



Acta Scientiarum. Agronomy

ISSN: 1679-9275

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá
Brasil

Pereira, Joaquim Odilon; Benez, Sérgio Hugo; de Lima e Silva, Suedêmio; Ferreira de Queiroz, Manoel Moises; Bracarense Costa, João Candido; André Tabile, Rubens
Pressão de pré-compressão e comportamento hídrico de um Nitossolo Vermelho distroférico em função do tamanho de agregados
Acta Scientiarum. Agronomy, vol. 27, núm. 3, julio-septiembre, 2005, pp. 513-519
Universidade Estadual de Maringá
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303026559019>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Pressão de pré-compressão e comportamento hídrico de um Nitossolo Vermelho distroférico em função do tamanho de agregados

Joaquim Odilon Pereira^{1*}, Sérgio Hugo Benez², Suedêmio de Lima e Silva¹, Manoel Moises Ferreira de Queiroz¹, João Candido Bracarense Costa³ e Rubens André Tabile¹

¹Departamento de Engenharia Agrícola, CCET, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Rua Universitária, 2.069, 85816-110 Cascavel, Paraná, Brasil. ²Departamento de Engenharia Rural, FCA, Universidade Estadual Paulista, Cx. Postal 237, 18603-970, Botucatu, São Paulo, Brasil. ³Departamento de Matemática, CCET, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Rua Universitária, 2.069, 85816-110 Cascavel, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: jodilon@unioeste.br

RESUMO. A compactação do solo tem sido assunto de intensivas pesquisas nos últimos anos, mas os mecanismos que implicam no processo de compactação dos solos agrícolas ainda permanecem pouco conhecidos. A pressão de pré-compressão tem sido freqüentemente usada como um critério de avaliação da susceptibilidade do solo à compactação. A contribuição do tamanho de agregados do solo e o efeito do teor de água foram investigados na compactação de um Nitossolo Vermelho distroférico, denotando textura muito argilosa. Amostras de solo deformado, constituído de agregados menores de 2,5 mm A₁ e agregados de 9,3 mm a 19,4 mm A₂, foram submetidas a ensaio de compressão uniaxial drenado. O índice de compressão, a pressão de pré-compressão e o comportamento hídrico do solo foram avaliados. O índice de compressão do solo diminui com o aumento do tamanho de agregados, mostrando que as retas de compressão virgem foram paralelas apenas com os valores do solo A₂. Os valores de pressão de pré-compressão diminuem com o aumento do tamanho de agregados e com o teor de água do solo. Os resultados do índice de vazios em função do estado hídrico do solo refletem, com maior precisão no solo A₂, as regiões de comportamento do solo à compactação com todas as pressões aplicadas.

Palavras-chave: compressão uniaxial, compactação do solo, pressão de pré-compressão.

ABSTRACT. Pre-compression and water content behaviour of a clay soil in function of the aggregate size. Soil compaction has been the subject of intensive research studies in the last ten years, but the mechanisms involved in the soil compaction process still remain barely known. The pre-compression pressure has been used as a procedure for estimating the susceptibility of the soil compaction. The contribution of aggregate size of the soil as well as the effect of water content on soil compaction was investigated in a clay soil during this trial. Disturbed soil samples constituted by aggregated inferior to 2.5 mm A₁ and 9.3 to 19.4 mm A₂ were submitted to a drained uniaxial compression test. The compression index and pre-compression stress and the behavior of the water content were evaluated. The soil compression index decreased with the increase of aggregate size, showing that the virgin compression lines were parallels only with the values of the soil A₂. The pre-compression stress values increased with the reduction of aggregate size and the soil water content. The results of the voids ratios in function of the threshold water content reflect with bigger precision, in soil A₂, the regions of the soil behavior to the compaction with all the applied pressures.

Key words: uniaxial compression, soil compaction, threshold.

Introdução

A tendência recente de desenvolvimento de máquinas e implementos agrícolas de grande porte tem aumentado rapidamente o potencial de sérios problemas de compactação do solo, tendo como

causa altos valores de compressibilidade mecânica de solos agrícolas. Compressibilidade é definida, segundo Horn e Lebert (1994), como a propriedade do solo na qual ocorre a redução de volume quando este está sujeito a uma carga mecânica.

