

COMPORTAMENTO COMPRESSIVO DE UM NITOSSOLO: EFEITO DO TAMANHO DE AGREGADOS, DO TEOR DE ÁGUA E DA PRESSÃO APLICADA

JOAQUIM O. PEREIRA¹, SÉRGIO H. BENEZ², SUEDÊMIO DE L. SILVA³,
RUBENS A. TABILE⁴, ANDERSON DE TOLEDO⁴

RESUMO: A compactação do solo tem sido assunto de intensivas pesquisas nos últimos anos; no entanto, os mecanismos que implicam o processo de compactação dos solos agrícolas, ainda permanecem pouco conhecidos. A contribuição do tamanho de agregados do solo, bem como o efeito do teor de água e da pressão normal aplicada na compactação e pressão de pré-compactação do solo, foi investigada em um Nitossolo Vermelho eutrófico. Amostras de solo deformado, constituídas por agregados menores que 2,5 mm e de 9,3 a 19,4 mm, foram submetidas a ensaio de compressão uniaxial drenado. O índice de vazios e a pressão de pré-compactação foram avaliados. Os resultados obtidos mostram que o tamanho de agregados teve efeito no processo de compactação do solo. A mudança da compactação do solo pode ser prevista em função do estado inicial do solo, da pressão aplicada e do teor de água.

PALAVRAS-CHAVE: compressão uniaxial, compactação do solo, pressão de pré-compactação.

COMPRESSION BEHAVIOUR OF A CLAY SOIL: EFFECTS OF AGGREGATE SIZE, WATER CONTENT AND APPLIED PRESSURE

ABSTRACT: Soil compaction has been the subject of intensive researches in the last ten years, but the mechanisms involved in the soil compaction process remain a little known. The contribution of aggregate size of the soil as well as the effect of water content and normal pressure applied on soil compaction and pressure of pre-compaction were investigated in a Clay soil during this trial. Disturbed soil samples constituted by aggregates less than 2.5 mm and 9.3 to 19.4 mm were submitted to a drained compression uniaxial test. The void ratio and the pre-compaction pressure were also evaluated. The results obtained show that the size of the aggregates had effect on the process of soil compaction. The change of soil compaction can be predicted according to the initial state of soil, the applied pressure and the water content of the soil.

KEYWORDS: compression uniaxial, soil compaction, pre-compaction.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de maquinaria agrícola de grande porte, nas últimas décadas, deu origem à questão da máxima compressibilidade mecânica aceitável ou trafegabilidade de solos agrícolas mais resistentes (HORN & LEBERT, 1994). Conseqüentemente, muitos estudos foram conduzidos para prever a compressibilidade de terra arável e o efeito em crescimento de planta (LARSON et al., 1980; O'SULLIVAN, 1992; ETANA & HAKANSSON, 1996; RICHARD et al., 1999; BOIZARD et al., 2002).

Compressibilidade é definida, de acordo com HORN & LEBERT (1994), como a propriedade do solo segundo a qual ocorre a redução de volume quando esse está sujeito a uma carga mecânica. Na

¹ Prof. Associado, Departamento de Engenharia Agrícola, UNIOESTE, Cascavel - PR, jodilon@unioeste.br

² Prof. Titular, Departamento de Engenharia Rural, UNESP, Botucatu - SP, benez@fca.unesp.br

³ Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia Agrícola, UNIOESTE, Cascavel - PR, suedemio@unioeste.br

⁴ Estudante de Graduação em Engenharia Agrícola, UNIOESTE, Cascavel - PR, tabile@pop.com.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 5-2-2004

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 11-8-2005

agricultura, a compactação do solo é principalmente causada pelas máquinas e implementos agrícolas cujo peso é transmitido aos pneumáticos pelos eixos. O ensaio de compressão uniaxial confinado e drenado pode ser utilizado para modelar esse fenômeno (LARSON et al., 1980).

De acordo com GILL & VANDEN BERG (1968), a compactação dos solos agrícolas pode ser comparada a um fenômeno de compressão em que dois processos estão envolvidos em função da intensidade de carga aplicada: uma deformação elástica do material que desaparece, uma vez que 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, esses 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).

