

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

COMPACTAÇÃO E COMPRESSIBILIDADE DO SOLO SOB SISTEMAS DE MANEJO E NÍVEIS DE UMIDADE⁽¹⁾

Apolino José Nogueira da Silva⁽²⁾ & Mário Sérgio Vaz Cabeda⁽³⁾

RESUMO

O conteúdo de água do solo e os sistemas de manejo podem promover alterações em seus parâmetros de compressibilidade. O objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos do conteúdo de água e de sistemas de manejo com cana-de-açúcar no grau de compactação e parâmetros de compressibilidade de um Argissolo Amarelo Coeso. Foram selecionadas quatro áreas na usina Triunfo, no Estado de Alagoas, a saber: uma não irrigada, uma irrigada, uma com aplicação de vinhaça e uma sob floresta nativa, como condição original. Amostras foram retiradas de cada área a 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,8 m de profundidade, para determinar as alterações nos parâmetros de compactação, e nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m, para determinar as alterações nos parâmetros de compressibilidade do solo. Os sistemas de manejo irrigado e sequeiro promoveram aumento no grau de compactação do solo e na resistência dos agregados à ruptura, resultando em aumento na capacidade de suporte de carga do solo. O aumento no conteúdo de água do solo reduziu a pressão de precompactação e aumentou o índice de compressão do solo, acarretando a redução da capacidade de suporte de carga do solo com o aumento do conteúdo de água.

Termos de indexação: pressão de precompactação, índice de compressão, resistência dos agregados à ruptura, cana-de-açúcar, tabuleiros costeiros.

⁽¹⁾ Parte de Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Recebido para publicação em junho de 2004 e aprovado em outubro de 2006.

⁽²⁾ Professor da Escola Agrícola de Jundiá, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Caixa Postal 07, CEP 59280-000 Macaíba (RN). E-mail: ajndas@ufrnet.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Caixa Postal 776, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). E-mail: mscabeda@uol.com.br

SUMMARY: SOIL COMPACTION AND COMPRESSIBILITY PARAMETERS IN RELATION TO MANAGEMENT SYSTEMS AND WATER CONTENT

Soil water content and management systems can promote changes in compressibility parameters. The objective of this research was to study the effects that water content and sugarcane management systems have on the compaction degree and compressibility parameters of a cohesive Yellow Argisol. Four sites were selected in the surroundings of the sugar mill Triunfo, in the state of Alagoas, Brazil; one site with irrigation and a second without irrigation, a third with vinasse application and a fourth under native forest, taken as representative of the original soil condition. Samples from each site were collected at 0–0.2, 0.2–0.4 and 0.4–0.8 m depths and at 0–0.2 and 0.2–0.4 m, to determine alterations in the soil compaction and compressibility parameters, respectively. Management systems with and without irrigation increased the degree of soil compaction and resistance of aggregates to rupture as compared to those of the soil under native forest, resulting in an increase in the soil load support capacity. The increases in the soil water content reduced precompaction pressure and enhanced the compression index, resulting in a lower soil load support capacity.

Index terms: precompaction pressure, compression index, aggregate rupture strength, sugarcane, coastal plain.

INTRODUÇÃO

A degradação da estrutura do solo decorrente da compactação tem provocado efeitos negativos em suas propriedades físicas, químicas e biológicas, com prejuízos ao desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, à produção de alimentos (Gupta et al., 1989; Camargo & Alleoni, 1997).

O processo de compactação do solo pode ser atribuído tanto à diminuição do espaço poroso entre os agregados, ocorrendo um rearranjo destes na matriz do solo, como à ruptura e destruição dos agregados, havendo rearranjo e orientação das partículas, o que resulta numa massa coesa na matriz do solo (Horn et al., 1995). Esses processos vão depender do conteúdo de água do solo e da pressão externa aplicada ao solo pelos sistemas de manejo adotados.

