of the VCL and regression with the first three points of the curve; (4) soil resistance at 2.5 % deformation; (5) method of Casagrande with sigmoidal fit of the van Genuchten equation (reference); and (6) method of Pacheco & Silva with sigmoidal fit of the van Genuchten equation. The values by the methods with 2.5 % deformation and intersection of VCL with the x-axis tended to be underestimated, compared to the reference in all layers. The regression method on the other hand varied according to the slope of the VCL; at high slopes, the values tended to be over- and at low slopes underestimated.

Index terms: consolidation stress, traffic intensity, soil management.

INTRODUÇÃO

Os problemas oriundos da compactação subsuperficial dos solos sob semeadura direta vêm sendo potencializados. Tal fato é originado pelo mínimo revolvimento do solo, que está restrito à linha de semeadura, em torno de 0,13 m de profundidade quando é empregada a haste sulcadora (Rosa et al., 2008), umidade inadequada na implantação e colheita das culturas (Silva et al., 1984) e utilização inadequada da pressão de insuflagem dos pneus agrícolas (Tessier & Lague, 1991; Håkansson, 2005). Na compressibilidade do solo há dois parâmetros principais que podem ser utilizados como controladores da compactação: a tensão de pré-consolidação, que representa o valor máximo que se pode aplicar ao solo sem que ele sofra compactação adicional; e o coeficiente de compressão, que se refere ao processo de decréscimo de volume do solo quando este é submetido à aplicação de uma pressão externa (Koolen, 1994), ou seja, sua suscetibilidade à compactação.

Diversos métodos de estimação da capacidade de suporte à carga do solo vem sendo desenvolvidos com o propósito de melhorar a exatidão de determinação. Em 1936, Casagrande (1936) propôs um método para estimar a capacidade de suporte do solo e o seu risco de compactação, o qual é referência e vem sendo empregado até hoje. Contudo, Arvidsson & Keller (2004) encontraram influência da tensão matricial do solo nos resultados desse método, tendendo a superestimá-los. Rosa (2007) encontrou valores altos de tensão de pré-consolidação que, em vez de indicar alta capacidade de suporte, estava apontando para alta presença de compactação, manifesto pelas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho. Em estudos realizados num Latossolo sob Cerrado, Silva et al. (2003b) verificaram que os tráfegos subsequentes elevam, de forma significativa, a tensão de pré-

consolidação, comprometendo a estrutura do solo. Assim, essa propriedade modelada por Casagrande (1936) não pode ser usada como fator isolado de identificação da capacidade de suporte do solo, pois a aplicação de pressões, mesmo menor que essa, já pode estar originando deformações plásticas, ou seja, aquelas não recuperáveis.

Segundo Rücknagel et al. (2010), o método de Casagrande possui um problema relacionado com o método de obtenção da tensão de pré-consolidação, que se baseia no gráfico da curva de compressão, o qual gera uma percepção subjetiva do usuário que realiza a determinação do ponto de maior curvatura visualmente e decide quais pontos serão usados para a reta de compressão virgem, influenciando diretamente no valor estimado. Segundo os estudos desses autores, o método de Casagrande gerou um erro de 15 % que, segundo eles, é baixo e tolerável. Contudo, esse valor irá variar entre os usuários.

Um método proposto por Veenhof & McBride (1996) faz a estimação mínima possível da tensão de pré-consolidação, pois assim os valores aplicados ao solo, considerando-a como referência, estariam sempre abaixo da tensão de pré-consolidação máxima. Outro método proposto por Arvidsson & Keller (2004) ajustou a curva de compressão com uma equação polinomial de quarto grau, e estudos de Gregory et al. (2006) empregando esse método apresentaram bons resultados em solos da Inglaterra. Os primeiros autores testaram um método de obtenção da capacidade de suporte do solo por meio da regressão, utilizando os dois primeiros pontos da reta de compressão virgem e também os três primeiros, obtendo boas respostas. Essa constatação foi corroborada por meio dos valores de tensão de pré-consolidação, os quais apontaram para tal, que segundo os referidos autores foi confirmada pelo baixo índice de vazios.

