

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

SUSCETIBILIDADE À COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO E DE UM PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO⁽¹⁾

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

RESUMO

A compactação de solos agrícolas resulta de interações máquina-solo que influenciam as propriedades físicas e biológicas do solo, bem como o crescimento e produtividade das plantas. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi determinar o índice de compressão, a pressão de preconsolidação e a deformação de um Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e de um Podzólico Vermelho-Amarelo (PV), com diferentes estados iniciais de compactação e de grau de saturação em água. Para tal, foram utilizadas amostras indeformadas, coletadas em dois solos e em duas profundidades, em sistema plantio direto e preparo convencional de solo, em vários pontos e épocas, dentro de cada área e tipo de manejo. Com isso, obteve-se ampla variação natural dos valores de densidade do solo, correspondentes aos diferentes estados iniciais de compactação e grau de saturação. As amostras indeformadas foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, realizado com aplicação de pressões estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa, mantendo cada pressão constante por cinco minutos. Esse tempo foi determinado em pré-testes, observando-se que 99% da deformação máxima ocorreu nesse tempo. A deformação do solo apresentou comportamento diferenciado para cada solo. No LE, sob baixos graus de saturação (< 30%), a relação entre deformação e densidade inicial foi curvilínea, enquanto, para graus de saturação mais elevados, foi praticamente linear. Já no PV, aquela relação foi curvilínea para graus de saturação menores que 30% e maiores que 60%, enquanto, nas saturações intermediárias (30 a 60%), o comportamento observado foi linear. O índice de compressão relacionou-se negativamente com a densidade do solo inicial nos dois solos e com o grau de saturação no solo PV. Para níveis de densidade do solo inicial maiores que 1,45 Mg m⁻³, o LE apresentou maior suscetibilidade à compactação em grau de saturação próximo a 70%, enquanto, quando menos

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria-UFSM. Pesquisa parcialmente financiada com recursos do CNPq/FINEP (Projeto PRONEX 60/97). Recebido para publicação em maio de 1999 e aprovado em fevereiro de 2000.

⁽²⁾ Pós-graduando em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: a9760360@alunop.ufsm.br

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Solos-CCR, UFSM. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). Bolsista do CNPq. E-mails: reinert@cer.ufsm.br; reichert@cer.ufsm.br

compactado (densidade do solo inicial $< 1,30 \text{ Mg m}^{-3}$), a maior suscetibilidade ocorreu sob menores saturações, próximas a 50%. As equações de regressão múltipla para a pressão de preconsolidação, utilizando somente valores de densidade do solo inicial e grau de saturação, apresentaram coeficientes de determinação (R^2) baixos (0,28, para o PV, e 0,32, para o LE), apesar de significativos, indicando a necessidade de incorporação de outras variáveis nesses modelos.

Termos de indexação: compressibilidade, índice de compressão, pressão de preconsolidação, densidade do solo, grau de saturação em água.

SUMMARY: *SUSCEPTIBILITY TO COMPACTION OF A HAPLORTOX AND A PALEUDALF*

Soil compaction of the agricultural soils is a result of soil machine interactions, which influence physical and biological soil properties and their relations with crop growth and yield. The objective of this study was to determine the compression index, the preconsolidation pressure and the soil strain of a Haplortox (LE) and a Paleudalf (PV), with different initial state of compaction and water saturation. Undisturbed soil samples were collected in two soils and at two depths, at no tillage and conventional tillage, at several locations and different times to obtain a natural variation of bulk density, corresponding to different initial levels of compactness and water saturation. For the uniaxial compression test, successive static loads of 12.2; 25; 50; 100; 200; 400 and 800 kPa were used, during five minutes for each load. This was determined at previous tests, where 99% of the soil strain had occurred at the time. Soil strain showed differentiated behaviors for each soil. For soil Haplortox, under low water saturation ($< 30\%$), the relation for strain versus initial bulk density was curvilinear, whereas for higher water saturation, the relation was practically linear. For the Paleudalf, the relation was curvilinear for low ($< 30\%$) and high ($> 60\%$) water saturation, whereas for the intermediate saturation (30 to 60%) the model was linear. The compression index correlated negatively with the initial bulk density and with water saturation in PV. For high initial bulk density ($> 1.45 \text{ Mg m}^{-3}$), the Haplortox had greater susceptibility to compaction when water saturation was near 70%, whereas when the same soil had low compaction (bulk density $< 1.30 \text{ Mg m}^{-3}$), the major susceptibility occurred under lower water saturation (near 50%). Multiple regression equations for preconsolidation pressure, using initial bulk density and water saturation, had low determination coefficient (0.28 for PV and 0.32 for LE), although significant, which indicates the need for incorporation of more variables in these models.

Index terms: compressibility, compression index, preconsolidation pressure, bulk density, water saturation.

INTRODUÇÃO

A compactação do solo, devida à aplicação de cargas, resulta em modificações na estrutura do solo, com aumento da densidade e da resistência do solo (Soane & van Ouwerkerk, 1994; Kondo & Dias Junior, 1999a,b). Indiretamente, a compactação do solo afeta a infiltração e condutividade de água, temperatura e aeração do solo. Em função disso, a compactação do solo tem provocado perda de produtividade do solo, levando-o à degradação.

Assim, nos sistemas de manejo do solo, devem-se adequar sistemas de cultivo e práticas de preparo do solo que mantenham a estrutura do solo favorável ao crescimento das plantas. Hakansson & Voorhees (1997) consideram a intensidade do tráfego e as características da máquina (massa, carga por eixo, tipo de pneus e pressão de inflação) como as principais causas da compactação dos solos agrícolas. O processo de compactação é influenciado, ainda, pela matéria orgânica (Stone & Ekwue, 1995), pela estrutura (Horn et al., 1988), pelo conteúdo de água

(Reinert, 1990; Dias Junior, 1994; Kondo & Dias Junior, 1999a,b) e pela densidade do solo (Reinert, 1990; Carpenedo, 1994).

A curva de compressão do solo permite estimar parâmetros que auxiliam a análise do processo de compactação dos solos agrícolas. Essa curva relaciona o índice de vazios (ou densidade do solo) com o logaritmo da pressão aplicada no solo e, a partir dela, obtém-se a pressão de preconsolidação (σ_p), que é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (Dias Junior & Peirce, 1996); e o índice de compressão (Cc), que é um indicativo da suscetibilidade do solo à compactação (Larson et al., 1980; Holtz & Kovacs, 1981). A aplicação no solo de pressões menores do que a pressão de preconsolidação causa deformações elásticas (recuperáveis), enquanto a aplicação de pressões maiores causa deformações plásticas, não-recuperáveis (Holtz & Kovacs, 1981). A pressão de preconsolidação reflete as tensões a que o solo já foi submetido, enquanto o índice de compressão revela a suscetibilidade do solo à compactação.