Durante a fase de compressão virgem, as variações do índice de vazio são obtidas como função da pressão de compressão, conforme o modelo logarítmico desenvolvido por LARSON et al. (1980), que pode ser expresso na equação matemática seguinte:

$$e = e_1 - c \log \sigma \quad (1)$$

em que,

e - variações do índice de vazios, %;

e_1 - índice de vazios medido sob determinada pressão, %;

c - índice de compressão do solo, adimensional, e

σ - pressão vertical aplicada ao solo, kPa.

Para os solos agrícolas, a carga aplicada mecanicamente é a principal causa de pré-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 tal carregamento abaixo da pressão de pré-compactação do solo.

O efeito de água sobre o comportamento do solo à compactação pode ser analisado a partir das curvas, representando a variação do índice de vazios, em função do teor de água, para diferentes intensidades de cargas aplicadas (Figura 1) (GUERIF, 1982). Ainda segundo GUERIF (1982) e BOIFFIN et al. (1990), o ensaio de compressão uniaxial permite, para uma determinada energia de compressão, distinguir três regiões de comportamento da compactação do solo separadas por duas faixas hídricas w_1 e w_2 . Para o teor de água inferior à 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 na deformação, observado no 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-se por ruptura e por rearranjo dos agregados, na qual a 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. A compactação realiza-se pela ruptura e pela deformação plástica dos agregados.

O conhecimento do comportamento das reações de diferentes tipos de solo frente às cargas exercidas pelas máquinas e implementos agrícolas, em função de seu estado físico, implica a compreensão dos mecanismos de avaliação do processo de compactação do solo.

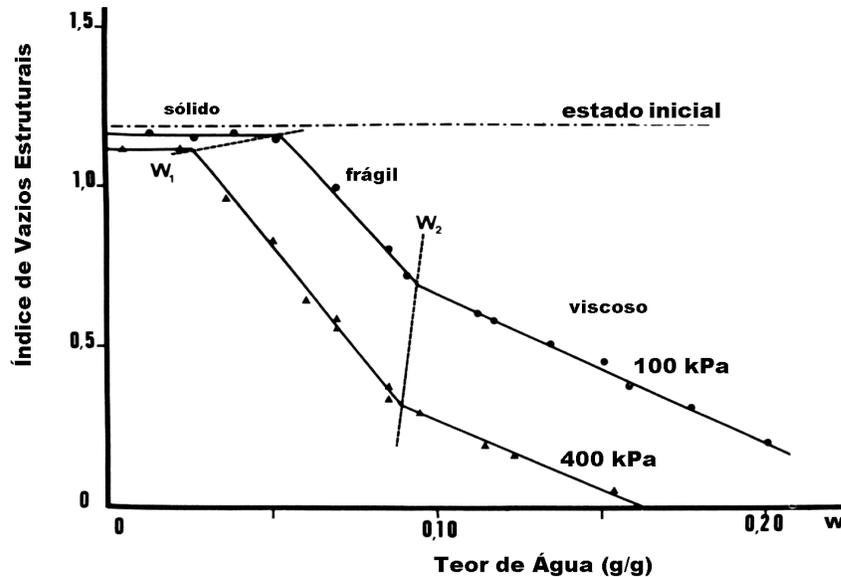


FIGURA 1. Influência do teor de água sobre o índice de vazio estrutural obtido após a compactação do solo silto-argiloso às pressões de 100 e 400 kPa (GUERIF, 1982).

DERDOUR et al. (1994) estudaram em laboratório o comportamento mecânico de maciços de agregados de amostras de solo com teor de argila de 58%; entretanto, pouca informação ainda existe disponível da aplicação dos mecanismos de avaliação em Nitossolos com alta quantidade de argila (580 g kg^{-1}), sob agregados de tamanhos diferentes, o que pode conferir-lhe um comportamento compressivo diferente dos solos estudados até o presente.

Este trabalho teve o objetivo de isolar a contribuição dos agregados no processo de compactação do solo e determinar o seu comportamento na pressão de pré-compactação obtida em um Nitossolo Vermelho eutrófico sob efeito da pressão normal aplicada e do teor de água.

