

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

FATORES CONTROLADORES DA COMPRESSIBILIDADE DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO ARÊNICO E DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO. I - ESTADO INICIAL DE COMPACTAÇÃO⁽¹⁾

V. R. SILVA⁽²⁾, D. J. REINERT⁽³⁾, J. M. REICHERT⁽³⁾ & J. M. SOARES⁽⁴⁾

RESUMO

O conhecimento da susceptibilidade do solo à compactação tem importância na adequação de práticas de uso, manejo e tráfego de máquinas sobre o solo, com vistas em minimizar o seu efeito sobre as propriedades do solo. O objetivo deste estudo foi determinar a pressão de preconsolidação (σ'_p) e o índice de compressão (C_c), em duas profundidades e em dois solos sob sistemas de plantio direto e convencional, com variações do estado de compactação. No ano agrícola de 1997/1998, amostras indeformadas foram coletadas em anéis de 5,35 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura, nas camadas de 0-2 e 10-12 cm de profundidade, de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (89 g kg⁻¹ de argila), localizado no município de Santa Maria (RS) (29° 45' latitude sul e 53° 42' longitude oeste) e de um Latossolo Vermelho distrófico típico (467 g kg⁻¹ de argila), localizado no município de Ibirubá (RS) (28° 30' latitude sul e 53° 30' longitude oeste). Para cada tipo de solo e condição de manejo, amostras indeformadas foram coletadas em vários locais e em diferentes épocas para obter variação natural dos valores de densidade do solo, ou seja, diferentes estados de compactação. Os valores de densidade do solo foram distribuídos em quatro classes para o Argissolo (1,31 a 1,45; 1,46 a 1,60; 1,61 a 1,75 e 1,76 a 1,80 Mg m⁻³) e em três classes para o Latossolo (1,15 a 1,30; 1,31 a 1,45 e 1,46 a 1,60 Mg m⁻³). O ensaio de compressão confinada foi realizado com a aplicação sucessiva de cargas estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa, durante cinco minutos em cada estágio. Na camada de 0-2 cm do Argissolo, os valores de pressão de preconsolidação para o manejo

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Pesquisa executada com recursos do CNPq/FINEP (Projeto PRONEX 60/97). Recebido para publicação em abril de 1999 e aprovado em julho de 2001.

⁽²⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. CCR-SOLOS, Campus, CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: silvavr@bol.com.br

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Solos, UFSM. Bolsista do CNPq. E-mails: dalvan@ccr.ufsm.br; reichert@ccr.ufsm.br

⁽⁴⁾ Professor Adjunto do Departamento de Transportes, UFSM. E-mail: jmario@ct.ufsm.br

convencional foram quatro vezes menores que os determinados para o sistema plantio direto até à densidade do solo de $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ e cerca de duas vezes quando essa densidade do solo foi maior que $1,61 \text{ Mg m}^{-3}$. No Latossolo, o manejo do solo não teve influência nos valores de pressão de preconsolidação. Os maiores valores de índice de compressão foram para o Latossolo. Dentro de cada solo, o índice de compressão correlacionou-se significativamente com a densidade do solo.

Termos de indexação: compactação do solo, plantio direto, índice de compressão, pressão de preconsolidação.