A deformação do solo (dh/h) é definida como sendo a diferença entre a altura inicial da amostra e a altura no final da aplicação de cada pressão, dividida pela altura inicial da amostra (Holtz & Kovacs, 1981). A deformação do solo tem uma relação direta com a porosidade total do solo, especialmente a macroporosidade, indicando que, quanto maiores os valores de deformação, maiores serão as reduções de macroporosidade e porosidade total do solo. A deformação do solo pode ser considerada como outra maneira de representar o efeito da aplicação de pressões no solo.

O índice de compressão (Cc) indica a variação do índice de vazios ou da densidade do solo por unidade de pressão aplicada. O Cc é determinado pela inclinação da reta de compressão virgem do solo. Essa porção da curva de compressão indica deformações irreversíveis no solo. Salire et al. (1994), estudando cinco tipos de solos, verificaram que o Cc aumentou com o incremento da umidade gravimétrica do solo de 0,05 até 0,20 kg kg⁻¹, tendo em 0,20 kg kg⁻¹ ocorrido o valor médio máximo de Cc (0,71). Todavia, o aumento da umidade de 0,20 para 0,25 kg kg⁻¹ reduziu os valores de Cc para 0,56, sendo similar ao obtido com 0,15 kg kg⁻¹ de umidade. Da mesma forma, Dias Junior (1994) encontrou aumento do Cc até umidade de aproximadamente 0,20 kg kg⁻¹, decaindo a partir dessa; enquanto, na umidade gravimétrica de 0,40 kg kg⁻¹, os valores de Cc foram semelhantes àqueles do solo mais seco (cerca de 0,10 kg kg⁻¹ de umidade).

Segundo resultados encontrados por Macedo (1993), os maiores incrementos de densidade do solo ocorreram quando o solo apresentava densidade inicial mais baixa (1,53 Mg m⁻³), comparado com um estado de compactação mais elevado (1,73 Mg m⁻³). Para o autor, quando foram comparadas as

deformações dentro de cada estado inicial de compactação, os maiores incrementos de densidade do solo foram verificados a partir da pressão de 100 kPa. Segundo Carpenedo (1994), as pressões médias normalmente aplicadas sobre a superfície do solo pelos pneus de tratores e colheitadeiras estão entre 100 e 200 kPa, enquanto as carretas agrícolas exercem pressões que, dependendo da carga, podem chegar a valores próximos de 600 kPa.

Como visto anteriormente, a deformação do solo e a suscetibilidade do solo à compactação estão relacionadas com o estado inicial de compactação e com a quantidade de água no solo. Resultados apresentados por diversos autores indicam que existe um conteúdo de água no solo ótimo para ocorrer a compactação (Salire et al., 1994; Dias Junior, 1994; Kondo & Dias Junior, 1999a,b).

O objetivo deste trabalho foi quantificar o índice de compressão, a pressão de preconsolidação e a deformação de um Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e de um Podzólico Vermelho-Amarelo (PV), com diferentes estados iniciais de compactação e de grau de saturação em água.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo, utilizaram-se amostras de dois solos de importância agrícola para o estado do Rio Grande do Sul: um Podzólico Vermelho-Amarelo (Paleudalf), PV, textura superficial arenosa, localizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, 29° 45' de latitude sul e 53° 42' de longitude a oeste de Greenwish, e um Latossolo Vermelho-Escuro (Haplortox), LE textura argilosa, localizado em uma lavoura comercial no município de Ibirubá, 28° 30' de latitude sul e 53° 30' de longitude a oeste de Greenwish.

Nos dois solos, as amostras foram coletadas em parcelas com sistema plantio direto (8 anos, para o PV, e 10 anos, para o LE) e em parcelas sob sistema convencional de preparo do solo, manejadas com culturas anuais de milho ou soja na primavera/verão e aveia + azevém no outono/inverno. O quadro 1 apresenta o teor de carbono e algumas características físicas dos solos estudados.

As amostras indeformadas foram coletadas em anéis de 0,0535 m de diâmetro e 0,02 m de altura, em duas profundidades (0 a 0,02 m e 0,10 a 0,12 m de profundidade), em vários pontos e épocas, dentro de cada área e tipo de manejo, para obter variação natural dos valores de densidade do solo inicial (ds_i), ou seja, diferentes estados iniciais de compactação. Para obter a variação do grau de saturação inicial em água, as amostras foram coletadas em diferentes épocas, algumas foram saturadas em água durante 24 horas e submetidas à sucção em mesa de tensão,

Quadro 1. Atributos físicos e teor de carbono orgânico, em duas profundidades, de um Podzólico Vermelho-Amarelo(PV) e de um Latossolo Vermelho-Escuro (LE), em dois sistemas de cultivo para os dois solos estudados (média de três repetições)

Solo	Preparo	Profundidade	DMG	C	ds	Dp	LL	LP	IP	Areia	Silte	Argila
		m	mm	g kg ⁻¹	Mg m ⁻³					g kg ⁻¹		
PV	Direto	0-0,02	3,00	16,7	1,54	2,50	19,0	18,0	1,0	741	170	89
		0,10-0,12	3,64	12,5	1,69	2,56	18,3	NP ⁽¹⁾	-- ⁽²⁾	713	208	79
	Convencional	0-0,02	0,98	9,7	1,49	--	--	--	--	--	--	--
		0,10-0,12	1,53	8,6	1,67	--	--	--	--	--	--	--
LE	Direto	0-0,02	4,06	19,1	1,31	2,78	44,0	29,0	15,0	211	322	467
		0,10-0,12	2,02	13,9	1,41	2,78	44,0	29,0	15,0	184	324	492
	Convencional	0-0,02	4,47	19,0	1,47	--	--	--	--	--	--	--
		0,10-0,12	3,42	14,8	1,48	--	--	--	--	--	--	--

DMG = diâmetro médio geométrico; C = carbono orgânico do solo; ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas; LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade e IP = índice de plasticidade; ⁽¹⁾ NP = não-plástico, ⁽²⁾ não determinado.

nos potenciais de 1 e 6 kPa, e na panela de pressão, nos potenciais de 33, 100 e 500 kPa, e outras amostras foram colocadas em caixas de papelão com pequenos orifícios, permitindo a perda de umidade de maneira lenta e de forma homogênea. Realizaram-se cerca de 560 testes de compressibilidade, com número de repetições variado para cada classe de densidade do solo inicial e grau de saturação. Os resultados apresentados nas figuras referem-se às duas profundidades de coleta de amostras e aos dois manejos do solo.