A pressão de pré-compressão¹ tem sido usada, freqüentemente, como um critério de avaliação da compactação do solo (Larson *et al.*, 1980; Horn e Lebert, 1994; Dias Júnior e Pierce, 1995; Salire *et al.*, 1994; Arvidsson e Keller, 2004; Keller *et al.*, 2004). Conseqüentemente, muitos estudos foram conduzidos para prever a compressibilidade de terra arável e o efeito no crescimento da planta (Larson *et al.*, 1980; Etana e Hakansson, 1996; Richard *et al.*, 1999; Boizard *et al.*, 2002).

O ensaio de compressão uniaxial confinado e drenado pode ser utilizado para modelar a compactação do solo pelas cargas mecânicas (Larson *et al.*, 1980; O'Sullivan, 1992).

De acordo com Gill e Vanden Berg (1968), a compactação dos solos agrícolas pode ser assimilada a um fenômeno de compressão, onde dois processos são engajados em função da intensidade de carga aplicada: uma deformação elástica do material que desaparece, caso ocorra a supressão da carga, e uma deformação plástica durável mesmo após a supressão da carga aplicada. No ensaio de compressão uniaxial confinado e drenado, estes dois tipos de deformação são representados por duas partes da curva de tensão-deformação: a primeira parte é chamada compressão secundária, e a segunda parte é chamada curva de compressão virgem, e representa a deformação plástica (Larson *et al.*, 1980).

Segundo Sánchez-Girón *et al.* (1998), durante a fase de compressão virgem, as variações do índice de vazio são obtidas como uma função da pressão aplicada, conforme o modelo logarítmico desenvolvido por Bailey e Vanden Berg (1967) e por Larson *et al.* (1980) que pode ser expresso pela seguinte equação matemática (Equação 1):

$$e = e_1 - c_c \log \sigma$$

Sendo,

e , a variações do índice de vazios, % (v/v);

e_1 , o índice de vazios medido sob uma determinada pressão;

c_c , o índice de compressão do solo;

σ , a pressão vertical aplicada ao solo, kPa.

Para os solos agrícolas, a carga aplicada mecanicamente é a principal causa da compactação. Os solos que foram sujeitos ao processo de compactação são chamados solos pré-compactados e resistirão ainda mais às cargas mecânicas, até que o carregamento exceda a pressão de pré-compactação inicial. De forma a minimizar a compactação causada ao solo durante as operações agrícolas, é desejável limitar as pressões aplicadas abaixo da pressão de

pré-compactação do solo.

O teor de água também tem sido outro fator bastante importante que atua no processo de compactação do solo. Seu efeito (de água sobre) no comportamento do solo à compactação pode ser analisado pela variação do índice de vazio em função do teor de água para diferentes intensidades de cargas aplicadas (Guérif, 1982).

A partir dos trabalhos de Guerif (1982) e Boiffin *et al.* (1990), pode-se constatar que o ensaio de compressão uniaxial permite, para uma determinada pressão de compressão, distinguir três regiões de comportamento da compactação do solo, separadas por duas faixas hídricas w_1 e w_2 (Figura 1). Para teor de água inferior à faixa w_1 , tem-se um comportamento dito sólido, em que a resistência mecânica dos agregados é superior às pressões resultantes das cargas aplicadas. O pequeno acréscimo observado na deformação do solo é instantâneo, e resulta do rearranjo dos agregados sem ruptura. Para os valores compreendidos entre w_1 e w_2 , o comportamento é dito frágil, e a resistência mecânica dos agregados, diminui atingindo a ordem de grandeza das pressões desenvolvidas nos pequenos torrões. O acréscimo da deformação do solo realiza por ruptura e por rearranjo dos agregados cuja deformação do solo é igualmente quase instantânea. Para os teores de água superiores a w_2 , tem-se um domínio viscoso, no qual pequenas variações de umidade apresentam repercussões importantes sobre a compactação final obtida. Neste caso, a compactação se realiza pela ruptura e pela deformação plástica dos agregados.