SUMMARY: FACTORS CONTROLLING COMPRESSIBILITY OF A PALEUDALF AND A HAPLORTOX SOIL. I - INITIAL STATE OF COMPACTNESS

Knowing the susceptibility of a soil to compaction is important to adjust soil management, tillage practices, and traffic to cause minimal detrimental effects on soil properties. The objective of this study was to determine the preconsolidation pressure (σ'_p) and the compression index (C_c) at two depths of two soils under no-tillage and conventional tillage, including a wide variation of the state of compaction. Undisturbed soil samples were collected with rings (5.4 cm wide and 2.0 cm high), at 0 to 2 and 10 to 12 cm depths, from a Paleudalf (89 g kg⁻¹ clay at the surface) locate in Santa Maria, RS, Brazil (29° 45' South latitude and 53° 42' longitude West) and a Haplortox (467 g kg⁻¹ clay) locate in Ibirubá (RS), Brazil (28° 30' South latitude and 53° 30' longitude West). For each soil type and tillage condition, undisturbed soil samples were taken at several places and different periods to obtain natural variation of bulk density, i.e. different initial states of compactness. The uniaxial compression test was done using successive static loads of 12.5, 25, 50, 100, 200, 400 and 800 kPa, during five minutes. Field bulk density values were separated into four classes (1.31 to 1.45; 1.46 to 1.60; 1.61 to 1.75 and 1.76 to 1.80 Mg m⁻³) for Paleudalf soil and into three classes (1.15 to 1.30, 1.31 to 1.45 and 1.46 to 1.60 Mg m⁻³) for Haplortox soil. In the surface layer of the Paleudalf soil, preconsolidation pressure values for conventional tillage were about four times smaller than those for no-tillage, up to bulk density of 1.60 Mg m^{-3} , and about two times for bulk density greater than 1.61 Mg m^{-3} . The Haplortox soil did not show any influence of tillage on preconsolidation pressure values. The Haplortox soil had larger values of compression index. For each soil, compression index values were significantly correlated with bulk density.

Index terms: soil compaction, no-tillage, compression index, preconsolidation pressure.

INTRODUÇÃO

Problemas referentes à compactação de solos estão relacionados com o manejo a que determinado solo foi e, ou, está sendo submetido, com a intensidade de tráfego e com o peso e características das máquinas e equipamentos. Considerando que, nos últimos anos, houve aumento da intensidade de uso do solo e da mecanização, acredita-se que esses problemas sejam encontrados nas lavouras em todo o mundo (Soane & van Ouwerkerk, 1994).

A compactação do solo é resultante do somatório do tempo de permanência e peso da carga e do número de vezes que o solo é submetido a uma nova carga (Håkansson et al., 1988; Håkansson & Medvedev, 1995). Alguns componentes associados às máquinas podem ser adaptados, se entendidas as

suas interações com o solo, tais como: tipo e pressão de inflação dos pneus, carga por eixo e intensidade de tráfego (Håkansson & Voorhees, 1997). Alguns solos têm maior capacidade de suportar cargas, são mais facilmente manejados após períodos de chuva e não têm limitações ao crescimento vegetal (Reinert, 1990). A diferenciação entre tipos de solos é devida aos diferentes estados de agregação, ou seja, à resistência interagregados e intra-agregados, à textura, ao teor de água, à matéria orgânica e às tensões (cargas) que o solo já recebeu no passado (Culley & Larson, 1980; Horn & Lebert, 1994).

Os sistemas de manejo afetam características do solo que influenciam seu comportamento compressivo, tais como: matéria orgânica (Stone & Ekwue, 1995), estrutura (Horn et al., 1988), teor de água e densidade do solo (Reinert, 1990; Dias Júnior,

1994; Kondo & Dias Júnior, 1999a,b). A utilização das máquinas e os sistemas de cultivo devem ser adequados para não serem destruidores das boas características originais de determinado solo.

A curva de compressão do solo tem importância para a determinação de parâmetros que auxiliem a evitar que solos agrícolas sejam excessivamente compactados (Dias Júnior & Pierce, 1996). Essa curva relaciona o índice de vazios (ou densidade do solo) com o logaritmo da carga aplicada sobre o solo. A partir dela, obtém-se a pressão de preconsolidação (σ_p), que é um parâmetro da capacidade do solo para suportar cargas, e o índice de compressão (C_c), que é indicativo da susceptibilidade do solo à compactação (Larson et al., 1980; Holtz & Kovacs, 1981). Pressões abaixo da pressão de preconsolidação causam deformações elásticas (recuperáveis), enquanto pressões acima dela causam deformações plásticas (não-recuperáveis). A primeira reflete a história das tensões (cargas) a que o solo já fora submetido e a segunda, sua susceptibilidade à compactação.