A pressão externa sobre o solo imposta por veículos e implementos agrícolas nas atividades de cultivo tem sido enfatizada na literatura como a principal causa da compactação (Soane et al., 1981; Marsili et al., 1998). Fatores relacionados com as máquinas agrícolas, como pneus estreitos ou com elevada pressão de inflação e alta carga por eixo, causam o aumento da compactação do solo (Hakansson, 1990). Esse fenômeno se agrava quando o solo é trabalhado com um conteúdo de água elevado, inadequado para as atividades agrícolas. A aplicação de cargas sobre o solo após o seu afrouxamento pelo preparo para o cultivo também tem aumentado a compactação dos solos agrícolas (Camargo & Alleoni, 1997).

A redução do volume de vazios do solo decorrente de pressões exercidas sobre ele tem sido estudada pela curva de compressão. Essa curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão

vertical aplicada ao solo e algum parâmetro relacionado com a estrutura do solo, como o índice de vazios, a porosidade ou a densidade do solo (Larson et al., 1980; Smith et al., 1997). Pela curva de compressão do solo, determina-se a pressão de precompactação, que é a capacidade máxima do solo de suportar carga, e o índice de compressão, que é um indicador da susceptibilidade do solo à compactação, pois representa a redução da porosidade em relação ao aumento da pressão aplicada. Quanto maior o índice de compressão, mais compressível o solo (Larson et al., 1980).

O sistema de manejo do solo pode exercer grande influência nos parâmetros de compactação e compressibilidade do solo. Carpenedo (1994), comparando os sistemas de preparo convencional e de semeadura direta com aveia/milho em Argissolo Vermelho-Amarelo, verificou valores mais elevados da pressão de precompactação nos solos sob semeadura direta. Segundo o autor, a grande adição de resíduos e os maiores teores de matéria orgânica do solo, associados à ausência de revolvimento nesse sistema de manejo, melhoram a estrutura do solo, conferindo-lhe maior resistência às pressões externas, principalmente em baixos conteúdos de água.

Os sistemas de manejo podem promover um arranjo mais compacto das partículas primárias e agregados decorrente da compactação, o que pode resultar num novo estado de resistência do solo às pressões externas (Gupta et al., 1989), refletindo em alterações na sua capacidade de suporte de carga. Embora o preparo do solo alivie a compactação presente na camada superficial, esta pode permanecer na forma de aumento da densidade dos agregados, o que resulta em alterações na resistência dos agregados à ruptura (Voorhees et al., 1978).

A avaliação da compressibilidade do solo e da sua capacidade de suporte de carga, sob diferentes condições de umidade e sob diversos sistemas de manejo, é de grande importância não só para determinar as pressões máximas que o solo pode suportar nessas condições, mas também para minimizar os riscos à compactação em solos cultivados.

O objetivo deste trabalho foi verificar o efeito do conteúdo de água e dos sistemas de manejo com cana-de-açúcar nos parâmetros de compactação e compressibilidade de um Argissolo Amarelo Coeso de tabuleiro costeiro.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em áreas da Usina Triunfo Agroindustrial, localizada entre os paralelos 9° 40' 47" e 9° 42' 30" S e os meridianos 36° 08' 12" e 36° 05' 03" W, no município de Boca da Mata, Alagoas. O solo estudado foi classificado como Argissolo Amarelo Coeso latossólico textura média/argilosa, escolhido com base em levantamento pedológico realizado pela Usina (Prosped, 1992). O solo é derivado do grupo Barreiras, o qual é formado por sedimentos areno-argilosos, com fração areia constituída essencialmente de quartzo e com a fração argila constituída de caulinita, com baixos teores de óxidos de ferro (Jacomine et al., 1975). A precipitação média anual fica em torno de 1.200 mm (Nimer, 1989) e a temperatura média anual próxima aos 29 °C. O relevo é plano e suave ondulado, que caracteriza a região dos Tabuleiros Costeiros (Jacomine et al., 1975).