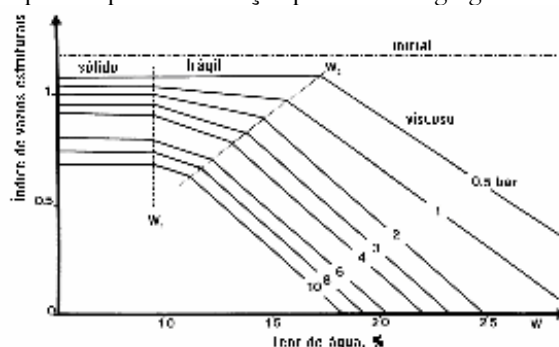


Figura 1. Comportamento da compactação de um solo argiloso: influência da pressão aplicada (Guérif, 1982)

Para Gonzalez (1991), o potencial hídrico está implicitamente ligado à textura do material e permite comparar materiais entre eles. Assim, do ponto de vista experimental, prefere-se utilizar o potencial como variável explicativa do comportamento mecânico. Para este pesquisador, a consistência do material e sua capacidade de

¹ Nos solos saturados, compressão é chamada consolidação; nos solos não saturados, é denominada de compactação (Horn e Lebert, 1994).

deformação depende, principalmente, do estado de hidratação do material, conjuntamente com a intensidade de carga aplicada. Por sua parte, Williat (1987), trabalhando com quatro classes de agregados, mostrou que, para granulometria com espaços de poros maiores, o crescimento da compactação depende essencialmente da pressão aplicada, fazendo com que as partículas mais finas completem as cavidades deixadas entre os agregados maiores, independente do teor de água de compactação. Para granulometria com espaço de poros pequenos, o aumento da compactação provém, necessariamente, da fragmentação dos agregados e sua redistribuição.

Para conhecer melhor o comportamento das reações do solo em função do seu estado físico e hídrico, frente às cargas exercidas pelas máquinas e implementos agrícolas, é importante compreender os mecanismos de avaliação do processo de compactação do solo.

Em condições de leito de semeadura nos ensaios de campo, o tamanho de agregados, em maior parte, é formado de 0 a 2,5 mm nos sistemas de plantio direto, e por agregados de até 20 mm nos sistemas com cultivo mínimo. Desta forma, os resultados obtidos nos ensaios de laboratório permitem prever o comportamento de resistência do solo às cargas exercidas nas condições de campo.

Este trabalho teve o objetivo de mostrar a contribuição dos agregados na compactação do solo, e determinar o seu comportamento na pressão de pré-compactação num solo argiloso sob efeito do teor de água e da pressão aplicada.

Material e métodos

O solo utilizado foi classificado como Nitossolo Vermelho distroférrico, textura muito argilosa (Embrapa, 1999) coletado na camada de 0 a 25 cm, pertencente à Fazenda Experimental Lageado da Universidade Estadual Paulista – Unesp, Botucatu, Estado de São Paulo. Para as análises das propriedades físicas do solo, amostras foram coletadas com uso de enxada e pá, em cinco pontos da área, nas profundidades de 0 a 10 cm e de 10 cm a 25 cm. A Tabela 1 apresenta o resultado da análise. A área onde o solo foi coletado, está situada à 22°49'31" Latitude Sul e 48°25'37" Longitude Oeste, com altitude média de 770 metros. O clima é subtropical chuvoso tipo Cfa. A área estava sendo cultivada, há 10 anos, com a cultura de milho, empregando-se, ininterruptamente, o sistema convencional de preparo do solo (aração e gradagem niveladora).

O solo coletado foi seco ao ar em laboratório e peneirado para constituir duas classes de agregados de tamanhos diferentes ($\phi < 2,5$ mm e $9,3$ mm $< \phi$

$< 19,4$ mm). A escolha dessas duas classes de agregados foi feita porque a primeira representa uma forte proporção de agregados encontrados nos leitos de semeaduras. Por outro lado, a redução da distribuição da superfície dimensional dos agregados de diâmetros maiores ($9,3$ mm $< \phi < 19,4$ mm), acompanhados de diâmetros de poros maiores induz uma diminuição do número de pontos de contatos pelo menos no início da compactação (Gonzalez, 1991).

Tabela 1. Composição física e química do solo nas camadas de 0 a 10 cm e com 10 cm a 25 cm de profundidade.