Em 37 locais de solos agrícolas na Bavaria, Lebert & Horn (1991) testaram a análise de multirregressão para obter a tensão de pré-consolidação. Obtiveram resultados que consideraram eficientes quando o ângulo de atrito interno e a coesão do solo são adicionados como variáveis independentes. No Brasil, a maioria dos pesquisadores (Silva et al., 2002; Rosa, 2007; Suzuki et al., 2008) vem utilizando o método de Casagrande, porém há outros que empregam o método proposto por Dias Jr. (1996) (Silva et al., 2003a; Oliveira et al., 2003; Assis & Lanças, 2005), que prediz a tensão de pré-consolidação máxima que um solo pode suportar sem haver compactação adicional em diferentes níveis de umidade. Bruce (1955) propôs um método de avaliação da compressibilidade baseado em curvas de densidade x umidade do solo, em que o solo é exposto à aplicação de cargas em diferentes graus de umidade. Baseado na resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo, Dias Junior et al. (2004) propuseram outro método de estimação da tensão de pré-consolidação. Similar a esses autores, Suzuki et al. (2008) testaram métodos de predição da tensão de pré-consolidação por intermédio da densidade inicial e da resistência à penetração de solos do Rio Grande do Sul, concluindo que a suscetibilidade do solo à compactação e a sua capacidade de suporte de carga podem ser estimadas, respectivamente, pela densidade inicial e pela resistência à penetração.

Cada método leva em consideração aspectos relativos a propriedades físicas do solo, fato que pode gerar melhorias ou não em sua resposta. Tal variabilidade é comentada por Baumgartl & Köck (2004) como função da variação estrutural do solo, que pode proporcionar precisão significativa ou não da estimação da capacidade de suporte de carga. Assim, a busca por métodos que aumentem a precisão da determinação da compactação é importante para minimizar os problemas oriundos da compressão do solo.

O objetivo deste estudo foi comparar seis métodos de estimação da tensão de pré-consolidação em diferentes condições e o seu uso como indicadores da presença de compactação de um Argissolo Vermelho-Amarelo.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em abril de 2008, em área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (29° 43' 8.8"S e 53° 42' 27.1"O), em Santa Maria, RS. O solo do experimento foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo (Embrapa, 2006) de textura franco-argiloarenosa e encontrava-se há mais de 13 anos sob semeadura direta, cujas caracterizações granulométrica e química são apresentadas no quadro 1.

Para avaliar o resultado dos modelos em situações diversificadas, instalou-se um experimento com delineamento em blocos ao acaso com três repetições e os seguintes tratamentos: SD – semeadura direta (testemunha), SDc4 – semeadura direta com compactação de quatro passadas de máquina (3,8 Mg e pressão ao solo de 102,95 kPa); SDc8 – semeadura direta com compactação de oito passadas de máquina, CM – cultivo mínimo e CMc – cultivo mínimo em solo compactado (10 Mg de peso e 260 kPa de pressão ao solo). Ressalta-se que todos os tratamentos sob semeadura direta se encontravam há 13 anos com esse sistema de manejo e o solo sob cultivo mínimo estava assim há cinco meses. Os níveis de compactação empregados nos tratamentos SDc4 e SDc8 foram realizados com o auxílio de um conjunto trator-pulverizador montado, resultando em intensidade de tráfego de 24,79 Mg km ha⁻¹ e 49,59 Mg km ha⁻¹, respectivamente. No momento da compactação, o solo encontrava-se com teor de água igual a 0,18 kg kg⁻¹ na camada de 0,0–0,3 m.

O cultivo mínimo foi implantado por meio de passagem de um subsolador de cinco hastes, com haste em curva (45°) e com ponteira estreita.