Neste estudo, testou-se a hipótese de que o preparo do solo e o estado de compactação influem nos valores de resistência às deformações plásticas, ou seja, a pressão de preconsolidação e o índice de compressão do solo. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi determinar a pressão de preconsolidação e o índice de compressão de dois solos com texturas e manejos contrastantes, em duas profundidades, e avaliar suas relações com o estado de compactação para cada solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Dois solos de importância agrícola para o estado do Rio Grande do Sul foram utilizados. O primeiro, classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo

distrófico arênico (EMBRAPA, 1999) textura superficial arenosa (Quadro 1) está localizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (29° 45' latitude sul e 53° 42' longitude oeste), em parcelas com sistema plantio direto por oito anos e sistema convencional por 15 anos. Em ambos os sistemas, foram usadas as culturas de milho ou soja na primavera/verão e aveia no outono/inverno. O sistema convencional consistiu de uma aração e duas gradagens. O segundo solo, classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999) textura argilosa, está localizado na região fisiográfica do Planalto Médio do estado do Rio Grande do Sul (28° 30' latitude sul e 53° 30' longitude oeste), foi também utilizado no sistema plantio direto por 10 anos e no convencional por dois anos, manejados com culturas anuais de milho ou soja na primavera/verão e aveia + azevém no outono/inverno.

Cerca de 210 amostras indeformadas, por solo, foram coletadas ao acaso, independentemente da posição na linha ou entrelinha, buscando-se variação natural, no campo, de densidade do solo. As amostras foram coletadas em várias datas, durante os meses de novembro de 1997 e junho de 1998, em duas profundidades (0-2 e 10-12 cm). Escolheram-se essas profundidades para os testes de compressibilidade porque a superfície do solo recebe o tráfego das máquinas e, na profundidade de 10 cm, verifica-se uma camada compactada.

As amostras parcialmente deformadas foram utilizadas para caracterizar fisicamente os solos (Quadro 1), sendo constituídas de blocos de solo que serviram para medir o diâmetro médio geométrico (DMG) de agregados estáveis em água (Kemper & Chepil, 1965); carbono orgânico do solo, pelo método Walkey & Black (Allison, 1965); densidade de

Quadro 1. Carbono orgânico (C) e atributos físicos do solo para os dois solos estudados sob dois sistemas de cultivo e duas profundidades (média de três repetições)

Manejo	Profundidade cm	C dag kg ⁻¹	DMG mm	Dp Mg m ⁻³	LL	LP	IP	g kg ⁻¹		
								Areia	Silte	Argila
Argissolo										
Direto	0-2	1,67	3,00	2,50	19,0	18,0	1,0	741	170	89
	10-12	1,25	3,64	2,56	18,3	NP ⁽¹⁾	-(2)	713	208	79
Convencional	0-2	0,97	0,98	-	-	-	-	-	-	-
	10-12	0,86	1,53	-	-	-	-	-	-	-
Latossolo										
Direto	0-2	1,91	4,06	2,78	44,0	29,0	15,0	211	322	467
	10-12	1,39	2,02	2,78	44,0	29,0	15,0	184	324	492
Convencional	0-2	1,90	4,47	-	-	-	-	-	-	-
	10-12	1,48	3,42	-	-	-	-	-	-	-

DMG = diâmetro médio geométrico; Dp = densidade de partículas; LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade e IP = índice de plasticidade. ⁽¹⁾ não-plástico. ⁽²⁾ não determinado.

partículas (EMBRAPA, 1997), limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade, pelo método Casagrande (Cauduro & Dorfman, 1986), e análise textural, pelo método da pipeta, utilizando NaOH 6% como dispersante químico e agitação mecânica (Gee & Bauder, 1986).

As amostras indeformadas foram coletadas em anéis de 5,35 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura. Em cada tipo de solo, sistema de cultivo e profundidade, procurou-se obter variação natural dos valores de densidade do solo, ou seja, de distinto estado de compactação. Para isso, a coleta de amostras foi realizada em vários locais dentro da mesma área e em várias épocas.

Os valores de densidade do solo (D_s) foram distribuídos em quatro classes, para o Argissolo (1,31 a 1,45; 1,46 a 1,60; 1,61 a 1,75 e 1,76 a 1,80 $Mg\ m^{-3}$), e em três classes, para o Latossolo (1,15 a 1,30; 1,31 a 1,45 e 1,46 a 1,60 $Mg\ m^{-3}$), todas apresentando grau de saturação em água na faixa de 50 a 80% do volume de poros ocupado por água. As distintas classes foram definidas “a posteriori” de acordo com a variação nos valores de D_s e existência de um número razoável de amostras para cada classe estabelecida.