Foram selecionados solos em áreas de produção com a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), sendo escolhidas três parcelas, representativas de manejos adotados nessa cultura. Esses manejos foram comparados entre si e em relação a uma testemunha absoluta, representada por solo em condições naturais (floresta subperenifolia). Todos os tratamentos estão situados numa mesma posição topográfica, em topo plano de baixo platô costeiro. O preparo do solo é o mesmo em todas as parcelas cultivadas. No plantio da cana-planta ou a cada 5–6 anos, quando da renovação do canavial, o preparo

consiste em subsolagem realizada com subsolador marca Civemasa modelo STA 9P de sete hastes, espaçadas 45 cm umas das outras e com ponteiros de 7 cm de largura, trabalhando a uma profundidade de 35 cm. Após a subsolagem, são realizadas duas gradagens pesadas com grade de 18 discos de 30" de diâmetro, trabalhando a uma profundidade de 25 cm, com o objetivo de destruir a soqueira da cana. A abertura dos sulcos é feita com sulcador de três linhas a 25 cm de profundidade. No plantio, a cana-de-açúcar é distribuída manualmente no sulco, e, na colheita, a cana é cortada manualmente e carregada em caminhão MBB 2635 por carregadeira convencional Ford 5630. Em todas as áreas cultivadas, a cana-de-açúcar é queimada antes da colheita.

Na área com fertirrigação com vinhaça, são aplicados anualmente 500 m³ ha⁻¹ de vinhaça diluída por ciclo da cultura, e a aplicação é feita por aspersor com vazão de 150 m³ h⁻¹. Também são aplicados 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro na renovação do canavial. Esse manejo é aplicado há 25 anos consecutivos nesta área. A composição química média da vinhaça é apresentada no quadro 1.

Na área com cultivo sob irrigação, é aplicada uma lâmina de 120 mm de água por ciclo da cultura, através de aspersor com vazão de 100 m³ h⁻¹, sendo esse tratamento aplicado há 25 anos consecutivos. A adubação da cana-planta é feita de acordo com análise do solo, sendo, geralmente, administrados 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, e 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro, e na cana-soca, são aplicados 60 e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

A área com regime de sequeiro é cultivada, há 30 anos, com este sistema de cultivo e nunca foi irrigada ou fertirrigada. São aplicados 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, na cana-planta, e 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro, e, na cana-soca são aplicados 60 e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

As amostras foram coletadas ao acaso nas áreas com os diferentes sistemas de manejo, nas camadas de 0–0,2; 0,2–0,4 e 0,4–0,8 m, sendo retiradas num ponto situado a 0,4 m da linha de plantio da cana-de-açúcar.

Quadro 1. Composição química média da vinhaça utilizada

| pH | CE ⁽¹⁾ | C | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | SO ₄ ²⁻ | Fe ²⁺ |
|------|--------------------|-------------------|------|-------------------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------------------|
| | dS m ⁻¹ | g L ⁻¹ | | | g L ⁻¹ | | | mg L ⁻¹ | |
| 5,71 | 3,60 | 9,3 | 0,56 | 0,19 | 0,96 | 0,28 | 0,13 | 3,11 | 1,14 |

⁽¹⁾ Condutividade elétrica.

O grau de compactação do solo foi determinado, segundo Caputo (1988), pela razão entre a densidade do solo obtida com anel volumétrico (Embrapa, 1997) e a densidade máxima de compactação obtida pelo ensaio Proctor normal (Caputo, 1988).

A resistência dos agregados à ruptura foi determinada segundo Silva (2003), usando-se 45 agregados coletados em três pontos aleatórios de cada tratamento (15 agregados em cada ponto). Os agregados foram secos ao ar por 24 h, passados em peneira de 2,83 mm e retidos em peneira de 2 mm, para posterior determinação da resistência à ruptura.

Para o ensaio de compressão uniaxial, foram retiradas amostras indeformadas nas camadas de 0–0,2 e 0,2–0,4 m com auxílio de amostrador com anéis metálicos rígidos com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, e, posteriormente, acondicionadas em sacos plásticos sobre espuma, para serem transportadas sem perturbação até o laboratório. As amostras foram preparadas e saturadas por ascensão capilar, durante 24 h, sendo depois submetidas a tensões correspondentes aos conteúdos de água médios de 0,08; 0,11; 0,14 e 0,19 kg kg⁻¹. As amostras preparadas foram submetidas a ensaios de compressão uniaxial, conforme ABNT (1990), com adaptações para solo não saturado, e realizados em uma prensa de compressão uniaxial, marca Testop. A razão de carga aplicada foi igual a 2, com seqüência de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa e leituras realizadas aos 1/8; 1/4; 1/2; 1; 2; 4; 5; 6 e 7 min. O tempo de 7 min para o incremento das pressões foi determinado através de pré-testes, verificando-se que, nesse tempo, ocorreu cerca de 98 % da deformação (Figura 1). A deformação relativa do solo foi obtida pela diferença entre a altura inicial da amostra (*h_i*) e a altura final (*h_f*), após a aplicação de cada pressão vertical, dividida pela altura inicial (Holtz & Kovacs, 1981). Após o ensaio de compressibilidade, as amostras foram levadas à estufa para avaliação da umidade gravimétrica.