A intensidade de tráfego foi estimada pela equação (Håkansson, 2005): $IT = (W_t \times D_1)/A_t$; em que IT é a intensidade de tráfego, Mg km ha⁻¹; W_t é o peso total da máquina, Mg; D_1 é a distância linear trafegada pelo trator, km; e A_t é a área total trafegada, ha.

Nos ensaios de compressibilidade, as amostras de solo foram extraídas em cilindros de aço inoxidável a campo (61 mm de diâmetro e 25 mm de altura), nas camadas de 0,00–0,05, 0,05–0,15, 0,15–0,25 e 0,25–

Quadro 1. Composição granulométrica do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico em estudo

Camada	Areia	Silte	Argila	pH ⁽¹⁾	MO	Saturação (%)		P	K	CTC ef
						Al ³⁺	Bases			
m	g kg ⁻¹				%			cmol dm ⁻³		
0,0-0,1	600	212	188	5,3	2,5	2	71	22,8	136	5,4
0,1-0,2	566	215	219	5,0	1,5	14	69	6,8	84	5,1
0,2-0,3	558	232	210	5,1	1,2	19	60	3,7	28	4,8
0,3-0,4	566	236	198	5,0	1,2	31	53	2,2	32	4,2

⁽¹⁾ pH em água relação 1:1.

0,35 m, para verificar se o comportamento dos modelos possui variação em profundidade, visto que os comportamentos das propriedades físicas e mecânicas do solo variam ao longo do perfil. No laboratório, as amostras foram saturadas por capilaridade durante 24 h, sendo, posteriormente, submetidas à sucção de 10 kPa em câmara de pressão de Richards, a fim de homogeneizá-las quanto ao potencial matricial e trabalhar com as amostras no teor de água próximo à capacidade de campo.

Após o equilíbrio do potencial matricial, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, utilizando-se para tal um consolidômetro pertencente ao Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da UFSM, modelo S-450 Terraload da Durham Geo-Interprises.

O ensaio de compressão uniaxial seguiu a NBR12007 (ABNT, 1990), mas com alteração no tempo de aplicação de carga. A amostra foi submetida a uma aplicação sucessiva e contínua das pressões de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800; e 1.600 kPa, durante 5 min em cada carga, período suficiente para atingir 99 % da deformação máxima (Silva et al., 2000). Depois disso, as amostras foram encaminhadas à estufa para secagem a 105 °C, durante 24 h.

A tensão de pré-consolidação foi estimada com a utilização de seis métodos de ajustes diferentes, a saber: (1) interseção da reta de compressão virgem (RCV) com o eixo x na deformação zero; (2) intercepto da RCV, por meio da regressão com os primeiros dois pontos da curva; (3) intercepto da RCV, por meio da regressão com os três pontos da curva; (4) resistência do solo quando atingiu 2,5 % da deformação; (5) método de Casagrande, por meio do ajuste sigmoidal da equação de van Genuchten; e (6) método de Pacheco & Silva (ABNT, 1990), por meio do ajuste sigmoidal da equação de van Genuchten. Os métodos 1 ao 4 foram desenvolvidos usando-se uma curva polinomial de grau 4, e o eixo das abscissas continha o logaritmo da pressão aplicada e, o das ordenadas, a deformação da amostra ocorrida durante o ensaio de compressão uniaxial, conforme os estudos realizados por Arvidsson & Keller (2004). Os métodos 5 e 6 foram desenvolvidos usando-se uma curva sigmoidal, ajustando-a com a equação de van Genuchten (1980): $\varepsilon = \varepsilon_f + (\varepsilon_i - \varepsilon_f) / (1 + \alpha \sigma^n)^m$, em que α é o índice de vazios total, sendo o índice "i" inicial e "f" final; α , m e n são parâmetros empíricos obtidos pelo método de mínimos quadrados; e σ é a tensão de pré-consolidação.