O ensaio de compressão confinada (NBR-12007/90, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990) foi realizado com aplicação de cargas estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa. O tempo final de cada carregamento foi obtido em pré-testes, verificando-se que mais de 99% da compactação foi alcançada com cinco minutos de aplicação de cada carga (Silva et al., 2000). Foram determinados a densidade do solo, o índice de vazios (volume de vazios dividido pelo volume de sólidos) e o grau de

saturação de cada amostra antes e depois de cada ensaio de compressão confinada.

O índice de compressão (C_c) é a inclinação da reta virgem de compressão (Holtz & Kovacs, 1981),

determinado pela relação: $C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1}$, em que “e”

representa o índice de vazios e “ σ ” a pressão normal em pontos situados sobre a curva característica de compressibilidade do solo. O índice de recompressão (C_r) representa a inclinação da curva de recompressão, situada na curva de compressão do solo (Figura 1).

A pressão de preconsolidação (σ'_p) foi determinada pelo método de Casagrande (Holtz & Kovacs, 1981; NBR – 12007/90), com a utilização de um algoritmo gráfico desenvolvido pelos autores. O método consiste em traçar a curva de compressão do solo, marcando-se, no eixo das ordenadas, o índice de vazios do solo e, no eixo das abscissas, o logaritmo da pressão aplicada (Figura 1). Nessa curva, identifica-se o ponto cujo raio de curvatura é mínimo e, por ele, traçam-se uma paralela ao eixo das abscissas e uma tangente à curva. Do ângulo formado entre essas duas retas, traça-se a bissetriz. A abscissa do ponto de intercessão da bissetriz com o prolongamento da reta virgem corresponde à pressão de preconsolidação.

A análise estatística seguiu o modelo fatorial com delineamento inteiramente casualizado. As comparações de médias entre manejos, profundidades, classes de densidade do solo e tipo de solo foram realizadas pela Diferença Mínima Significativa (DMS) com $P \leq 0,05\%$, utilizando o pacote estatístico SAS (1985).

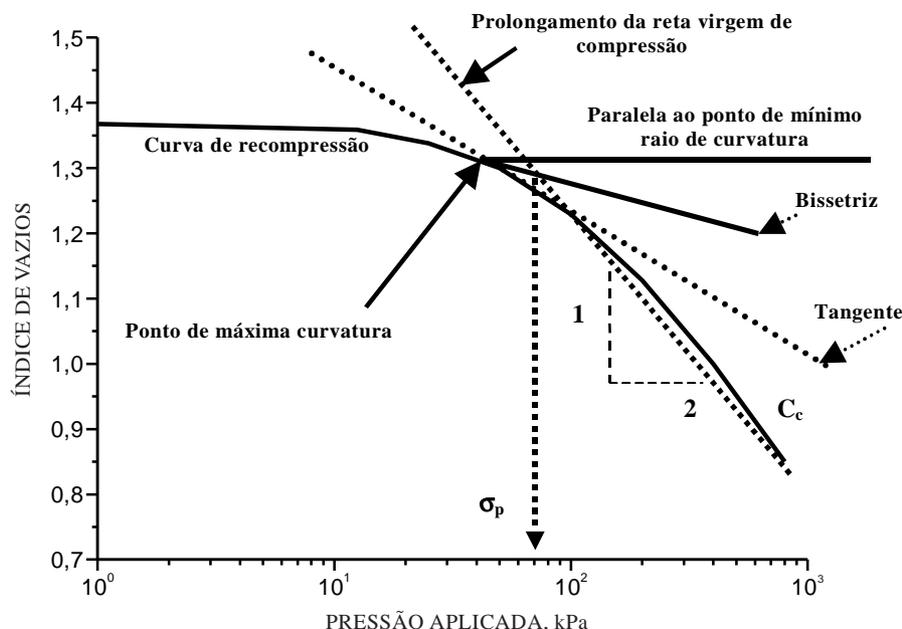


Figura 1. Esquema ilustrativo da determinação da pressão de preconsolidação e do índice de compressão, obtidos da curva de compressão, método de Casagrande.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pressão de preconsolidação (σ'_p) e o índice de recompressão (C_r) refletem a história das cargas a que o solo já foi submetido. São, portanto, dois parâmetros da curva de compressão influenciados pela umidade e pelo estado de compactação do solo.