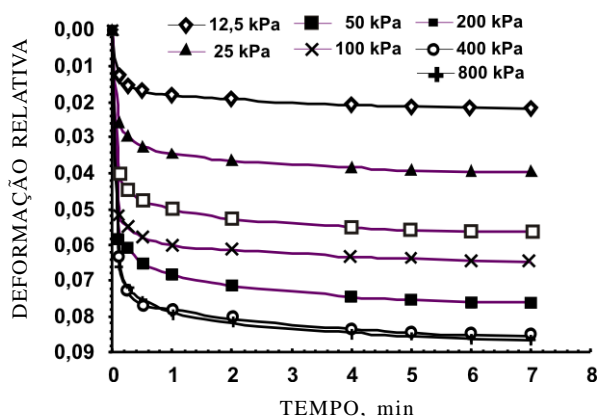


Figura 1. Deformação do solo, considerando o tempo de aplicação da pressão vertical.

Com base nos resultados, foram traçadas as curvas de compressibilidade do solo, sendo determinada a pressão de precompactação pelo método Pacheco Silva (ABNT, 1990). O índice de compressão (*C_c*) foi obtido, conforme Lambe (1951), pela expressão:

$$C_c = \frac{-\Delta e}{\Delta \log P}$$

em que: Δe = variação do índice de vazios na reta virgem; $\Delta \log P$ = variação do logaritmo da pressão aplicada no intervalo correspondente.

Para observação do empacotamento de partículas de argila e de silte e da porosidade na matriz do solo, após o teste de compressão uniaxial, amostras de agregados foram preparadas por metalização com o elemento ouro e analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL, modelo JSM 5800, com voltagem de aceleração de 15 kV, sendo usadas magnificações variando de 200 a 10.000 vezes. As micrografias foram obtidas por câmera Kodak Polaroid acoplada ao MEV.

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5 % significância, usando-se o software SANEST (Zonta & Machado, 1980). As análises de regressão foram feitas com o software SigmaStat 2.03 (SPSS, 1995).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se um aumento significativo no grau de compactação dos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça, em relação ao solo da mata, nas camadas de 0–0,2 m e 0,2–0,4 m (Quadro 2). Os efeitos das atividades de cultivo com a cana-de-açúcar também atingiram a camada de 0,4–0,8 m, principalmente nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado, que apresentaram aumento significativo no grau de compactação nessa camada, em relação aos outros tratamentos.

O aumento do grau de compactação nas áreas com cana-de-açúcar, em relação ao solo da mata, possivelmente está relacionado com o tráfego de máquinas agrícolas nas atividades de cultivo. O tráfego de caminhões carregados com cana-de-açúcar na época da colheita, com massa total de até 26.000 kg, contribuiu, provavelmente, para a compactação do solo, tanto na superfície como em profundidade. O uso da grade pesada nas operações de preparo do solo também contribuiu para o aumento do grau de compactação do solo em profundidade. De acordo com Mantovani (1990), a grande pressão exercida sobre o solo pela grade pesada pode causar compactação em camadas subsuperficiais. A utilização de tratores de grande porte na operação de subsolagem, a cada 5–6 anos, na renovação do canal, também pode ser um fator adicional no processo de compactação dos solos cultivados com cana-de-açúcar.