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado segundo a norma brasileira de adensamento-NBR, 12007/90 (ABNT, 1990) com aplicação de pressões

estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa. O tempo final de cada carregamento foi determinado em pré-testes, verificando-se que, no PV, mais de 99% da deformação máxima foi alcançada em cinco minutos de aplicação de cada pressão (Figura 1). Para o LE, assumiu-se o mesmo tempo de aplicação de cada pressão, concordando com Carpenedo (1994). Foram determinados a densidade do solo, o índice de vazios e o grau de saturação de cada amostra antes e depois de cada ensaio de compressão uniaxial.

O índice de compressão (Cc) foi determinado por meio da inclinação da reta de compressão virgem, e a pressão de preconsolidação foi determinada pelo método de Casagrande (Holtz & Kovacs, 1981). Este

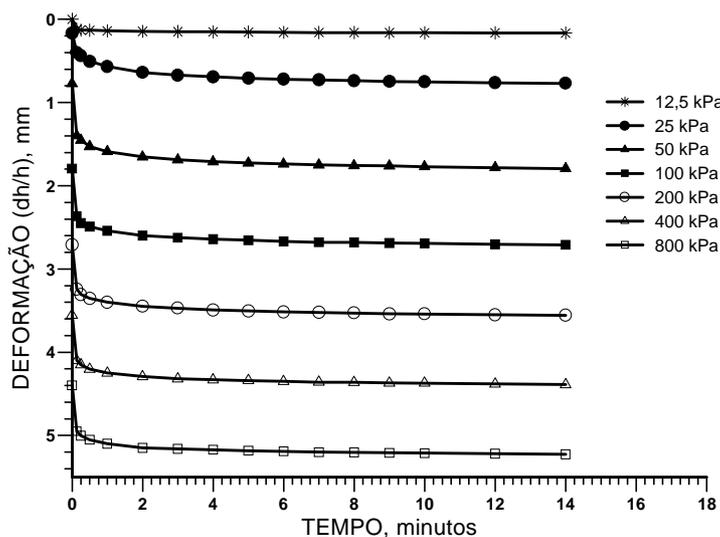


Figura 1. Deformação do solo (dh/h) versus tempo de aplicação de cada pressão de um Podzólico Vermelho-Amarelo, grau de saturação de 80% e densidade do solo inicial de 1,30 Mg m⁻³, na profundidade de 0 a 0,02 m.

método consiste em traçar a curva de compressão do solo, marcando-se, no eixo das ordenadas, o índice de vazios do solo (esse parâmetro é adimensional) e, no eixo das abscissas, o logaritmo da pressão aplicada. Nessa curva, identifica-se o ponto de raio mínimo de curvatura e, por ele, traça-se uma paralela ao eixo das abscissas e uma tangente à curva de compressão do solo. Do ângulo formado entre essas duas retas, traça-se a bissetriz, correspondendo a abscissa do ponto de intercessão da bissetriz com o prolongamento da reta de compressão virgem à pressão de preconsolidação (σ_p).

A deformação do solo (dh/h), após a aplicação de cada pressão, foi determinada pela diferença entre a altura inicial da amostra e a altura no final da aplicação de cada pressão, dividida pela altura inicial da amostra (Holtz & Kovacs, 1981). A altura no final da aplicação de cada pressão foi obtida diretamente na leitura do defletômetro e a altura inicial era considerada a altura da amostra.

Os resultados foram submetidos à análise de regressão simples e múltipla para as variáveis deformação do solo e índice de compressão, considerando a densidade inicial do solo e grau de saturação em água. Utilizaram-se o pacote estatístico SAS e o editor gráfico PLOT-IT.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No PV, na classe de saturação menor que 15% (Figura 2), a máxima deformação ocorreu na maior pressão aplicada (800 kPa) e foi de 0,30, quando o solo estava com uma densidade do solo inicial (ds_i) de 1,10 Mg m⁻³. Nessa mesma pressão, as deformações diminuíram linearmente na medida em que a ds_i aumentava, chegando a valores de 0,05, quando a ds_i foi igual a 1,70 Mg m⁻³. Comparando com as outras classes de grau de saturação, a máxima deformação ficou em torno de 0,30 e esteve fortemente associada ao estado inicial de compactação. Na menor pressão aplicada (12,5 kPa), praticamente não ocorreu nenhuma deformação do solo, mesmo com ds_i próximas a 1,10 Mg m⁻³, concordando com resultados apresentados por Reinert (1990).

Para o grau de saturação entre 15 e 30%, as curvas de deformação do solo tiveram uma rápida redução até próximo a ds_i de 1,65 Mg m⁻³, estabilizando a partir dessa (Figura 2). Reinert (1990), em um solo siltoso, com grau de saturação de 20 a 30%, encontrou comportamento similar da curva de deformação versus densidade do solo inicial, apresentada para o grau de saturação de 15 a 30%; porém, a estabilização das deformações ocorreu nas ds_i próximas a 1,35 Mg m⁻³. Nas faixas de grau de saturação de 30 a 45% e de 45 a 60%, os valores de deformação do solo decresceram linearmente, em geral, até os maiores valores de ds_i . Isso ocorreu

mesmo quando o solo já apresentava um valor elevado de densidade do solo inicial.

O comportamento das curvas, no grau de saturação de 60 a 75%, foi similar àquelas verificadas para o grau de saturação de 15 a 30%, provavelmente devido à pequena porosidade de aeração, sendo que esses poros são ocupados rapidamente pela massa de sólidos na compactação; após saturado, o solo só terá compactação adicional pela expulsão da água no solo. Quando as amostras apresentaram grau de saturação > 75%, a deformação média, em todas as pressões, foi menor nas ds_i menores que 1,65 Mg m⁻³, comparando com os demais graus de saturação.