Para isolar o efeito da umidade do solo na σ'_p e no C_c e comparar solos e sistemas de manejo conforme a densidade do solo, somente os dados referentes às amostras com grau de saturação (S_r) entre 50 e 80 % são discutidos. Para o Argissolo, a σ'_p sofreu influência do estado de compactação e do manejo dentro de cada classe de densidade do solo (D_s), concordando com o observado por Carpenedo (1994). O índice de compressão (C_c) foi influenciado pelo estado de compactação e, de maneira geral, pela profundidade e manejo do solo (Quadro 2).

O preparo do solo diminuiu substancialmente os valores de σ'_p , em todas as classes de D_s , tanto na superfície como na subsuperfície. Comparando os dois sistemas de cultivo, os valores da σ'_p foram cerca de quatro vezes menores nas classes de densidade inferiores a $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$, e de duas vezes menores nas classes de densidades do solo superiores a $1,61 \text{ Mg m}^{-3}$ no sistema convencional em relação ao sistema plantio direto (Quadro 2). Isso pode ser atribuído ao revolvimento anual do solo, que causou uma degradação da estrutura e conseqüente redução na resistência do solo até o início da deformação plástica ou capacidade de suporte do solo.

No Latossolo, o aumento da D_s , da faixa de $1,15$ a $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ para $1,46$ a $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$, fez com que o valor da σ'_p no plantio direto triplicasse na camada superficial e duplicasse na profundidade de 10-12 cm (Quadro 3). Salire et al. (1994) também observaram maiores valores de σ'_p para solos com maiores densidades, em diversos tipos de solos.

Na camada de 10-12 cm do Argissolo e na classe de D_s de $1,31$ a $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, o valor médio de σ'_p para o manejo convencional foi de $15,4 \text{ kPa}$, 4 vezes inferior ao do sistema plantio direto, nessa faixa de D_s . Essa proporção manteve-se na classe de densidade do solo de $1,46$ a $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$. Entretanto, nas classes de D_s maiores que $1,61 \text{ Mg m}^{-3}$, os valores de σ'_p para o sistema de manejo convencional e para o sistema plantio direto não foram significativamente diferentes.

Trabalhando com o mesmo Argissolo, Carpenedo (1994) encontrou diferenças entre o manejo convencional e direto somente quando o solo se encontrava seco (tensão de 300 kPa , S_r não informado). Todavia, as amostras utilizadas pelo autor apresentavam densidades do solo de $1,69 \text{ Mg m}^{-3}$, para o sistema plantio direto, e de $1,63 \text{ Mg m}^{-3}$, para o sistema convencional, o que pode ter anulado o efeito do manejo do solo, pois, quanto maior o estado de compactação, maior sua resistência às pressões externas. Esse fenômeno pode ser atribuído à maior resistência nos pontos de contato entre as partículas unitárias, geralmente o mineral quartzo, e ao alto grau de empacotamento entre as partículas em razão da alta densidade do solo.

Com maior grau de saturação, a relação entre a σ'_p e a D_s foi deslocada para a direita e para baixo (Figura 2). Em outras palavras, o aumento do grau de saturação tornou o solo menos resistente nos valores de $D_s > 1,45 \text{ Mg m}^{-3}$.

Verificou-se que, com D_s menores que $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, para faixas de grau de saturação de 31 a 45% e de 46 a 60%, os valores de σ'_p aproximaram-se consideravelmente. Entretanto, para valores de D_s maiores que $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, houve maior distanciamento das duas curvas, indicando que o grau de saturação teve um efeito maior quando o solo estava em estado de compactação mais elevado. Comportamento semelhante foi observado para o Latossolo.