Propriedades	Profundidade de camada trabalhada (cm)	
	0 – 10	10 – 25
Areia (g kg ⁻¹)	200	200
Silte (g kg ⁻¹)	230	230
Argila (g kg ⁻¹)	570	570
M. O (g kg ⁻¹)	3,30	3,20
Densidade de partículas (g cm ⁻³)	2,83	2,85
Densidade do solo (g cm ⁻³)	1,48	1,35

Ensaio de compressão uniaxial, confinados e drenados, foram realizados com amostras de solo de estrutura formadas com agregados de 0 a 2,5 mm e de 9,3 mm a 19,4 mm, contidas em três anéis de tubo de PVC, com 200 mm de diâmetro interno e 100mm de altura inseridos em um cilindro de aço com diâmetro interno de 206 mm e 300 mm de altura. Foi utilizada, como dispositivo de compressão, uma prensa com macaco hidráulico de acionamento através de alavanca manual.

Os teores de água de 20,0%, 24,5%, 29,0% e 30,5% foram escolhidos com base no ensaio de Proctor, obtendo-se o teor crítico de água de 29,0%. As pressões de 150 kPa, 300 kPa, 450 kPa e 600 kPa foram empregadas considerando os critérios de variação de cargas aplicadas nas operações agrícolas.

O solo para compressão foi pesado em bandejas de plástico e saturado com massa de água conhecida obtendo-se a massa do solo úmido. As bandejas foram expostas no laboratório, em condições ambientes para perda natural de água, sendo monitoradas duas vezes ao dia até atingir a massa de água necessária para realização do ensaio. Após o estágio de compressão, amostras de solo foram coletadas em cápsulas de alumínio para determinação do teor de água em estufa.

Dois sensores foram utilizados no experimento: uma célula de carga com capacidade 50 kN e precisão 0,03%, com saída de 2 mv/v fixada entre o topo da prensa e a placa de compressão; um sensor de posição potenciométrico, 10 volts, instalado na parte superior da prensa para registrar a deformação do solo do momento da pressão igual a 0 à pressão máxima estabelecida no ensaio.

Em função do dispositivo de compressão não permitir carga instantânea, os valores de pressão de deformação foram registrados por um sistema de aquisição de dados para as cargas contínuas de 0 a 150 kPa, 0 a 300 kPa, 0 a 450 kPa e de 0 a 600 kPa, sendo armazenados 100 pares de dados em cada ensaio. Ao atingir a carga máxima estabelecida, foi dado um tempo de 30s, sendo em seguida liberado. Não foi verificada a relaxação do solo. Como para cada variação de pressão no intervalo das cargas aplicadas corresponde à variação de volume do solo no cilindro, e conhecido o teor de água, é possível determinar o índice de vazios, uma vez que a massa é sempre constante.

A variação da densidade do solo ($\Delta\rho_s$) foi determinada pela equação (2):

$$\Delta\rho_s = m/\Delta v$$

Sendo,

m , a massa do solo seco, em g;

Δv , a variação de volume do solo, em cm^3 , em função da variação da pressão aplicada.

Desta forma, obteve-se, para cada variação de pressão, a variação do índice de vazios total e correspondente, calculada pela equação(3):

$$e = \rho_p / \Delta\rho_s - 1$$

Sendo,

ρ_p , a densidade de partícula, em g cm^{-3} .

A densidade de partícula foi estabelecida como a média das densidades obtidas nos solos das duas profundidades em estudo, e foi determinada pelo método do picnômetro com água (Stengel, 1983).

Determinou-se a curva de compressão (pressão-índice de vazios totais). Como as pressões finais de 150 kPa, 300 kPa e 450 kPa apresentaram, nos ensaios, o mesmo comportamento das pressões contidas na variação do intervalo de 0 a 600 kPa, para efeito de pressão de pré-compactação foram avaliadas as curvas de compressão com variação de 0 a 600 kPa.

A compactação do solo foi avaliada da variação do índice de vazio e com o logaritmo decimal da pressão de compressão $\log\sigma$ (Equação 1).

A pressão de pré-compressão σ_{pc} do solo foi definida como a intersecção da primeira curva

elástica e a curva de compressão virgem. Esta é uma estimativa da pressão de pré-compressão que é a máxima pressão que o solo pode suportar antes da deformação plástica permanente. Para o cálculo, foi empregado o método de intersecção das retas formadas pela linha de compressão virgem (*virgem compression line* – VCL), e a regressão da reta obtida de um número de pontos iniciais da sequência de pressões aplicadas na porção da compressão secundária da curva de compressão, segundo a metodologia de Arvidsson e Keller (2004).