MATERIAL E MÉTODOS

O solo utilizado neste trabalho foi coletado na camada de 0 a 25 cm de um Nitossolo Vermelho eutrófico (EMBRAPA, 1999), textura argilosa, relevo suave ondulado, pertencente à Fazenda Experimental Lageado, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Botucatu - SP. Para as análises das propriedades físicas e químicas do solo, as amostras foram coletadas nas profundidades de 0 a 10 cm e de 10 a 25 cm, conforme Tabela 1. A área onde o solo foi coletado, está situada a $22^{\circ}49'31''$ latitude sul e $48^{\circ}25'37''$ longitude oeste, com altitude média de 770 m. O clima é subtropical chuvoso, tipo Cfa. A área vinha sendo cultivada, há 10 anos, com a cultura de milho, empregando-se ininterruptamente o sistema convencional de preparo do solo (aração e gradagem com discos).

O solo coletado foi seco ao ar em laboratório e peneirado para constituir duas classes de agregados de tamanhos diferentes ($\phi < 2,5 \text{ mm}$ e $9,3 < \phi < 19,4 \text{ mm}$). A escolha dessas duas classes de agregados foi realizada pelo fato de que a primeira representa forte proporção de agregados encontrados nos leitos de semeaduras; por outro lado, a redução da distribuição da superfície dimensional dos agregados de diâmetros maiores ($9,3 < \phi < 19,4 \text{ mm}$), acompanhados de diâmetros de poros maiores, induz diminuição do número de pontos de contatos pelo menos no início da compactação (GONZALEZ, 1991).

Ensaio de compressão uniaxial, drenados e confinados, foram realizados com os agregados em três anéis de tubo de PVC, com 200 mm de diâmetro interno e 100 mm de altura, inseridos em um

cilindro de aço com diâmetro interno de 206 mm e 300 mm de altura (Figura 2a), utilizando-se de prensa com macaco hidráulico de capacidade de 50 kN, acionado com alavanca manual.

TABELA 1. Composições física e química do solo nas camadas de 0 a 10 cm e de 10 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	57
M.O. (g kg^{-1})	3,3	3,2
pH em CaCl_2	4,8	4,8
CTC ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	11,2	10,9
V (%)	50	50
Densidade de partículas (g cm^{-3})	2,83	2,85
Densidade do solo (g cm^{-3})	1,48	1,35

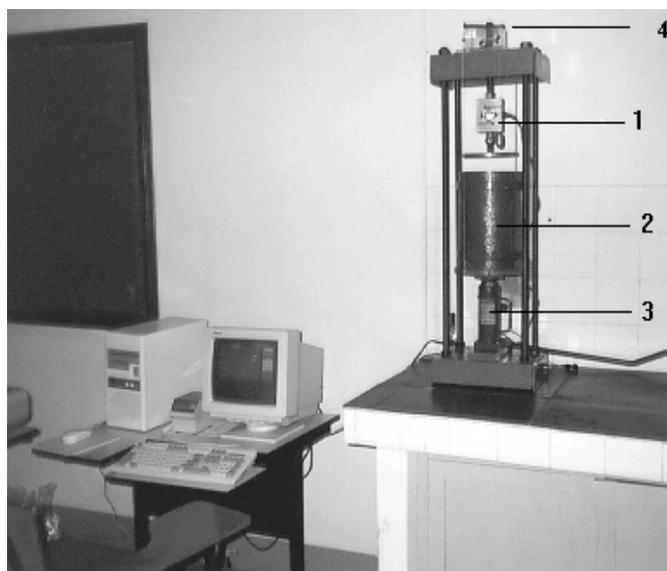
M.O. - matéria orgânica

Dois sensores foram utilizados no experimento: uma célula de carga com capacidade 50 kN e precisão 0,03%, com saída de 2 mV V^{-1} , fixada entre o topo da prensa e a placa de compressão, e um sensor de posição potenciométrico, 10 Volts, instalado na parte superior da prensa (Figura 2 b) para registrar a deformação do solo do momento da pressão igual a 0 à pressão máxima estabelecida no ensaio.