Em geral, o PV resistiu a pressões aplicadas de até 50 kPa, em qualquer classe de grau de saturação e para qualquer ds_i (dados não apresentados). Todavia, as pressões médias no solo aplicadas pelas rodas dos tratores e colheitadeiras geralmente excedem 80 kPa (Hakansson & Medvedev, 1995), podendo provocar deformações no solo, como pode ser visualizado na figura 2, para pressões maiores que 100 kPa.

Para o LE, o grau de saturação teve efeito na amplitude das curvas de deformação versus densidade do solo inicial (Figura 3). Para o grau de saturação < 15%, a máxima deformação foi de aproximadamente 0,25, para a ds_i de 1,02 Mg m⁻³, decrescendo curvilinearmente para as demais ds_i . Da mesma forma, quando o grau de saturação ficou entre 15 e 30%, a deformação nas pressões acima de 100 kPa mostrou decréscimo curvilinear com o aumento da densidade do solo inicial. Para os graus de saturações menores que 30%, as deformações foram pequenas nas amostras com densidade inicial mais altas (1,40 a 1,50 Mg m⁻³), em virtude, provavelmente, de sua história de tensões que a levaram a um grau de compactação mais elevado e suficientemente grande para resistir à compressão.

Para o grau de saturação entre 30 e 45%, a deformação decresceu de forma curvilínea nas pressões intermediárias (100 e 200 kPa) e, na pressão de 800 kPa, o decréscimo aproximou-se à linearidade (Figura 3). Na classe de grau de saturação de 45 a 60%, ocorreram as maiores deformações para o LE, indicando ser essa a faixa do grau de saturação ótimo para que ocorram as deformações máximas.

De maneira geral, para o LE, para graus de saturação mais baixos (menor do que 30%), o modelo das curvas foi curvilíneo e, para graus de saturação mais altos (de 30 a 75%), o modelo foi praticamente linear (Figura 3). Entretanto, para o PV, o modelo foi curvilíneo para grau de saturação menor que 30% e maior do que 60%, enquanto, nos graus de saturações intermediárias (30 a 60%), o modelo foi linear (Figura 2).

Para verificar a influência do grau de saturação na deformação do solo, utilizaram-se duas classes de densidade do solo inicial e duas pressões (100 e

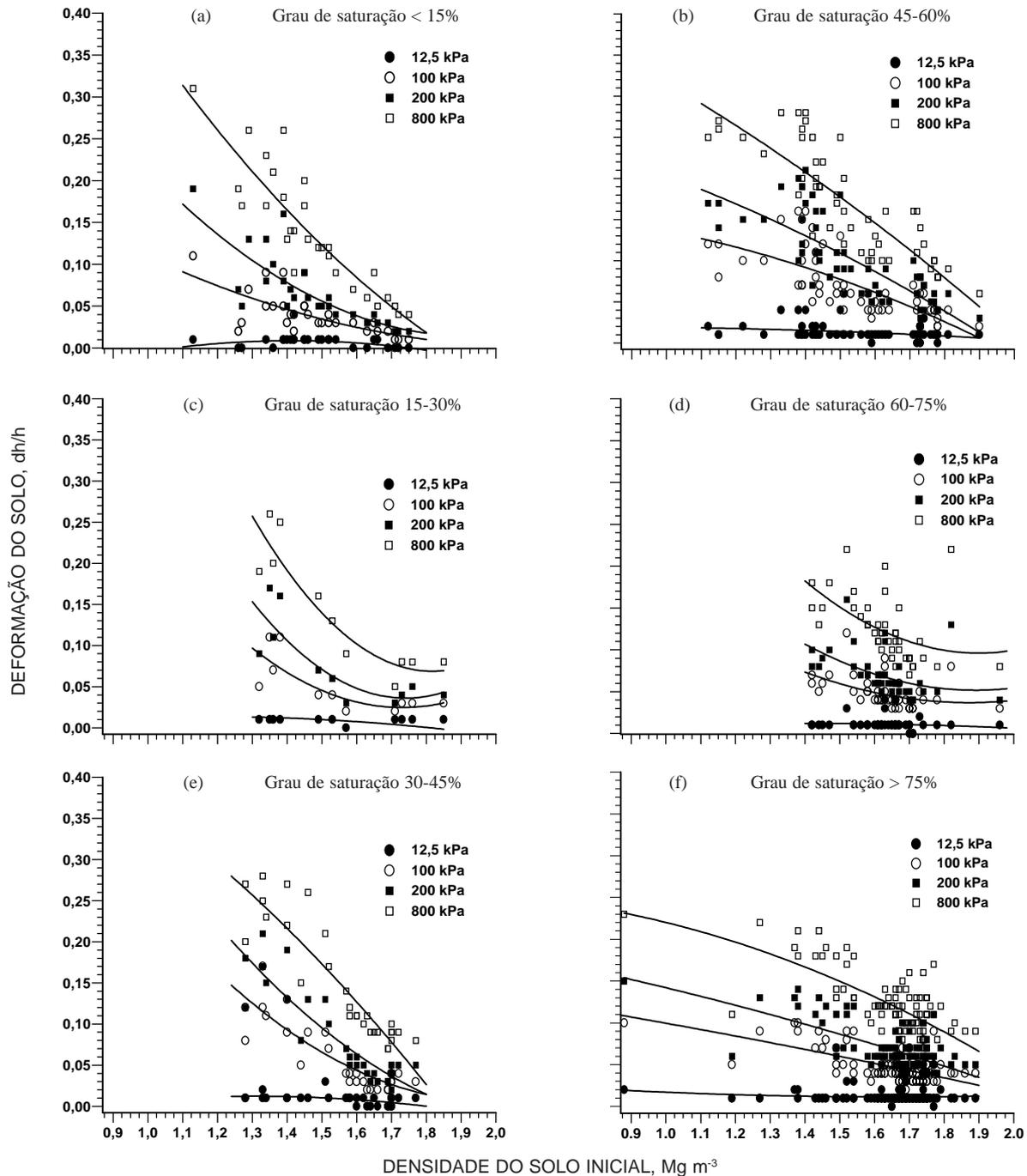


Figura 2. Deformação do solo (dh/h) versus densidade do solo inicial de um Podzólico Vermelho-Amarelo, para quatro pressões aplicadas e divididas em várias classes de grau de saturação.