Como foi obtido um grande número de pares de dados em cada ensaio, resultando em intervalos de leituras menores que o necessário, esses pares foram reduzidos aplicando-se o método desenvolvido por Dawidowski e Koolen (1994).

O delineamento estatístico constituiu-se de 18 tratamentos em um arranjo fatorial ($2 \times 3 \times 3$) correspondente a duas classes de agregados A_1 ($\phi < 2,5$ mm), A_2 ($9,4$ mm $< \phi < 19,3$ mm) e três teores de água (20,4%, 24,8% e 28,4%) com três repetições. O solo com teor de água de 30,5% foi descartado da análise estatística por apresentar apenas uma amostragem. As médias entre tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de confiança de 99%.

Resultados e discussão

Compressibilidade do solo

A Tabela 2 apresenta a comparação de médias de índice de vazios e_1 e índice de compressão c_c do solo A_1 e A_2 , para diferentes teores de água pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade. A análise estatística revelou diferenças significativas entre as médias de índice de vazios e índice de compressão para os dois solos. Os dados também indicam diferenças significativas para estes parâmetros entre os solos para cada teor de água. O índice de compressão aumentou significativamente com o teor de água para o solo A_1 e diminuiu com o solo A_2 , formado por agregados maiores. A influência do tamanho de agregados foi fortemente significativa. Para este

Tabela 2. Valores das constantes da equação 1 em função do teor de água do solo e da classe de agregados .

Classe de agregados (mm)	Constantes da equação (1)	Teor de água do solo (%)				
		20,4 ± 0,7	24,8 ± 0,7	28,4 ± 0,9	Média	30,5 ± 0,7
A_1	e_1 (kPa)	3,39 A a	3,43 A a	3,33 A a	3,38a	2,73
A_2	e_1 (kPa)	3,06A b	2,82 AB b	2,77 B b	2,88b	2,81
Média		3,23A	3,12A	3,05A		
A_1	c_c	0,66A a	0,82B a	0,86C a	0,78a	0,66
A_2	c_c	0,62A b	0,64A b	0,63A b	0,63b	0,64
Média		0,64A	0,73B	0,74B		

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna para classe de agregados e teor de água, não diferem significativamente pelo teste Tukey ($P < 0,01$). A_1 , classe de agregados com diâmetro inferior a 2,5 mm; A_2 , classe de agregado com diâmetro entre 9,3 mm e 19,4 mm.

último, as médias de índice de compressão entre os teores de água não revelaram diferenças significativas, mostrando-se basicamente iguais, indicando paralelismo entre as linhas de compressão virgem.

A Figura 2 mostra o comportamento geral das curvas de tensão deformação similar àquele das curvas relatadas por Larson *et al.* (1980) e Guerif (1982). As curvas mostram que, a partir de um determinado valor de pressão aplicada correspondente à abscissa do ponto de inflexão da curva de compressão, as variações do índice de vazios em função da pressão aplicada seguem uma distribuição linear (linha de compressão virgem, VCL – equação 1). A porção linear das curvas começa a uma pressão aplicada maior para o solo com agregados menores de 2,5 mm (77 kPa e 30 kPa, respectivamente para os teores de água médios de 20,2% e 23,9%) que para o solo com agregados entre 9,3 mm e 19,4 mm (60 kPa e 25 kPa respectivamente para os teores de água médios de 19,4 e 25,3%). Para ambos os solos, as linhas se deslocam para a esquerda com o aumento do teor de água. O índice de vazios decresce mais rapidamente com o aumento do logaritmo da pressão aplicada no solo A_1 . A relação é caracterizada por um estágio de rápida compressão. Uma redução mais elevada na variação do índice de vazios do solo A_1 ocorre durante as primeiras oito pressões da linha de compressão virgem, com redução de 0,51 dos pares de dados (34 kPa, 2,11%) a (120 kPa, 1,54%) ao teor de água de 23,9%, enquanto que no solo A_2 ocorreu uma variação de 0,46 com os pares de dados de (28 kPa, 1,89%) a (150 kPa, 1,43%) ao teor de água 25,3%. Evidencia-se que, embora o solo A_2 tenha apresentado menor índice de vazios no seu estado inicial, foi mais resistente à compressão. Estes resultados são condizentes com os obtidos por Guerif (1982), Williat (1987) e Gonzalez (1991), explicando que, nas amostras de solos formadas por agregados maiores, o acréscimo da compactação depende essencialmente da pressão aplicada e as partículas menores preenchem as cavidades deixadas pelos agregados maiores independente do teor de água. Para Horn e Lebert (1994), a compressibilidade é menos pronunciada em solos com estrutura mais grosseira e menos agregada. Como o tempo de cada pressão vertical aplicada não ultrapassou a 30s, o estágio de compressão rápida pode simular a mudança na estrutura do solo que ocorre sob a carga aplicada pelas rodas do trator. O tempo de carga no centro do eixo de tração de um trator com diâmetro de pneu igual a 1,60 m, operando a velocidade de 5,2 km/h em superfície