Os métodos Casagrande (1936) e Pacheco & Silva (ABNT, 1990) foram determinados com o uso do software *Compress* (Reinert et al., 2003), optando-se pelo ajuste semiautomático.

Para a confirmação da compactação no solo pelos métodos de obtenção da capacidade de suporte do solo, determinaram-se macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo. Para tal foram realizadas coletas de solo a campo, em cilindros de

aço inoxidável (60 x 50 mm); no laboratório, tais propriedades foram determinadas pelo método da Embrapa (1997).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tensão de pré-consolidação média estimada pelos seis métodos matemáticos ao longo das camadas em estudo está representada no quadro 2.

As tensões de pré-consolidação estimadas na camada superficial (0,00–0,05 m) demonstram diferença entre os métodos que sofreram ação do tráfego, demonstrados pelo solo sob semeadura direta com quatro passadas (SDc4) e oito passadas de máquina (SDc8) e o cultivo mínimo em solo compactado (CMc); esse fato está ligado à variação da estrutura física do solo gerada pelo rodado, conforme verificado no quadro 3. Em geral, os valores foram próximos ao do método de Casagrande, usado como referência. Diferenças começaram a ocorrer na segunda camada, na qual o solo sob semeadura direta (SD), a tensão estimada pelos métodos de regressão de dois pontos (σ_{Reg2}), regressão por três pontos (σ_{Reg3}) e Pacheco & Silva (σ_{Pach}) não diferiram entre si, mas sim da tensão estimada pelo prolongamento da reta de compressão virgem (σ_{RCV}) e 2,5 % da deformação ($\sigma_{2,5\%}$). As tensões estimadas dentro desse tratamento tenderam a superestimar a tensão de pré-consolidação, exceto o método 2,5 % da deformação. Isso é verificado pelos maiores valores de tensão de pré-consolidação de tais tratamentos quando comparados com o valor de Casagrande. Independentemente do manejo e da camada de solo, o método $\sigma_{2,5\%}$ resultou em valores subestimados, em função de que 2,5 % da deformação, em geral, ocorre sempre antes do ponto de máxima curvatura de compressão nesse solo; assim, tenderá sempre a subestimar os resultados. Condição similar foi encontrada por Arvidsson & Keller (2004), os quais testaram esse método em 18 solos agrícolas da Suécia, com textura variando de arenosa à argilosa.

O comportamento dos métodos de regressão variaram em função da inclinação da reta de compressão virgem (RCV). Em inclinações elevadas, os pontos finais da RCV tendem a gerar deslocamento do encontro entre a reta que passa por esses pontos ao prolongamento da reta que passa pelos pontos iniciais da curva (na parte de deformação elástica), ou seja, há aumento da tensão de pré-consolidação. Em casos opostos, a baixa inclinação da RCV reduz a tensão de pré-consolidação. Há, ainda, os casos dos solos com maior nível de compactação que diminuem a deformação sofrida pelo solo e tendem a apresentar menor variação da deformação entre os pontos, fazendo, assim, que o prolongamento da reta que passa pelos dois pontos da RCV passe também pelo terceiro ponto, resultando em valores similares ao do método σ_{Reg3} .

Quadro 2. Tensão de pré-consolidação média (kPa) estimada pelos métodos matemáticos e coeficiente de variação do Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes manejos