Quadro 2. Valores médios de pressão de preconsolidação (σ'_p em kPa) e índice de compressão (C_c) para o Argilossolo, considerando a densidade do solo, com grau de saturação de 50 a 80% do volume de poros

Profundidade	Manejo	Densidade do solo (Mg m^{-3})							
		1,31-1,45		1,46-1,60		1,61-1,75		1,76-1,80	
		σ'_p	C_c	σ'_p	C_c	σ'_p	C_c	σ'_p	C_c
cm									
0-2 ⁽¹⁾	Direto	70,9 aB	0,20 aA	73,1 aB	0,16 aAB	115,6 aA	0,15 aC	132,6 aA	0,06 bD
	Convencional	17,3 bA	0,22 aA	17,2 bA	0,20 aA	48,7 bA	0,14 aA	61,7 bA	0,21 aA
10-12	Direto	62,3 aA	0,24 aA	91,7 aA	0,11 bB	98,5 aA	0,10 aB	105,4 aA	0,09 aB
	Convencional	15,4 bB	0,25 aA	24,5 aB	0,22 aB	76,5 aA	0,13 aC	74,9 aA	0,09 aD

⁽¹⁾ Não houve diferença estatística entre as médias de σ'_p e C_c entre as profundidades dentro de cada sistema de manejo do solo. Médias seguidas de mesma letra minúscula, na coluna, que comparam sistemas de manejo dentro de cada profundidade, não diferem entre si pelo teste DMS a 5%. Médias seguidas de mesma letra maiúscula, na linha, que comparam classes de densidade do solo para uma mesma profundidade e manejo, não diferem entre si pelo teste DMS a 5%. Na construção deste quadro, foram utilizados 210 testes de compressibilidade.

Quadro 3. Valores de pressão de preconsolidação (σ'_p , em kPa) e índice de compressão (C_c) para o Latossolo, considerando a densidade do solo, com grau de saturação de 50 a 80% do volume de poros

Profundidade	Manejo	Densidade do solo (Mg m^{-3})					
		1,15-1,30		1,31-1,45		1,46-1,60	
		σ'_p	C_c	σ'_p	C_c	σ'_p	C_c
cm							
0-2 ⁽¹⁾	Direto	50,8 b	0,37 a	99,4 b	0,34 a	168,3 a	0,25 b
	Convencional	68,6 b	0,39 a	98,0 ab	0,37 a	164,3 a	0,22 b
10-12	Direto	70,5 b	0,33 a	100,5 ab	0,31 a	131,9 a	0,27 a
	Convencional	-(²)	-	68,1 b	0,27 a	138,2 a	0,25 a

⁽¹⁾ Não houve diferença estatística entre as médias de σ'_p e C_c entre as profundidades dentro de cada sistema de manejo do solo e entre os sistemas de manejo em cada profundidade. Médias seguidas de mesma letra comparam classes de densidade do solo para uma mesma profundidade e manejo e não diferem entre si pelo teste DMS a 5%. ⁽²⁾ Não determinado. Na construção deste quadro, foram utilizados 210 testes de compressibilidade.