com densidade de até $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$ (aplicando o método de O'Sullivan *et al.*, 1999), é de aproximadamente 0,38s, apenas 1,3% do tempo de carga aplicada neste experimento (30s), o que pode limitar a possibilidade de uso desses dados para prever a compactação do solo no campo induzida pelo tráfego de máquinas agrícolas. Por outro lado, tem-se verificado que a compactação do solo pode reduzir com o aumento da velocidade de avanço da máquina no campo (Dexter e Tanner, 1974; Etana *et al.*, 1997). Neste caso, o experimento de laboratório seria complementado pelo experimento de campo para compreender a extensão dos desvios e estabelecer fatores que pudessem correlacionar os dois tipos de resultados.

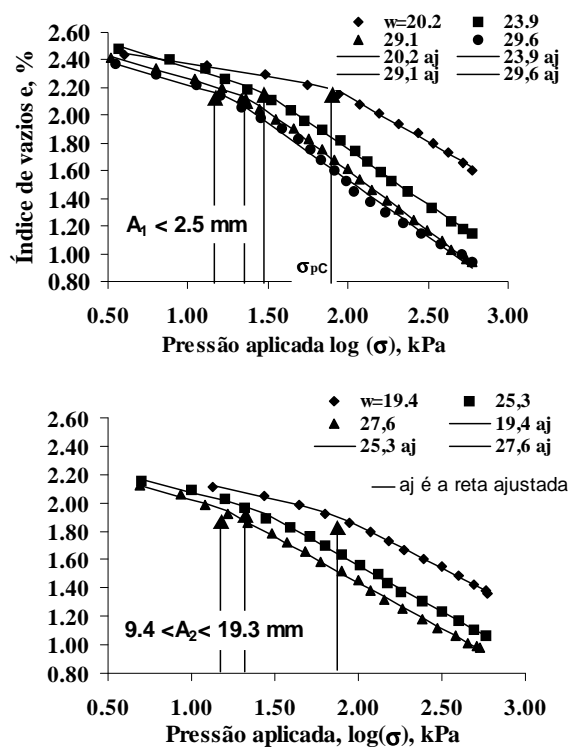


Figura 2. Variação do índice de vazios em função da pressão normal para solo formado por duas classes de agregados e determinação da pressão de pré-compressão σ_{pc} .

Pressão de pré-compressão

Os valores das pressões de pré-compressão σ_{pc} para diferentes teores de água e classes de agregados são ilustrados na Figura 2. A Tabela 3 apresenta a comparação de médias pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

Os valores médios de pressão de pré-compressão indicam diferenças significativas entre os agregados e teor de água. Embora o solo A_2 (agregados entre

Tabela 3. Valores da pressão de pré-compressão em função do teor de água do solo e da classe de agregados.

Classe de agregados (mm)	Pressão de pré-compressão	Teor de água do solo (%)				
		20,4 ± 0,7	24,8 ± 0,7	28,4 ± 0,9	Média	30,5 ± 0,7
A ₁	σ_{pc} (kPa)	83,3Aa	27,5Ba	23,3Ba	47,7a	18
A ₂	σ_{pc} (kPa)	55,7Ab	25,5Ba	19,0Ba	33,4b	27
Média		69,5A	26,5B	21,2B		

Médias de tratamento seguidas de mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna para classe de agregados e teor de água, não diferem significativamente pelo teste Tukey ($p < 0,01$). A₁, classe de agregados com diâmetro inferior a 2,5 mm; A₂, classe de agregado com diâmetro entre 9,3 mm e 19,4 mm.