Tratamento ⁽¹⁾	Método de estimação da tensão de pré-consolidação						CV
	$\sigma_{\text{Reg2}}^{(2)}$	σ_{Reg3}	σ_{RCV}	$\sigma_{2,5\%}$	σ_{Pach}	σ_{Cas}	
Camada 0,00–0,05 m							
	%						
SD	34,7 Aa ⁽³⁾	29,5 Aa	28,3 Aa	32,7 Aa	36,5 Aa	32,2 Aa	25,62
SDc4	93,3 Aa	69,4 Aab	48,2 Aab	48,0 Aab	25,5 Aab	22,9 Ab	56,41
SDc8	30,1 Aab	42,4 Aa	25,2 Ab	30,9 Aab	40,3 Aab	34,1 Aab	20,01
CM	36,6 Aa	31,6 Aa	19,5 Aa	31,3 Aa	31,5 Aa	26,6 Aa	33,17
CMc	38,5 Ac	52,4 Aab	35,7 Ac	39,9 Ac	57,4 Aa	49,5 Ab	7,44
Camada 0,05–0,15 m							
SD	193,2 Aa	179,7 Aa	101,1 Ab	81,5 Ab	166,3 Aa	113,2 Ab	12,68
SDc4	136,1 Aa	106,6 ABa	72,2 Aa	78,2 Aa	122,2 Aa	93,7 Aa	36,67
SDc8	184,8 Aa	162,5 ABa	100,5 Ab	103,0 Ab	174,1 Aa	120,6 Ab	10,37
CM	92,9 Aa	81,1 ABab	55,7 Ab	54,1 Ab	91,2 Aa	70,0 Aab	17,35
CMc	82,2 Aab	90,1 Aa	58,2 Ab	67,5 Aab	91,0 Ab	66,8 Aab	16,20
Camada 0,15–0,25 m							
SD	259,4 Aa	202,8 Ab	121,2 Ac	86,2 Ac	185,8 Ab	132,2 Ac	12,64
SDc4	239,3 Aa	200,5 Aa	145,8 Ac	105,0 Ac	223,2 Aa	167,3 Aac	20,70
SDc8	135,9 Ab	138,1 Ab	95,0 Ac	70,4 Ad	163,2 Aa	119,7 Ab	8,67
CM	121,0 Aa	126,0 Aa	85,9 Ac	75,0 Ac	134,8 Aa	105,9 Aac	14,18
CMc	210,3 Aa	169,2 Ab	94,2 Acd	83,1 Ad	164,8 Ab	106,7 Ac	6,45
Camada 0,25–0,35 m							
SD	162,5 Aa	142,5 Aab	98,0 Acd	94,4 Abd	160,8 ABa	124,4 Abc	8,84
SDc4	144,4 Aab	154,6 Aab	98,4 Acd	65,7 Abd	164,3 Aba	120,4 Abc	15,01
SDc8	78,9 Abc	89,2 Aab	65,3 Ad	59,5 Abd	96,0 Ba	83,6 Aab	8,25
CM	108,5 Aab	127,0 Aa	76,1 Adc	56,1 Abd	113,6 ABab	92,9 Abc	10,47
CMc	168,3 Aab	160,5 Aab	99,9 Ac	88,4 Ac	184,8 Aa	124,7 Abc	17,22

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 %. ⁽²⁾ σ_{Reg2} : Intercepto da reta de compressão virgem (RCV), por meio da regressão com os primeiros dois pontos da curva; σ_{Reg3} : Intercepto da RCV, por meio da regressão com os três pontos da curva; σ_{RCV} : Interseção da RCV com o eixo x na deformação zero; $\sigma_{2,5\%}$: Resistência do solo quando atingiu 2,5 % da deformação; σ_{Cas} : Casagrande, por meio do ajuste sigmoidal da equação de van Genuchten; e σ_{Pach} : Pacheco, por meio do ajuste sigmoidal da equação de van Genuchten; e CV: Coeficiente de variação. ⁽³⁾ Trat.: Tratamento; SD: Semeadura direta há 13 anos; SDc4: Semeadura direta com compactação de quatro passadas; SDc8: Semeadura direta com compactação de oito passadas; CM: Cultivo mínimo; CMc: Cultivo mínimo em solo compactado; e ns: Não significativo.