200 kPa). Essas pressões foram utilizadas pelo fato de a maioria das máquinas agrícolas convencionais utilizadas no Brasil exercer essas pressões no solo. Para o PV, com ds_i entre 1,26 e 1,38 Mg m⁻³, a deformação máxima ocorreu para o grau de saturação entre 40 e 60%, sendo menor para os graus de saturações maiores (Figuras 4a e 5a). Nas ds_i entre 1,68 a 1,71 Mg m⁻³, as deformações foram menores e não se observou o comportamento parabólico como

ocorreu para densidade do solo mais baixa, indicando que o aumento da quantidade de água no solo aumentará a possibilidade de ocorrer deformação do solo.

No LE, as curvas ajustadas entre a deformação do solo e o grau de saturação foram crescentes, independentemente do estado inicial de compactação (Figuras 4b e 5b). Reinert (1990) verificou, em um solo

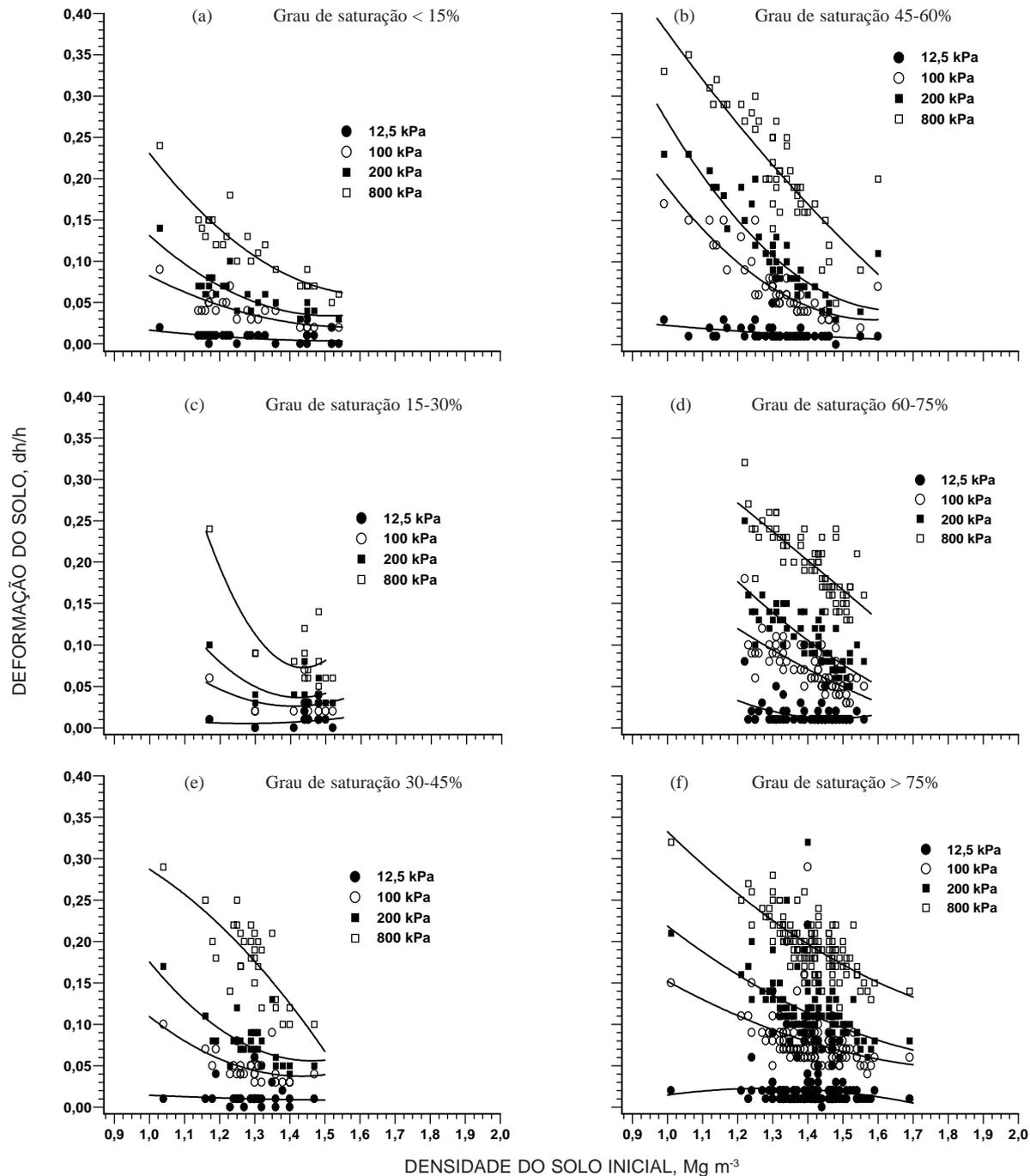


Figura 3. Deformação do solo (dh/h) versus densidade do solo inicial de um Latossolo Vermelho-Escuro, para quatro pressões aplicadas e divididas em classes de grau de saturação.

com 470 g kg⁻¹ de silte e 140 g kg⁻¹ de argila (Hapludalf), que a deformação máxima ocorreu com grau de saturação próximo a 40%, quando a ds_i era igual a 1,29 Mg m⁻³, e com grau de saturação igual a 60%, quando o solo apresentava ds_i em torno de 1,40 Mg m⁻³. Isso sugere que, em solos com estado de compactação mais elevado, há necessidade de maior conteúdo de água para obter as deformações máximas.

Ao relacionar o índice de compressão (C_c) com a ds_i , para cada faixa de grau de saturação, verificou-se que o C_c apresentou uma relação linear com o estado inicial de compactação (Figura 6). Para o grau de saturação menor que 15% e para uma mesma ds_i , o PV apresentou maiores valores de C_c do que o LE. Isso se deve ao maior teor de matéria orgânica (Quadro 1) e à maior força de coesão do LE, visto que o LE apresenta 467 g kg⁻¹ de argila e o PV, somente 89 g kg⁻¹.