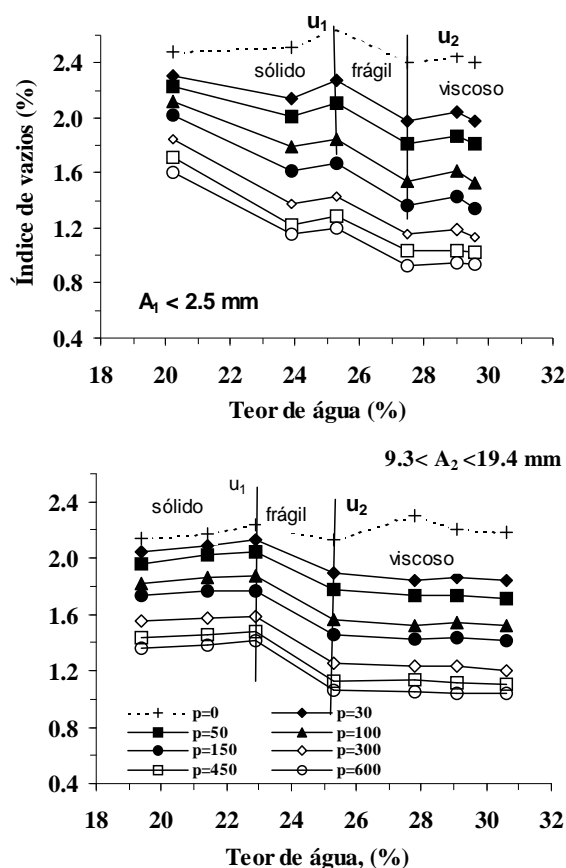
9,3 mm e 19,4 mm) tenha sido trabalhado num estado estrutural inicial com menor índice de vazios, (2,2%), os valores da pressão de pré-compressão do solo são maiores no solo A₁ (agregados menores que 2,5 mm) e diminuem significativamente com o aumento do teor de água do solo e com o tamanho de agregado. Isto pode ser explicado por Gonzalez (1991), quando afirma que a redução da distribuição da superfície dimensional dos agregados de diâmetros maiores, acompanhados de diâmetros de poros também maiores, induz uma diminuição do número de pontos de contatos pelo menos no início da compactação. Por outro lado, acredita-se que o tempo de 30 s de aplicação da pressão neste ensaio pode ter sido apenas suficiente para proporcionar um arranjo mais rápido entre os agregados maiores propiciando uma falsa compactação do solo pelo menos no início da compressão. Neste caso, a maior porosidade total inicial do solo A₁ propiciou maior resistência do solo, uma vez que ela é função do número de partículas em contato, da resistência de partículas individuais e entre elas (Lebert e Horn, 1991).

Comportamento hídrico

As curvas representando a variação do índice de vazios totais em função do teor de água para diferentes pressões aplicadas, estão apresentadas na Figura 3.

O solo formado pelas duas classes de agregados permite definir claramente o comportamento hídrico do solo à compactação. O solo A₁ indica que, às pressões inferiores a 100 kPa, o domínio hídrico, tal que definido por Guérif (1982), se situa ao teor de água inferior a 24,5%, o que caracteriza um comportamento sólido desses agregados. Até estas pressões percebe-se o comportamento frágil com os teores de água entre 24,5% e 27,5%. Para todas as pressões empregadas, um comportamento viscoso pode ser caracterizado pelo solo com teor de água superior a 28%. Neste mesmo solo, não se verifica comportamento sólido às pressões superiores a 300 kPa com qualquer teor de água.

As amostras de solo A₂ indicam um comportamento sólido para todas as pressões aplicadas aos teores de água inferiores a 23%. Essa

**Figura 3.** Variação do índice de vazios do solo, em função do teor de água a diferentes pressões aplicadas em amostras de solos de agregados menores que 2,5 mm, e de 9,3 mm a 19,4 mm

classe de agregado apresenta uma definição mais nítida da influência da água na compactação do solo mostrando três regiões mais definidas indicando comportamento frágil para os teores de água de 23% a 25,2%, e mostrando a teores de água superiores a 25,2% um comportamento viscoso. Observa-se tendência em permanecer constante o índice de vazio ao teor de água superior 27,5% com o solo A₁ e superior a 25% com o solo A₂. Acredita-se que a razão para isto é o fato de todas as pressões serem aplicadas num curto tempo de 30s sem relaxamento do solo entre uma pressão e outra. Desta forma, não se pode dizer que houve consolidação do solo nestes teores de água com pressão alguma aplicada.