O método que utiliza o prolongamento da RCV estimou sempre os menores valores. Nos primeiros 0,05 m de solo, comparando esse ao método de Casagrande, a tensão de pré-consolidação média ficou 23,18 % abaixo, 16,7 % na segunda camada, 14,5 % na terceira e 19,9 % na última. Os métodos da RCV e o de 2,5 % da deformação, segundo McBride & Joosse (1996), foram desenvolvidos com dois objetivos: conservativo ou de estimação da tensão de pré-consolidação mínima possível. Contudo, os dados de σ_{RCV} e $\sigma_{2,5\%}$ ao longo das camadas não diferiram do σ_{Cas} . A viabilidade de uso do método de 2,5 % da deformação ocorrida está no estabelecimento de um planejamento precavido, ou seja, como os valores são subestimados, as aplicações de carga, tomando esse valor como referência, estarão sempre abaixo da máxima capacidade de suporte do solo.

Na camada de maior concentração das tensões geradas pelo rodado, 0,15–0,25 m (Reichert et al., 2009), a maioria dos modelos estimou valores acima da pressão imputada pelo trator com pulverizador

montado, que foi de 102,9 kPa, exceto os σ_{RCV} e $\sigma_{2,5\%}$ nos tratamentos SD e SDc8, respectivamente. Isso ocorreu em função do fato comentado anteriormente, em que esses modelos tenderam a subestimar a tensão de pré-consolidação e, mesmo que o tráfego de máquinas agrícolas aplique essa pressão ao solo, não será gerada compactação adicional, conforme verificado pela menor densidade do solo e maior macroporosidade (Quadro 3). Em solos do Brasil, Suécia e Dinamarca, Cavalieri et al. (2008) também encontraram baixos valores de tensão de pré-consolidação quando utilizaram o método σ_{RCV} . Contudo, esses autores ressaltam que os demais métodos empregados variaram entre os solos.

O coeficiente de variação dos modelos foi maior na primeira camada, variando de 7,44 até 56,41 %; nas demais camadas, a variação foi menor, ficando ao redor dos 18 % na segunda camada e 12 % na terceira e na quarta camadas. A variação na primeira camada deve estar ligada à mobilização realizada pelos mecanismos sulcadores da semeadora, que proporcionam alterações

na estrutura do solo. Os maiores coeficientes de variação entre os tratamentos se devem aos dados estimados pelo método de regressão de dois pontos, que, conforme abordado anteriormente, teve variação diretamente relacionada com a inclinação da curva de compressão. Outra observação é que os tratamentos SDc8 e CMc apresentaram os menores coeficientes de variação, fato que pode estar relacionado ao maior estado de compactação que resulta em uma estrutura densa e resistente à aplicação de pressão.

Os valores estimados pelo método de Pacheco & Silva (ABNT, 1990) foram similares ao de Casagrande (1936) até os 0,15 m, porém, após essa camada, ocorreram diferenças mais perceptíveis.

Os valores médios de densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do Argissolo Vermelho-Amarelo encontram-se no quadro 3.

Quadro 3. Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e densidade (Ds) médias do Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes manejos