Amostras de solo foram coletadas em cápsulas de alumínio e secas em estufas a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 h, para a determinação do teor de água pelo método gravimétrico. Em seguida, foram pesadas em bandejas de plástico e saturadas com massa de água conhecida, obtendo-se o peso do solo úmido. As bandejas foram expostas, no laboratório, a condições ambientes para perda natural de água, sendo monitoradas duas vezes ao dia até atingir a massa de água necessária para a realização do ensaio.



(a)



(b)

FIGURA 2. a) 1; 2 e 3 - cilindros de PVC utilizados no ensaio de compressão uniaxial com os anéis de PVC por camadas; 4 - cilindro de ferro; b) - prensa para compressão uniaxial: 1 - célula de carga de 50 kN; 2 - cilindro de ferro; 3 - macaco hidráulico; 4 - sensor de posição.

Os teores de água de 20,0%; 24,5%; 29,0% e 30,5% foram escolhidos com base no ensaio de compactação de Proctor, com valor de densidade máxima obtida com teor de água de 29,0%.

As pressões de 150 kPa; 300 kPa; 450 kPa e 600 kPa foram empregadas no experimento considerando os critérios de variação de cargas aplicadas no solo, pelo uso de máquinas e implementos agrícolas, do preparo do solo à colheita e transporte do material de campo, conforme BRAUNACK & DEXTER (1978) e GONZALEZ (1991). Um programa computacional foi desenvolvido para o encerramento da carga quando ela atingisse o valor máximo preestabelecido. Como cada amostra recebeu apenas uma carga, não foi analisado o relaxamento (rebound) do solo.

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

A pressão de pré-compactação do solo foi determinada do índice de vazios, em função do logaritmo da pressão aplicada, usando 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 seqüência de pressões aplicadas na porção da compressão secundária da curva de compressão segundo metodologia de ARVIDSSON & KELLER (2004). Como foi obtido 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 & KOOLEN (1994).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Compressão do solo

As curvas de compressão do solo (e versus pressão normal σ), formado pelos agregados com diâmetros menores que 2,5 mm e entre 9,3 e 19,4 mm, são apresentadas na Figura 3. O comportamento geral é similar àqueles das curvas relatadas por LARSON et al. (1980), GUERIF (1982) e DERDOUR et al. (1994). 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 distribuição linear (linha virgem de compressão) [eq.(1)].

A porção linear das curvas começa a uma pressão aplicada maior para o solo com agregados menores de 2,5 mm que para o solo com agregados entre 9,3 e 19,4 mm, conforme apresentado na Tabela 2, pressão de pré-compactação (σ_c). Para ambos os solos, as linhas se deslocam para a esquerda com o aumento do teor de água, exceto com os teores de 24 e 25% no solo de agregados menores que 2,5 mm, que apresentam comportamento inverso às pressões inferiores a 100 kPa, mas são aproximadamente paralelas.

Este resultado mostra que o estado inicial do solo, à pressão mais baixa, foi mais importante que o teor de água, principalmente porque, nessa condição, os dois teores de água foram próximos. Nesse caso, o solo com maior índice de vazio inicial mostrou-se mais resistente às pressões baixas. Pode-se verificar, pela Figura 3, que o índice de vazios decresce mais rapidamente com o acréscimo do logaritmo da pressão aplicada no solo formado por agregados de diâmetros menores. Devido ao maior grau de compactação apresentado no estado inicial do ensaio com agregados de 9,3 a 19,4 mm, o índice de vazios varia levemente com o aumento da pressão aplicada. Comportamento semelhante foi obtido por LEBERT & HORN (1991).