Conclusão

O índice de vazios do solo A_2 , formado com agregados entre 9,3 mm e 19,4 mm, diminui com o aumento do teor de água e apresenta diferença significativa entre os valores médios obtidos com teor de água de 20,4% e 28,4%. O índice de compressão do solo diminui com o aumento do tamanho de agregados e mostra que as retas de compressão virgem foram paralelas apenas com os valores do solo A_2 . Os valores de pressão de pré-compressão diminuem com o aumento do tamanho de agregados e com o teor de água. Os resultados do índice de vazios, em função do estado hídrico do solo, refletem com maior precisão, no solo A_2 , as regiões de comportamento do solo à compactação com todas as pressões aplicadas.

Referências

- ARVIDSSON, J. KELLER, T. Soil precompression stress. I. A survey of Swedish arable soils. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 77, p. 85-95, 2004.
- BAILEY, A.C.; VANDEN BERG, G.E. Yielding by compaction and shear in unsaturated soils. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, v. 11, p. 505-510, 1967.
- BOIFFIN, J. *et al.* Les processus d'évolution de l'état structural du sol: quelques exemples d'études expérimentales recentes. La structure du sol et son évolution, *Les Colloques de l'INRA*, Paris, n. 53, p. 37-69, Paris, 1990.
- BOIZARD, H. *et al.* Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 64, p. 149-164, 2002.
- DAWIDOWSKI, J.B.; KOOLEN, A.J. Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 31, p. 277-282, 1994.
- DEXTER, A.R.; TANNER, D.W. Time dependence of compressibility for remoulded and undisturbed soil, *Soil Sci.* Baltimore, v. 25 p. 153-164, 1974.
- DIAS JUNIOR, M.S. PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technol.*, Amsterdam, v. 8, p. 139-151, 1995.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999.
- ETANA, A. *et al.* Effects of uniaxial stress on the physical properties of four swedish soils. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 44 p. 13-21, 1997.
- ETANA, A. HAKANSSON, I. Effects of traffic with a tractor and a wheel loader on two ploughed moist soils. Swedish. *J. Agric. Res.*, Uppsala, v. 26, p. 61-68, Sweden, 1996.
- GILL, W.R.; VANDEN BERG, G.E. *Soil dynamics in tillage and traction*. Washington: Agricultural Research Service. United States Department of Agriculture, 1968. 511p.
- GONZALEZ, F.L. *Morphologie, propriétés physiques et conditions de formation des éléments structuraux de la couche laborée: contribution à l'interprétation du profil cultural*. 1991, Thèse (Docteur Ingénierie)-INA-PG. Paris, 1991.
- GUÉRIF, J. Compactage d'un massif d'agrégats: effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*. Paris, v. 2, p. 287-93, 1982.
- HORN, H.; LEBERT, M. Soil compactability and Compressibility. In: *Soil compaction in crop production*. Ed. Soane, B. D. and van Ouwerkerk, C. Elsevier, 1994.
- KELLER, T. *et al.* Soil precompression stress. II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 77, p. 97-108, 2004.
- LARSON, W.E. *et al.* Compression of agricultural soil from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 44, p. 450-7, 1980.
- LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 19, p. 275 – 286, 1991.
- O'SULLIVAN, M.F. Uniaxial compaction effects on soil physical properties in relation to soil type and cultivation. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 24, p. 257-269, 1992.
- O'SULLIVAN, M.F. *et al.* A simplified method for estimating soil compaction *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 49, p. 325-335, 1999.
- RICHARD, G. *et al.* Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 51, p. 151-160, 1999.
- SALIRE, E.V. *et al.* Compression of intact subsoils under short-duration loading. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 31, p. 235-248, Amsterdam, 1994.
- SANCHEZ-GIRON, V. *et al.* Response of five types of soil to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression tests. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 48, p. 37-50, 1998.
- STENGEL, P. Analyse de la porosité. Séminaire CEE-AGRIMED, Avignon (FRA): INRA Station de Science du Sol, Montfavet, Document Interne, 1983. 54p.
- WILLIAT, S. T. Influence of aggregate size and water content on compactibility of soil using short-time static loads. *J. Agric. Eng. Res.*, London, v. 37, p. 107-115, 1987.

Received on November 26, 2004.

Accepted on July 14, 2005.