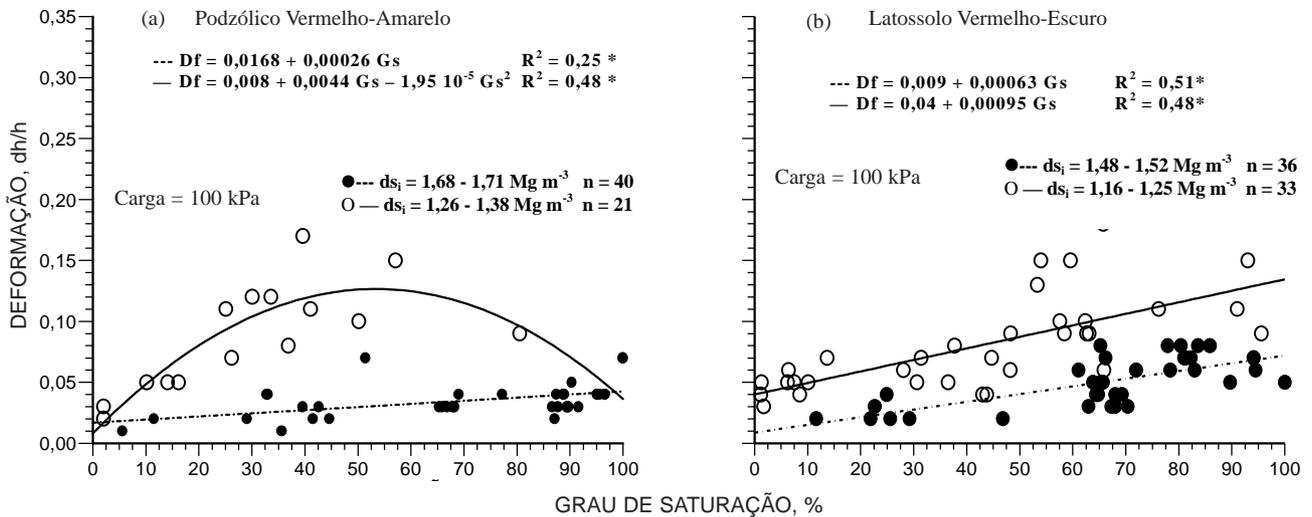


Figura 4. Deformação do solo (dh/h), considerando o grau de saturação (Gs) para uma pressão de 100 kPa e duas faixas de densidade do solo inicial (ds_i).

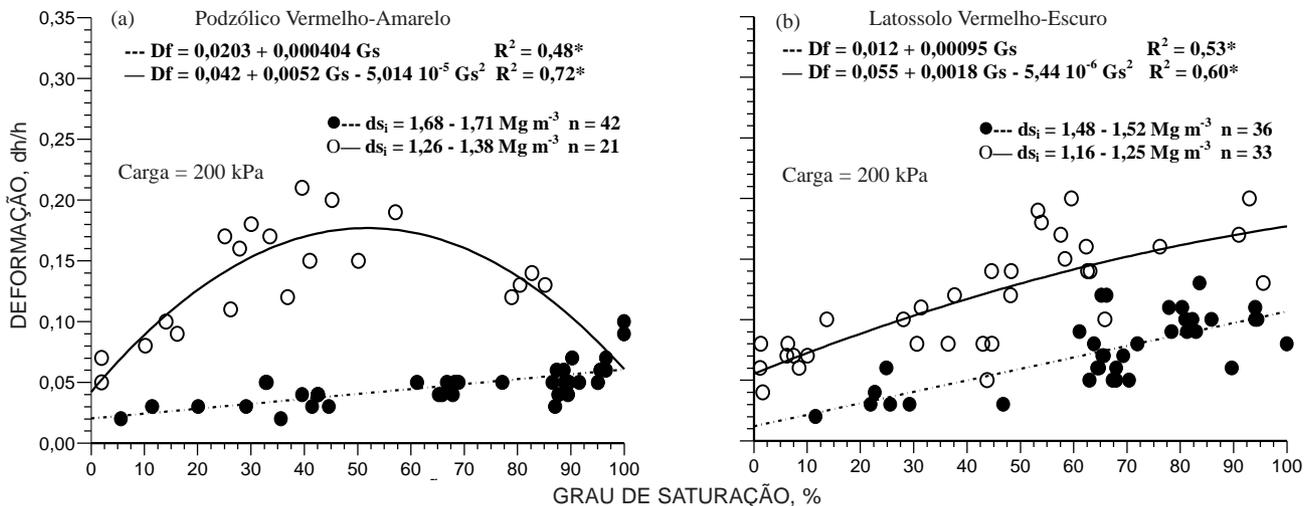


Figura 5. Deformação do solo (dh/h), considerando o grau de saturação (Gs) para uma pressão de 200 kPa e duas faixas de densidade do solo inicial.

No LE, o coeficiente angular aumentou de 0,616, quando o solo estava com grau de saturação < 15%, para 1,502, no grau de saturação de 30 a 45%, e diminuiu para os maiores graus de saturação. No PV, os coeficientes angulares das retas ajustadas não apresentaram comportamento semelhante ao verificado para o LE. O maior coeficiente angular foi de 0,716 no grau de saturação < 30%, justamente quando o solo estava com menor umidade. Necessita-se de maiores estudos para comprovar esse comportamento do Cc verificado no PV. Com o grau de saturação acima de 30%, os maiores valores de Cc foram encontrados para o LE, mostrando a maior suscetibilidade desse solo à compactação.

Na faixa de grau de saturação de 30 a 45% e 45 a 60%, ocorreram os maiores valores médios de Cc,

independentemente do tipo de solo. Esse fato relaciona-se diretamente com o que foi apresentado quanto à deformação do solo nas figuras 2 e 3. Assim sendo, a água no solo forma uma película sobre as partículas sólidas do solo que irá atuar como lubrificante, facilitando o deslocamento e rearranjo das partículas nos vazios do solo. Nos maiores graus de saturações, a deformação é controlada pela capacidade do solo em drenar o excesso de água na medida em que o espaço poroso vai sendo destruído. Esses resultados concordam com o observado por Reinert (1990). Esse autor concluiu que o Cc era fortemente afetado pelo estado inicial de compactação, quando o grau de saturação era menor do que 45%, e pelo grau de saturação inicial do solo, quando o grau de saturação era maior que