Quadro 2. Grau de compactação e resistência dos agregados à ruptura, considerando os sistemas de uso e manejo nas profundidades estudadas

| Camada | Sistema de uso e manejo do solo | | | |
|---|---------------------------------|----------|-----------|----------|
| | Mata | Sequeiro | Irrigado | Vinhaça |
| Grau de compactação (%) | | | | |
| m | | | | |
| 0-0,2 | 75,0 Db | 87,5 Ac | 84,6 Bb | 80,7 Cb |
| 0,2-0,4 | 82,0 Da | 90,0 Bb | 94,3 Aa | 84,7 Ca |
| 0,4-0,8 | 83,6 Ca | 92,8 Ba | 95,8 Aa | 84,8 Ca |
| Resistência dos agregados à ruptura (kPa) | | | | |
| 0-0,2 | 121,3 Cc | 156,7 Ab | 161,7 Ab | 145,6 Bc |
| 0,2-0,4 | 133,8 Bb | 158,7 Ab | 163,0 Aab | 156,5 Ab |
| 0,4-0,8 | 150,6 Ba | 166,9 Aa | 171,5 Aa | 164,8 Aa |

Letras maiúsculas iguais, na mesma linha, e minúsculas iguais, na mesma coluna, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (5%).

O solo com vinhaça apresentou grau de compactação significativamente menor, em relação aos solos sob os sistemas de sequeiro e irrigado, ficando com característica mais próxima ao solo da mata, possivelmente graças aos efeitos da matéria orgânica fornecida pela vinhaça (Silva, 2003), refletindo em melhor estrutura do solo.

Houve aumento significativo nos valores de resistência dos agregados à ruptura nos solos cultivados com cana-de-açúcar, em relação ao solo da mata, nas três camadas estudadas (Quadro 2). Estes resultados estão de acordo com os de Chan & Hulugalle (1999) que verificaram um aumento da resistência dos agregados à ruptura de 74 kPa para 143 kPa, na camada de 5-10 cm, quando o manejo do solo passou de pastagem nativa para preparo convencional, respectivamente. A maior resistência dos agregados nos solos cultivados está, provavelmente, relacionada com a maior compactação desses solos, que resulta em agregados mais densos (Roth et al., 1991). Este resultado confirma a correlação positiva e significativa entre o grau de compactação e a resistência dos agregados à ruptura ($r^2 = 0,60^*$). D'Agostini (1992) enfatizou que agregados sujeitos a tensões compressivas tornam-se mais densos, em razão do rearranjo de partículas, e mais resistentes às pressões externas, em razão do aumento da sua coesividade.

A maior resistência dos agregados à ruptura nas áreas cultivadas é indício de que o grau de compactação teve grande influência no desenvolvimento da coesão e da resistência dos agregados. A resistência dos agregados à ruptura, a densidade do solo e o conteúdo de água exercem influência na capacidade do solo em suportar carga (Carpenedo, 1994).

Houve efeito significativo dos sistemas de manejo e umidade sobre a pressão de precompactação do solo, nas duas camadas estudadas (Quadro 3). As médias gerais foram de 98,9 e 109,7 kPa, para as camadas de

0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente. A influência da umidade foi significativa nos quatro sistemas de manejo e nas duas camadas estudadas, com os valores de pressão de precompactação diminuindo com o aumento da umidade do solo, verificando-se, desta forma, a maior resistência do solo às pressões externas na medida em que diminui o conteúdo de água do solo. As equações de regressão que relacionam a pressão de precompactação e a umidade do solo encontram-se no quadro 4. Os valores da pressão de precompactação (σ_c) decresceram com o aumento da umidade do solo (U_g), seguindo o modelo $\sigma_c = a \ln(U_g) + b$, em que os parâmetros empíricos "a" e "b" foram obtidos por meio de ajuste das curvas de regressão. O parâmetro "a" variou de -51,84 a -157,26 e o "b" variou de -5,96 a -212,74, enquanto os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,75 a 0,95, sendo os valores mais baixos no solo sob mata nativa nas duas camadas estudadas (Quadro 4).

A redução da pressão de precompactação com o aumento da umidade do solo tem sido verificada por outros autores (Carpenedo, 1994; Kondo & Dias Junior, 1999; Boeni, 2000). Segundo Hillel (1980), o solo com baixo conteúdo de água torna-se mais resistente em razão da dureza de sua matriz, que exibe alta resistência friccional às deformações impostas por pressões externas aplicadas ao solo. Quando a umidade do solo aumenta, filmes de água reduzem a fricção entre as partículas do solo, agindo como lubrificante e favorecendo o rearranjo.