Tratamento ⁽¹⁾	Ma	Mi	Pt	Ds
	Camada 0,00–0,05 m			Mg m ⁻³
SD	14,4 ⁽²⁾ a	30,1 ab	44,5 ^{ns}	1,40 ^{ns}
SDc4	10,8 ab	28,5 b	39,3	1,53
SDc8	9,3 b	30,8 ab	40,2	1,51
CM	13,2 ab	32,2 a	45,4	1,38
CMc	15,2 a	29,6 ab	44,8	1,39
CV (%)	22,4	5,2	7,0	5,16
	Camada 0,05–0,15 m			
SD	6,2 ^{ns}	29,1 ^{ns}	35,3 ^{ns}	1,63 ^{ns}
SDc4	6,1	30,5	36,6	1,60
SDc8	4,9	29,5	34,4	1,65
CM	8,5	29,6	38,1	1,56
CMc	6,5	28,6	35,1	1,64
CV (%)	41,2	3,9	6,1	3,38
	Camada 0,15–0,25 m			
SD	7,5 ab	28,9 ^{ns}	36,4 ab	1,63 ab
SDc4	11,0 a	29,2	40,2 ab	1,54 ab
SDc8	10,1 ab	30,4	40,5 a	1,52 b
CM	9,5 ab	29,4	38,9 ab	1,57 ab
CMc	6,4 b	28,7	35,1 b	1,67 a
CV (%)	20,4	4,7	6,1	3,90
	Camada 0,25–0,35 m			
SD	7,4 b	29,6 ^{ns}	37,0 b	1,61 ab
SDc4	9,5 ab	29,7	39,2 ab	1,55 abc
SDc8	11,2 ab	30,6	41,8 a	1,49 bc
CM	12,1 a	29,7	41,8 a	1,48 c
CMc	7,2 b	29,2	36,4 b	1,63 a
CV (%)	21,5	3,4	5,4	3,44

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 %. ⁽²⁾ SD: Sementeira direta há 13 anos; SDc4: Sementeira direta com compactação de quatro passadas; SDc8: Sementeira direta com compactação de oito passadas; CM: Cultivo mínimo; CMc: Cultivo mínimo em solo compactado; ns: Não significativo; e CV (%): Coeficiente de variação.

Na camada inicial (0,00–0,05 m), diferenças ocorreram no solo que teve a maior intensidade de tráfego (SDc8) do que naquele com cultivo mínimo em solo compactado e na testemunha, e esses tratamentos não diferiram dos demais. Diferenças não foram encontradas na densidade do solo até a profundidade de 0,15 m. No geral, ao longo das camadas constatou-se que os maiores indícios de compactação nos tratamentos são expressos pela baixa macroporosidade e porosidade total, que são explicadas pela pressão aplicada no tráfego superior à capacidade de suporte da respectiva camada. Assim, os valores de tensão de pré-consolidação estimados pelo método de regressão de dois pontos e três pontos estão apontando para a elevada compactação, o que limita o seu emprego nessas condições de solo e manejo como indicador da capacidade de suporte do solo.

O método de Casagrande apresentou os menores valores de tensão de pré-consolidação, independentemente do manejo e profundidade, indicando que o seu uso nesse solo é adequado, pois os baixos valores, bem abaixo da pressão imputada pelo trator usado na compactação do SDc4 e SDc8, já causariam compactação.

A camada de 0,05–0,15 m apresentou baixa macroporosidade, bem inferior aos 10 % que são considerados críticos ao desenvolvimento da planta por Forsythe (1967). Isso evidencia a ação mais expressiva do tráfego nessa camada, que, segundo Reichert et al. (2009), é a de concentração das alterações geradas pelo tráfego.

CONCLUSÕES

1. A obtenção da tensão de pré-consolidação pelo método da interseção da reta de compressão virgem (RCV) com o eixo x na deformação zero e da resistência do solo quando atinge 2,5 % da deformação subestima a tensão em torno de 20 % desse solo.

2. Os métodos do intercepto da RCV por meio da regressão com os primeiros dois pontos da curva e o intercepto da RCV pela regressão com os três pontos da curva apresentam, geralmente, os maiores valores de tensão de pré-consolidação.

3. O método de interseção da reta de compressão virgem com o eixo x na deformação zero e da resistência do solo quando atinge 2,5 % da deformação são bons estimadores da tensão de pré-consolidação desse solo, gerando valores sempre menores que os da tensão máxima de suporte de carga do solo.

4. Os métodos de regressão possuem variação dos valores estimados em função da inclinação da reta de compressão virgem. Em inclinações elevadas há tendência de superestimação; em inclinações baixas, ocorre o contrário.

5. O método de Casagrande foi eficiente nas condições em estudo, indicando que a tensão de pré-consolidação pode ser usada como indicador da capacidade de suporte de Argissolo Vermelho-Amarelo.