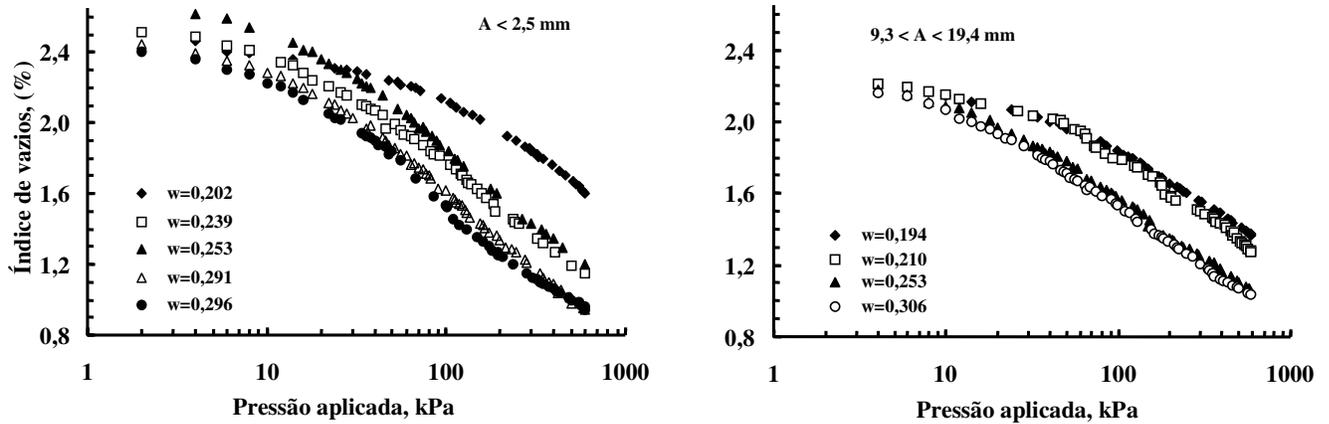


FIGURA 3. Variação do índice de vazios do solo em função da pressão aplicada a diferentes teores de água em amostras de solos de agregados menores que 2,5 mm, e de 9,3 a 19,4 mm.

O índice de compressão c reflete o decréscimo no índice de vazios por acréscimo unitário no logaritmo da pressão de compressão. Na Tabela 2, verifica-se que o solo de agregados menores que 2,5 mm apresenta maior índice de compressão (0,28; 0,37; 0,37 e 0,38, respectivamente, para os teores de água de 20%; 25%; 27,5% e 29%), enquanto o solo de agregados entre 9,3 e 19,4 mm apresenta menor índice de compressão, respectivamente, 0,26; 0,28; 0,27 e 0,28 para os mesmos teores de água.

TABELA 2. Valores das constantes da eq.(1) e da pressão de pré-compactação relativos ao índice de vazios em função do logaritmo da pressão de compressão

Faixa de Agregados (mm)	Constantes da eq.(1)	Teor de Água do Solo (%)									
		20,0	21,0	23,0	24,0	25,0	27,5	29,0	29,5	30,6	
A < 2,5	e_1 (kPa)	3,43			3,37	3,55	3,23	3,33	3,19		
	c	0,28			0,35	0,37	0,37	0,38	0,36		
	σ_c (kPa)	77,00			31,00	28,00	22,00	25,00	20,00		
9,3<A<19,4	e_1 (kPa)	3,02	3,12	3,08		2,86	2,78	2,81		2,81	
	c	0,26	0,27	0,26		0,28	0,27	0,28		0,28	
	σ_c (kPa)	68,00	65,00	52,00		24,00	18,00	23,00		25,00	

Na Figura 3, verifica-se claramente a diferença no comportamento da mudança do índice de vazios em três faixas de teor de água para o solo de agregados menores que 2,5 mm. A primeira faixa de comportamento é observada com o teor de água de 20,2%, que difere dos demais por apresentar pequena variação no índice de vazio com as pressões altas. A segunda e a terceira faixas apresentam características similares com os teores de água de 23,9%, 25,3%, 29,1% e 29,6%, mostrando paralelismo entre as curvas com esses teores de água, embora se constate maior redução na linha de compressão virgem com os teores de água de 29,1% e 29,6%.

Tais comportamentos podem estar relacionados ao tempo de aplicação das pressões no solo muito curto (média 20 s) face à altura da coluna de solo (30 cm), e o estado inicial do solo com menor índice de vazios para os teores de água mais elevados, levando o teor de água a assumir o papel principal na compactação do solo. No entanto, enquanto o teor de água aumentou, um deslocamento relativo em torno das partículas minerais do solo foi favorecido, e a compactabilidade do solo cresceu como resultado. Por outro lado, se o teor de água durante a compactação se tornou alto, parte do espaço poroso foi saturado e, sendo incompressível, resistiu parte da pressão de compressão, perfeitamente visível no solo com agregados de 9,3 a 19,4 mm, cujo comportamento da variação do

índice de vazios com os teores de água de 19,4% e 21,0% foi diferente da variação apresentada com os índices de água de 25,3% e 30,6%.