Para os conteúdos de água mais baixos (0,08 e 0,11 kg kg⁻¹), os solos sob os sistemas de sequeiro, irrigado e vinhaça apresentaram maior pressão de precompactação em relação ao solo sob mata nativa, nas duas camadas estudadas. Isso reflete a história de tensões dos solos cultivados, em que cargas aplicadas pelas máquinas agrícolas nas operações de cultivo promoveram maior grau de compactação

Quadro 3. Pressão de precompactação (kPa), considerando os sistemas de manejo e conteúdo de água, nas profundidades estudadas

| Conteúdo de água | Sistema de uso e manejo do solo | | | |
|---------------------|---------------------------------|------------------|-----------|------------|
| | Mata | Sequeiro | Irrigado | Vinhaça |
| kg kg ⁻¹ | | | | |
| | | Camada 0–0,2 m | | |
| 0,08 | 119,0 Ca | 150,2 Aa | 144,3 ABa | 130,8 BCa |
| 0,11 | 113,0 Ba | 137,3 Aa | 132,0 ABa | 115,3 Ba |
| 0,14 | 104,3 Aa | 86,5 Ab | 89,3 Ab | 91,0 Ab |
| 0,19 | 72,5 Ab | 24,2 Cc | 26,3 Cc | 45,5 Bc |
| | | Camada 0,2–0,4 m | | |
| 0,08 | 132,5 Ba | 160,5 ABa | 172,0 Aa | 147,8 ABa |
| 0,11 | 116,3 Ba | 143,3 ABa | 149,8 Ab | 121,0 ABab |
| 0,14 | 106,5 Ab | 105,3 Ab | 107,5 Ac | 94,8 Ab |
| 0,19 | 62,5 Ab | 33,5 Bc | 35,8 Bd | 66,8 Ac |

Letras maiúsculas iguais, na mesma linha, e minúsculas iguais, na mesma coluna, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (5%).

Quadro 4. Equações de regressão correspondentes à pressão de precompactação (σ_c , kPa), considerando a umidade gravimétrica do solo (U_g , kg kg⁻¹), nos tratamentos estudados

| Sistema de uso e manejo do solo | Equação de regressão | |
|---------------------------------|---|--------------------|
| | Camada 0–0,2 m | |
| Mata nativa | $\sigma_c = -51,841 \text{ Ln}(U_g) - 5,962$ | $R^2 = 0,770^{**}$ |
| Sequeiro | $\sigma_c = -143,56 \text{ Ln}(U_g) - 200,65$ | $R^2 = 0,890^{**}$ |
| Irrigado | $\sigma_c = -139,28 \text{ Ln}(U_g) - 192,32$ | $R^2 = 0,892^{**}$ |
| Vinhaça | $\sigma_c = -100,59 \text{ Ln}(U_g) - 113,67$ | $R^2 = 0,902^{**}$ |
| | Camada 0,2–0,4 m | |
| Mata nativa | $\sigma_c = -80,835 \text{ Ln}(U_g) - 63,785$ | $R^2 = 0,754^{**}$ |
| Sequeiro | $\sigma_c = -149,92 \text{ Ln}(U_g) - 202,329$ | $R^2 = 0,881^{**}$ |
| Irrigado | $\sigma_c = -157,256 \text{ Ln}(U_g) - 212,742$ | $R^2 = 0,925^{**}$ |
| Vinhaça | $\sigma_c = -97,353 \text{ Ln}(U_g) - 95,155$ | $R^2 = 0,949^{**}$ |

nestes solos, conferindo uma resistência à compressão maior. Esse efeito é comprovado pela correlação positiva e significativa entre a pressão de precompactação e o grau de compactação do solo (Figura 2). O efeito da compactação do solo na pressão de precompactação também foi verificado por Silva et al. (2002b), que constataram aumento significativo da pressão de precompactação de 68 kPa para 164 kPa, quando o solo estava com densidades de 1,3 e 1,6 g cm⁻³, respectivamente, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.