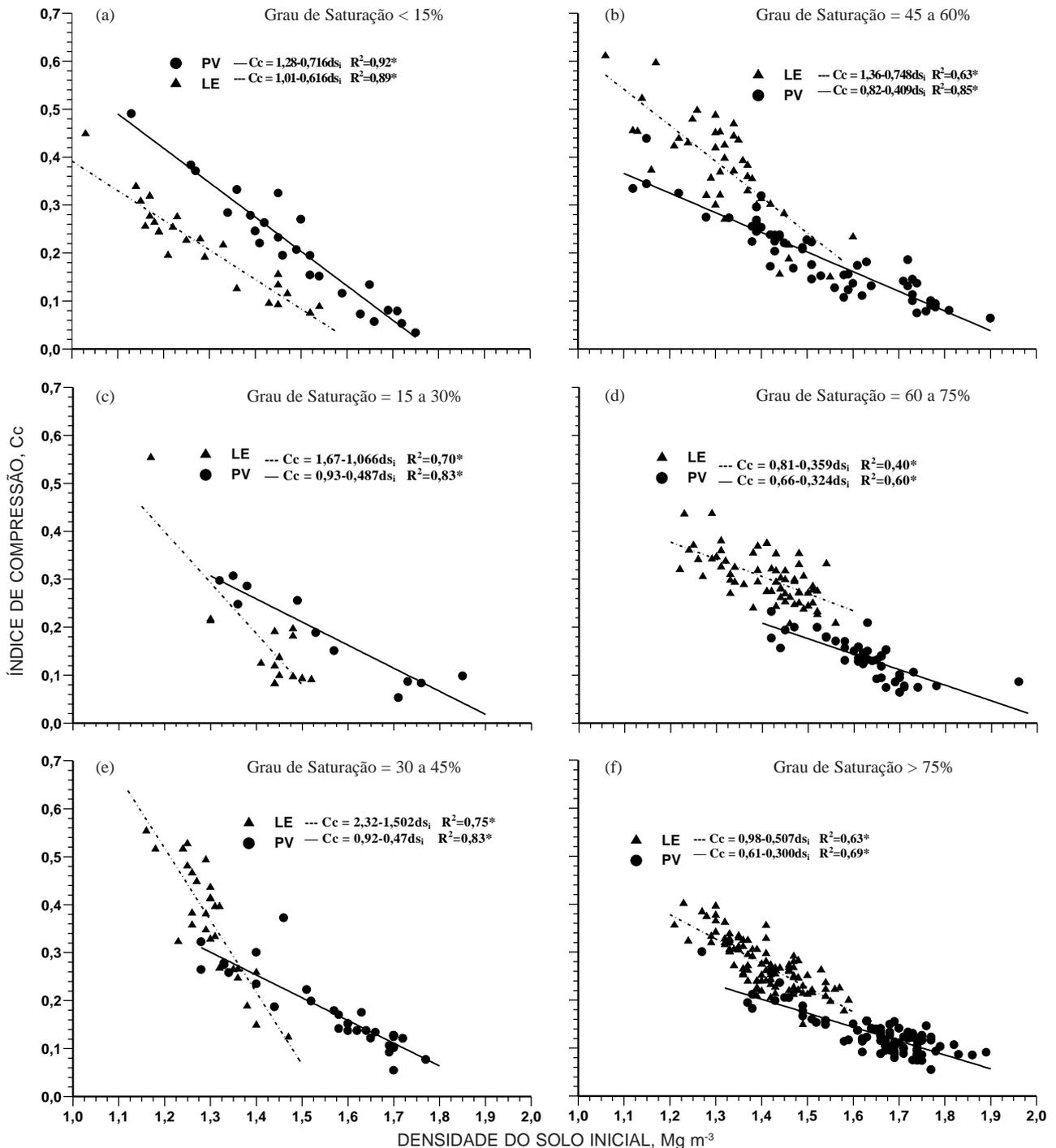


Figura 6. Índice de compressão (C_c) versus densidade do solo inicial (d_{s_i}), para diferentes grau de saturação.

45%. Esse fato implica que, para baixa umidade, a deformação do solo é limitada pelo fato de o movimento de suas partículas ser dificultado pela falta de água.

O C_c também foi influenciado pelo grau de saturação do solo (Figuras 7, 8 e 9). Para densidade do solo acima de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 9), o LE teve maior suscetibilidade à compactação quando o seu

grau de saturação foi próximo a 70%, enquanto, para $d_{s_i} < 1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 7), a maior suscetibilidade ocorreu em graus de saturações menores (próximas a 45%). Para as densidades do solo intermediárias (d_{s_i} entre $1,30$ e $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$), os maiores valores de C_c foram verificados com grau de saturação próximo a 60% (Figura 8), ou seja, um grau de saturação intermediário. Isso evidencia que, para o LE, que já

apresenta um estado de compactação mais elevado, necessita-se de maiores quantidades de água para alcançar os maiores valores de C_c . Assim, espera-se que solos com grau de saturação mais elevados sejam mais facilmente trafegados após uma chuva, visto que necessitam de maiores quantidades de água para alcançar os maiores valores de C_c (Reinert, 1990; Dias Junior, 1994). A equação que relaciona o C_c com o grau de saturação para o LE foi de segundo grau, fato este também observado por Salire et al. (1994); Dias Junior (1994); Kondo (1998) e Kondo & Dias Junior (1999b).

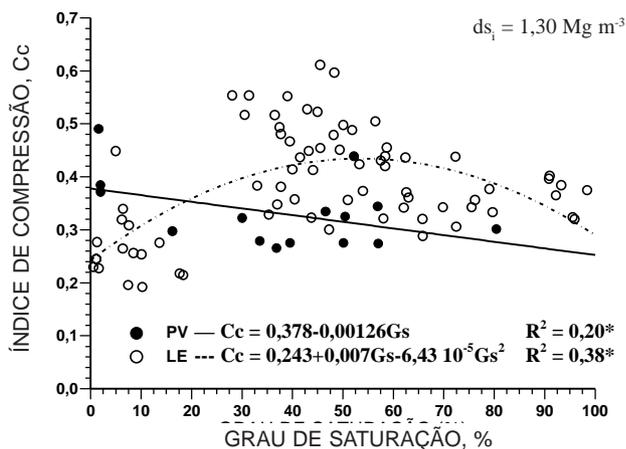


Figura 7. Índice de compressão (C_c) versus grau de saturação (G_s) para um PV e um LE, com faixa de densidade do solo inicial (ds_i) menor que $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ ($n = 15$ para o PV e $n = 75$ para o LE).

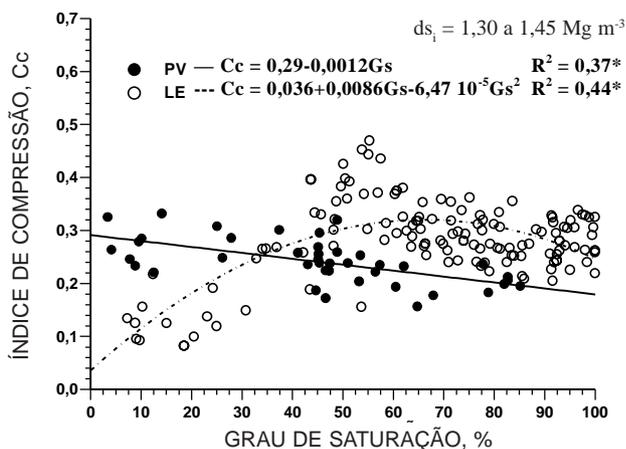


Figura 8. Índice de compressão (C_c) versus grau de saturação (G_s) para um PV e um LE, com faixa de densidade do solo inicial (ds_i) entre $1,30$ a $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ ($n = 41$ para o PV e $n = 140$ para o LE).