Para a drenagem do solo, o tempo foi uma função da distância, dificultando o fluxo da água dentro do corpo-de-prova alcançar a superfície externa dos poros, o que concorda com SÁNCHEZ-GIRÓN et al. (1998).

As curvas, representando a variação do índice de vazios totais, em função do teor de água para diferentes pressões aplicadas, estão apresentadas na Figura 4.

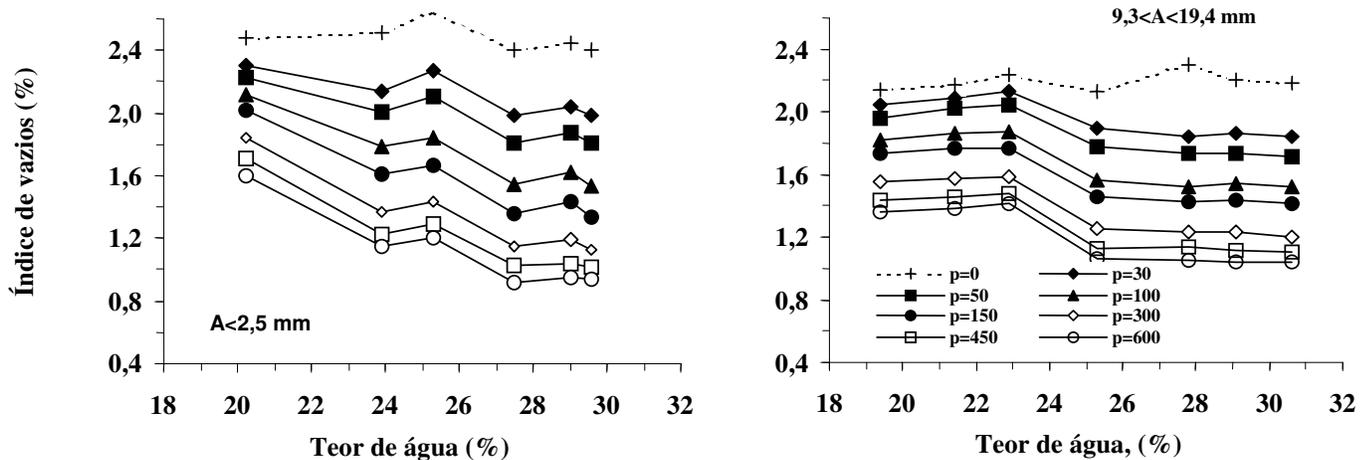


FIGURA 4. Variação do índice de vazios do solo em função do teor de água a diferentes pressões (p , kPa), aplicadas em amostras de solos de agregados (A) menores que 2,5 mm, e de 9,3 a 19,4 mm.

O solo formado pelas duas faixas de agregados permite definir claramente o comportamento hídrico do solo à compactação. Os agregados menores que 2,5 mm indicam que, às pressões inferiores a 150 kPa, o domínio hídrico, tal como definido por GUÉRIF (1982), situa-se ao teor de água inferior a 25%, o que caracteriza comportamento sólido desses agregados. Às pressões superiores a 150 kPa, visualiza-se o comportamento frágil desse solo ao teor de água inferior a 27,5%, não permitindo definição clara do comportamento sólido desses agregados em algum teor de água. A partir dos teores de água de 27,5%, os agregados já se definem como viscosos.

As amostras de solo formadas pelos agregados de 9,3 a 19,4 mm indicam comportamento sólido para todas as pressões aplicadas aos teores de água inferiores a 23,0%. Essa faixa de agregado apresenta definição mais nítida da influência da água na compactação do solo, mostrando três regiões bem definidas, indicando comportamento frágil para os teores de água de 23,0% a 25,2%, conduzindo esse solo a teores de água superiores a um comportamento viscoso. Pode-se inferir que a formação desse solo com agregados de diâmetros entre 9,3 e 19,4 mm oferece maior capacidade de suporte, trabalhando a teores de água mais reduzidos. Por outro lado, um determinado solo constituído por agregados inferiores a 2,5 mm, permite trabalhar com teor de água maior sem provocar a compactação do solo, mas coloca a carga aplicada como fator limitante.