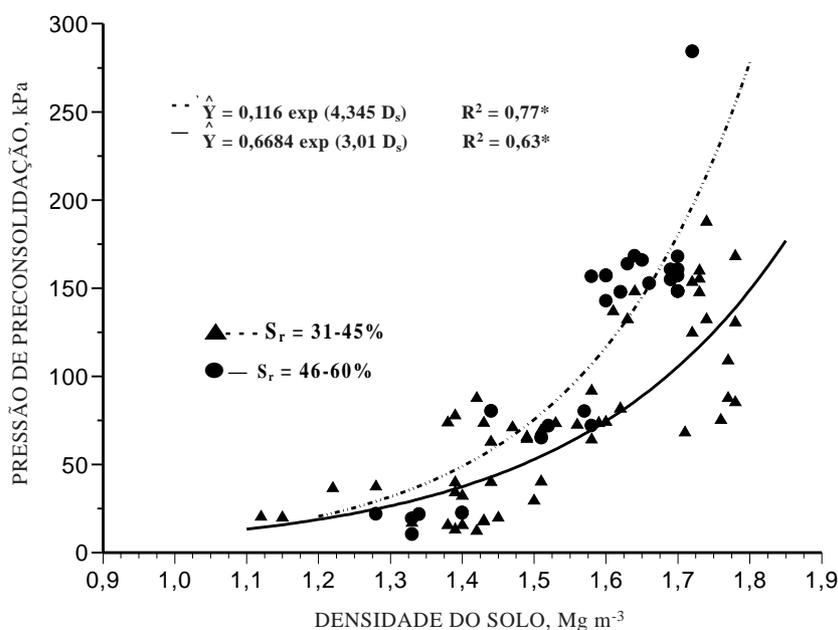


Figura 2. Valores de pressão de preconsolidação para o Argissolo, considerando a densidade do solo para os graus de saturação (S_r) de 31 a 45% e 46 a 60%.

A curva de compressão para o Latossolo menos compactado (índice de vazios próximo a 1,5) apresentou maior curvatura e o decréscimo do índice de vazios foi bem superior, se relacionado com o mesmo solo mais compactado (índice de vazios próximo a 0,8, figura 3). No Argissolo, na condição de menor estado de compactação (índice de vazios de 0,9) e após a aplicação da maior pressão (800 kPa), o novo valor de índice de vazios era próximo de 0,4, correspondendo a uma redução de 2,25 vezes. Com estado de compactação mais elevado, a redução foi de 0,4 para 0,3.

O maior índice de compressão (C_c) no Argissolo foi de 0,25 no sistema convencional e de 0,24 no plantio direto, ambos na profundidade de 10-12 cm e na classe de D_s de 1,31 a 1,45 Mg m^{-3} , indicando maior susceptibilidade à compactação nessa faixa de densidade do solo (Quadro 2). Isso pode ser atribuído ao maior espaço de vazios e, como consequência, ao menor número de pontos de contato entre as partículas sólidas, que resultou em menor atrito ao deslocamento e rearranjo das partículas do solo.

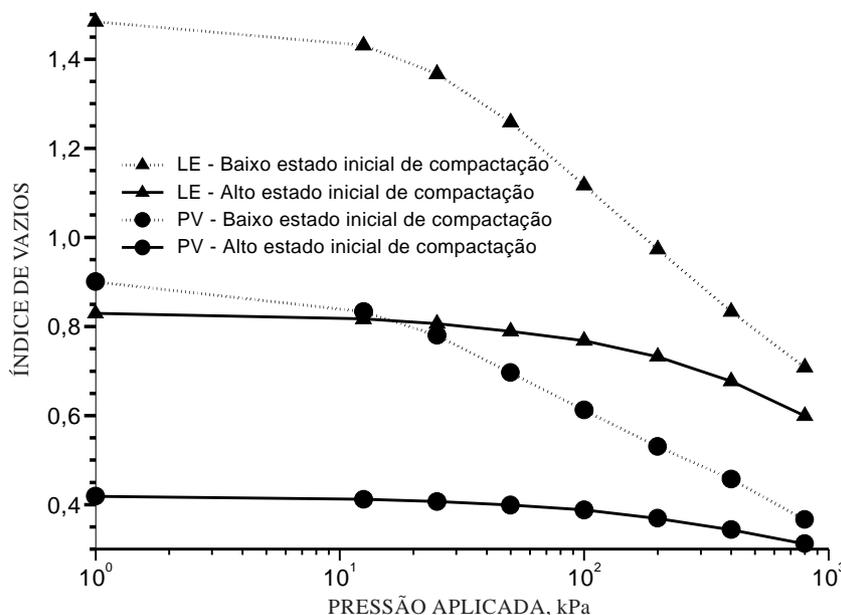


Figura 3. Curvas de compressão do Argissolo e Latossolo, considerando o estado de compactação.

Quanto ao Latossolo, não houve diferença significativa entre as profundidades para o plantio direto (Quadro 3). O aumento da faixa de D_s de 1,15 a 1,30 Mg m^{-3} para 1,46 a 1,60 Mg m^{-3} causou redução no C_c de 1,5 vez, para os dois manejos e profundidades. Considerando a característica argilosa desse solo (467 g kg^{-1} de argila), valores de densidade do solo acima de 1,50 Mg m^{-3} foram considerados críticos ao desenvolvimento radicular (Camargo & Alleoni, 1997).