No PV, com ds_i acima de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, o C_c praticamente ficou estável em todos os graus de saturação (Figura 9). Nas classes de ds_i de $1,30$ a $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ e menor que $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, os valores de C_c tenderam a diminuir com o aumento do grau de saturação (Figuras 7 e 8).

O C_c (Quadro 2) foi influenciado pelo grau de saturação e pela ds_i . Apesar de apresentar coeficiente de determinação baixo para a variável grau de saturação, ela foi significativa para os dois solos (Quadro 2). Para o PV, o coeficiente de determinação foi maior entre os valores de C_c e as variáveis ds_i e grau de saturação do que no solo LE, sugerindo que, no solo argiloso (LE), além do estado inicial de compactação e do grau de saturação inicial, outros fatores, tais como: estrutura do solo, matéria orgânica do solo, tipo de argilomineral, etc. possam ter mais influência na suscetibilidade à compactação do que no solo arenoso (PV).

Para cada solo, foi obtida uma equação de regressão múltipla para estimar os valores de C_c e σ_p , a partir dos valores de ds_i e grau de saturação. Para o parâmetro C_c , a equação de regressão múltipla foi:

$$C_c = 0,813 - 0,403ds_i - 0,00024Gs, \text{ para o PV, com } R^2 = 0,77^*, e;$$

$$C_c = 1,09 - 0,26ds_i + 0,000974Gs, \text{ para o LE, com } R^2 = 0,50^*.$$

Para o parâmetro σ_p , as equações obtidas foram as seguintes:

$$\sigma_p = -146,54 + 190,74ds_i - 0,935Gs, \text{ para o PV, com } R^2 = 0,32^*, e;$$

$$\sigma_p = -28,69 + 144ds_i - 0,967Gs, \text{ para o LE, com } R^2 = 0,28^*.$$

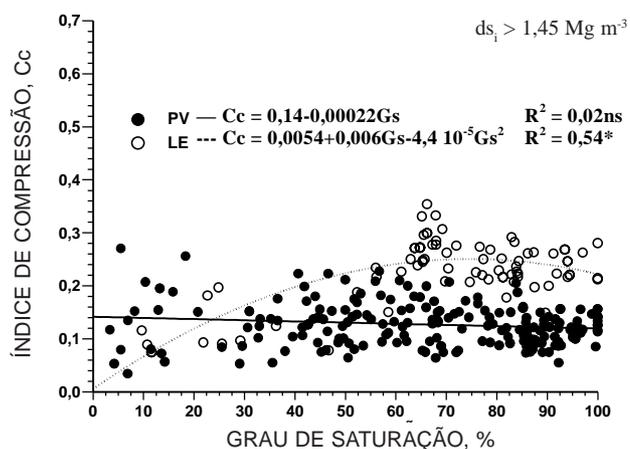


Figura 9. Índice de compressão (C_c) versus grau de saturação (G_s) para um PV e um LE, com faixa de densidade do solo inicial (ds_i) maior que $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ ($n = 205$ para o PV e $n = 79$ para o LE).

Quadro 2. Coeficiente de determinação (R^2), valor de F calculado e nível de significância para as variáveis densidade do solo inicial (ds_i) e grau de saturação em água (Gs)

Parâmetro Solo	Variável	R^2 parcial	R^2 total	F calc.	Prob > F	
Cc	PV	ds_i	0,765	0,765	855,1	0,0001
		Gs	0,006	0,771	7,1	0,0081
	LE	ds_i	0,438	0,438	230,4	0,0001
		Gs	0,065	0,403	38,4	0,0001
σ_p	PV	ds_i	0,150	0,150	45,6	0,0001
		Gs	0,178	0,328	69,2	0,0001
	LE	ds_i	0,182	0,182	65,6	0,0001
		Gs	0,102	0,284	42,2	0,0001

A análise de regressão múltipla para a variável dependente pressão de preconsolidação (σ_p) e para as variáveis independentes ds_i e grau de saturação (Gs) foi significativa para os dois solos, mas apresentou coeficientes de determinação baixos, 0,32, para o PV, e 0,28, para o LE (Quadro 2), podendo ser atribuídos à dependência existente entre a σ_p e outros atributos do solo que interferem na resistência do solo a deformações. Acredita-se que outras variáveis devam ser consideradas no modelo para aumentar o nível de confiança para a predição da pressão de preconsolidação.

CONCLUSÕES

1. As deformações ocorridas no Podzólico Vermelho-Amarelo e no Latossolo Vermelho-Escuro são diferentes em amplitudes, dependendo do estado inicial de compactação, grau de saturação e pressão aplicada ao solo.

2. Para condição de baixo grau de saturação inicial, a suscetibilidade do solo à compactação mostra comportamento diferente para cada tipo de solo. Para baixos graus de saturação inicial, o PV apresentou maior suscetibilidade e, no LE, a maior suscetibilidade foi observada para graus de saturação inicial mais altos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem, em especial, ao Prof. José Mário Soares, chefe do Laboratório de Materiais de Construção Civil-CT-UFSM, pelas sugestões, orientação, empréstimo e utilização do Laboratório, e aos bolsistas de Iniciação Científica, Adriano Zanette, Raquel Bastos Rubin e Juliano Souto, pela ajuda na execução deste trabalho.

LITERATURA CITADA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Ensaio de adensamento unidimensional. NBR - 12007. Rio de Janeiro, 1990. 13p.
- CARPENEDO, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 106p. (Tese de Doutorado)
- 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. O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. Bras. Ci. Solo, 20:175-182, 1996.
- HAKANSSON, 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.
- HAKANSSON, I. & VOORHEES, W.B. 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. p.167-179.
- HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733p.
- 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.
- 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.
- MACEDO, V.R.M. Compressibilidade de um Podzólico Vermelho-Escuro fisicamente degradado e recuperado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1993. 88p. (Tese de Mestrado)
- REINERT, D.J. Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf. East Lansing, 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.
- 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.1-21.
- 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.