Pressão de pré-compactação

Os valores da pressão de pré-compactação, apresentados na Tabela 2, mostram que, quando a pressão normal aplicada é menor que a pressão de pré-compactação, apenas pequena mudança no índice de vazios pode ser observada (Figura 3). Entretanto, quando a pressão excede a carga de pré-compactação, forte deformação é registrada por causa da deformação plástica.

Verifica-se, também, que a pressão de pré-compactação reduz com o aumento do teor de água aplicado no mesmo solo até valores próximos à saturação do solo. No entanto, constata-se que ocorre redução na pressão de pré-compactação com o aumento do tamanho de agregados para um mesmo teor de água. Como se trata de um solo com as mesmas características granulométricas (Tabela 1), a explicação para esse resultado pode estar relacionada à maior resistência do solo apresentada pelos agregados menores que 2,5 mm pelo fato de possuírem maior área de contato superficial entre as partículas minerais do solo, reduzindo o deslocamento relativo entre elas.

CONCLUSÕES

O tamanho de agregados na formação do solo tem efeito importante no processo de sua compactação.

A mudança da compactação do solo pode ser prevista em função do estado inicial do solo, da pressão aplicada e do teor de água.

Os valores de pressão de pré-compactação do solo mostram que é possível prever a resistência do solo causada pelos sistemas de cultivo.

REFERÊNCIAS

- ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil precompression stress. I. A survey of Swedish arable soils. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.77, p.85-95, 2004.
- BOIFFIN, J.; GUERIF, J.; STENGEL, P. Lês 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, 1990.
- BOIZARD, H.; RICHARD, G.; ROGER-ESTRADE, J.; DURR, C.; BOIFFIN, J. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.64, p.149-64, 2002.
- BRAUNACK, M.V.; DEXTER, A.R. Compaction of aggregate beds. In: EMERSON, BOND, DEXTER, (Eds.). *Modification of soil structure*. Shichester: John Wiley, 1978. p.119-26.
- DAWIDOWSKI, J.B.; KOOLEN, A.J. Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.31, p.277-82, 1994.
- DERDOUR, H.; ANGERS, D.A.; LAVERDIÈRE, M.R. Comportement mécanique d'un sol argileux. Effets de la taille des agrégats, de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v.74, p.185-91, 1994.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, 1999. 412 p.
- ETANA, A.; HAKANSSON, I. Effects of traffic with a tractor and a wheel loader on two ploughed moist soils. *Swedish Journal of Agricultural Research*, Uppsala, v.26, p.61-8, 1996.
- GILL, W.R.; VANDEN BERG, G.E. *Soil dynamics in tillage and traction*. Washington: Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, 1968. 511 p.
- GONZALEZ, F.L. *Morphologie, proprietes physiques et conditions de formation des elements structuraux de la couche laborée*: contribution à l'interprétation du profil cultural. 1991. 133 f. Thèse (Doct. Ing. INA-PG). 1991.
- GUÉRIF, J. Compactage d'un massif d'agrégats: effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*, Paris, v.2, n.3, p.287-93, 1982.

- HORN, H.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK van. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier, 1994. 662 p.
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soil from eight soil orders. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.44, n.3, p.450-7, 1980.
- LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.19, p.275-86, 1991.
- O'SULLIVAN, M. F. Uniaxial compaction effects on soil physical properties in relation to soil type and cultivation. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.24, p.257-69, 1992.
- RICHARD, G.; BOIZARD, H.; ROGER-ESTRADE, J.; BOIFFIN, J.; GUÉRIF, J. Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.51, p.151-60, 1999.
- SANCHEZ-GIRÓN, V.; ANDREU, E.; HERNANZ, J.L. Response of five types of soil to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression tests. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam v.48, p.37-50, 1998.