LITERATURA CITADA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12007: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990. 13p.
- ARVIDSSON, J. & KELLER, T. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. *Soil Tillage Res.*, 77:85-95, 2004.
- ASSIS, R.L. & LANÇAS, K.P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. *R. Bras.Ci. Solo*, 29:507-514, 2005.
- BAUMGARTL, T. & KÖCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:57-65, 2004.
- BRUCE, R.R. An instrument for the determination of soil compactibility *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 19:253-258, 1955.
- CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge. Proceedings... Cambridge, MA Harvard University, 1936. p.60-64.
- CAVALIERI, K.M.V.; ARVIDSSON, J.; SILVA, A.P. & KELLER, T. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests, *Soil Tillage Res.*, 98:17-26, 2008.
- DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, A.R.; FONSECA, S. & LEITE, F.P. Método alternativo de avaliação da pressão de pré-consolidação por meio de um penetrômetro, *R. Bras.Ci. Solo*, 28:805-810, 2004.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 2006. 412p.
- FORSYTHE, W.M. Las propiedades físicas los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. *Fit. Lat. Am.*, 4:165-176, 1967.
- GREGORY, A.S.; WHALLEY, W.R.; WATTS, C.W.; BIRD, N.R.A.; HALLETT, P.D. & WHITMORE, A.P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil Tillage Res.*, 89:45-57, 2006.
- HÅKANSSON, I. Machinery-induced compaction of arable soils: incidence, consequences, counter-measures. Sweden, Dept, of Soil Sciences, Division of Soil Management, 2005. 153p.
- KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D. & OUWERKERK, C., org. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69.
- LEBERT, M. & HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage Res.*, 19:275-286, 1991.
- McBRIDE, R.A. & JOOSSE, P.J. Overconsolidation in agricultural soils. II. Pedotransfer functions for estimating preconsolidation stress. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:373-380, 1996.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S. & CURTI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:291-299, 2003.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.*, 102:242-254, 2009.
- REINERT, D.J.; ROBAINA, A.D. & REICHERT, J.M. COMPRESS-Software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, SP, 2003. Anais... Ribeirão Preto, SP, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD ROM.
- ROSA, D.P. Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2007. 122p. (Tese de Mestrado)
- ROSA, D.P.; REICHERT, J.M.; SATTLER, A.; REINERT, D.J.; MENTGES, M.I. & VIEIRA, D.A. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:395-400, 2008.
- RÜCKNAGEL, J.; BRANDHUBER, R.; HOFMANN, B.; LEBERT, M.; MARSCHALL, K.; PAUL, R.; STOCK, O. & CHRISTEN, O. Variance of mechanical precompression stress in graphic estimations using the Casagrande method and derived mathematical models. *Soil Tillage Res.*, 106:165-170, 2010.
- SILVA, J.R.; KURACHIM, S.A.H.; MESQUITA, C.M.; BARRETO, J.N. & PETRONI, A.C. Correlação entre esforços de tração e profundidade de subsolagem. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1984. 18p. (Boletim Técnico, 96)
- 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, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo vermelho-amarelo distrófico arenico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. II - Grau de saturação em água. *R. Bras.Ci. Solo*, 26:9-15, 2002.

- SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SANTOS, F.L. & FRANZ, C.A.B. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema de plantio direto, avaliada por meio da pressão de pré-consolidação. R. Bras.Ci. Solo, 27:961-971, 2003a.
- SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, F.A.M. & FOLE, S.M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos cerrados. R. Bras.Ci. Solo, 27:973-983, 2003b.
- SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. R. Bras.Ci. Solo, 32:963-973, 2008.
- TESSIER, S. & LAGUE, C. Soil compaction by liquid manure tanker. Trans. Am. Soc. Agron. Eng., 34:402-413, 1991.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:892-898, 1980.
- 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.