Segundo esses resultados, o revolvimento do solo e a menor densidade do solo resultaram em menor σ'_p e maior C_c , ocasionando deformações plásticas com aplicação de pequenas pressões no solo e maior inclinação da reta virgem de compressão. Portanto, a maior D_s no plantio direto fez com que o solo suportasse maiores pressões e reduzisse as deformações elásticas.

CONCLUSÕES

1. A pressão de preconsolidação aumentou de forma exponencial com o aumento da densidade do solo, para determinada classe de grau de saturação.

2. No Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, o revolvimento do solo provocou uma redução nos valores da pressão de preconsolidação de até quatro vezes, na faixa de densidade do solo de 1,31 a 1,60 Mg m^{-3} , comparado ao plantio direto.

3. No Latossolo Vermelho distrófico típico, o preparo convencional do solo adotado neste experimento não reduziu os valores da pressão de preconsolidação e índice de compressão.

4. Em maiores densidades do solo, a pressão de preconsolidação aumentou e o índice de compressão diminuiu, ocasionando maior resistência do solo até o início da deformação plástica.

5. O aumento da densidade do solo de 1,15 Mg m^{-3} para 1,46 Mg m^{-3} reduziu o índice de compressão em torno de 60%, para o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico. No Argissolo Vermelho distrófico arênico, o aumento da densidade do solo de 1,31 Mg m^{-3} para 1,80 Mg m^{-3} reduziu o índice de compressão em torno de 35%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos bolsistas, Adriano Zanette, Raquel Bastos Rubin e Juliano Souto, pela ajuda na execução deste trabalho.

LITERATURA CITADA

- ALLISON, L.E. Organic carbon. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D. & WHITE, J.L., eds. Methods of soil analysis. Part 2. Madison, American Society of Agronomy, 1965 p.1367-1378.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Ensaio de adensamento unidimensional. NBR - 12007. Rio de Janeiro, 1990. 13p.
- CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba, Edição dos Autores, 1997. 133p.

- CARPENEDO, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 106p. (Tese de Doutorado)
- CAUDURO, F.A. & DORFMAN, R. Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem. Porto Alegre, Pallotti, 1986. 216p.
- CULLEY, J.L.B. & LARSON, W.E. Susceptibility to compression of a Clay Loam Haplaquoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:562-567, 1980.
- DIAS JUNIOR, M.S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. Michigan, East Lansing State University, 1994. 114p. (Tese de Doutorado)
- 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. Serviço Nacional de Levantamento e Classificação dos Solos-SNLCs, Manual e métodos de análise do solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1.* 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.383-411.
- HÅKANSSON, I. & MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. *Soil Till. Res.*, 35:85-97, 1995.
- HÅKANSSON, I. & VOORHEES, W.B. Chapter on soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. & STEWART, B.A., eds. *Methods for assessment of soil degradation.* Boca Raton, Lewis Publishers, 1997. 576p.
- HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. & RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. *Soil Till. Res.*, 11:239-282, 1988.
- HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733p.
- HORN, R. & LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production.* Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69.
- HORN, R., DOMIZAL, H., SLOWINSKA-JURKIEWIEZ, A. & van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. *Soil Till. Res.*, 35:23-36, 1988.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of agregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D. & WHITE, J.L., eds. *Methods of soil analysis. Part 1.* Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.495-509.
- KONDO, M.K. & DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:211-218, 1999a.
- KONDO, M.K. & DIAS JUNIOR, M.S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:497-506, 1999b.
- LARSON, W.E., GUPTA, S.C. & USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:450-457, 1980.
- REINERT, D.J. Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf. Michigan, Michigan State University. 1990. 128p. (Tese de Doutorado)
- SALIRE, E.V.; HAMMEL, J.E. & HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsolis under short - duration loading. *Soil Till. Res.*, 31:235-248, 1994.
- SAS Institute. SAS User's guide: statistics. 5.ed. Cary, N.C., 1985. 956p.
- 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.
- SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production.* Amsterdam, Elsevier, 1994. p.01-21.
- STONE, R.J. & EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. *J. Agric. Eng. Res.*, 60:15-24, 1995.