O maior espaço poroso do solo da mata proporcionou maior deformação neste solo e, conseqüentemente, menor capacidade de suporte de carga. Nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar,

o maior grau de compactação proporcionou um empacotamento mais denso das partículas e conseqüente maior número de pontos de contatos entre elas, promovendo maior capacidade de suporte de carga nesses solos nos conteúdos de água mais baixos.

Os solos sob os sistemas de sequeiro, irrigado e vinhaça apresentaram menor capacidade de suporte de carga, em relação ao solo da mata, quando o solo apresentava conteúdo de água de 0,19 kg kg⁻¹. Isso deveu-se, provavelmente, ao fato de estar o conteúdo de água acima dos limites de plasticidades dos solos sob os sistemas de sequeiro, irrigado e vinhaça (0,14; 0,15 e 0,18 kg kg⁻¹, respectivamente), como verificado por Silva (2003), situação que promoveu a deformação

plástica desses solos por ocasião do teste de compressão uniaxial. O solo sob mata nativa, no entanto, que apresentou um limite de plasticidade de $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$ (Silva, 2003), registrou maior capacidade de suporte de carga, em relação aos solos cultivados, no conteúdo de água de $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$.

A importância da pressão de precompactação, associada ao conteúdo de água, é demonstrada na figura 3. Analisando as micrografias de amostras de solo da mata, obtidas com microscópio eletrônico de varredura (MEV) após o teste de compressão uniaxial, verifica-se que, quando o solo está com um conteúdo de água de $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$, após aplicação de pressão vertical de 50 kPa, o solo apresenta uma estrutura aberta, com porosidade preservada entre os agregados e entre as partículas de silte e argila (Figura 3a). A pressão vertical de 50 kPa aplicada é menor que a pressão de precompactação deste solo no conteúdo de água de $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$ (72,5 kPa, quadro 3), o que fez com que o solo preservasse a sua estrutura, visto ser a pressão aplicada menor que as pressões já experimentadas nesse solo, na sua história de tensões.

Com a aplicação de uma pressão compressiva de 100 kPa, no solo com conteúdo de água de $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$, nota-se nítida alteração na organização da matriz do solo e drástica redução da porosidade, ficando o solo com aspecto maciço (Figura 3b). Observa-se, na matriz do solo um aspecto de orientação de suas partículas, graças à deformação plástica ocorrida pela compressão do solo. Isto se deve ao fato de a pressão vertical de 100 kPa, aplicada no teste de compressão uniaxial, ser maior que a pressão de precompactação do solo da mata, para o conteúdo de água de $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$ (Quadro 3).

Com o conteúdo de água mais baixo ($0,14 \text{ kg kg}^{-1}$), o solo suporta uma pressão vertical de 100 kPa, mantendo a organização da matriz com uma estrutura aberta, formada por agregados distintos, com uma rede de poros entre eles (Figura 3c), visto que esta pressão aplicada está abaixo da pressão de precompactação

deste solo (104 kPa). Com aplicação de uma pressão vertical de 200 kPa, no entanto, verifica-se a degradação da estrutura do solo (Figura 3d), que fica com aspecto maciço, com orientação das partículas de argila, por estar a pressão compressiva aplicada acima da pressão de precompactação do solo, no conteúdo de água de $0,14 \text{ kg kg}^{-1}$. O teor de umidade adequado para a realização das atividades agrícolas e a pressão máxima que o solo pode suportar tornam-se importantes para evitar a degradação da estrutura e compactação dos solos cultivados.

De acordo com Lebert & Horn (1991), a pressão de precompactação do solo depende não somente de atributos como densidade e umidade do solo, mas também de fatores relacionados com sua estrutura, como agregação do solo. No presente estudo, além da umidade e grau de compactação do solo, a resistência dos agregados à ruptura possivelmente influenciou a capacidade de suporte de carga dos solos estudados, como é sugerido pela correlação significativa entre a pressão de precompactação e a resistência dos agregados à ruptura ($r^2 = 0,56^*$). Carpenedo (1994) e Silva et al. (2000) também verificaram a influência significativa de alguns atributos na pressão de precompactação do solo, dentre eles a resistência dos agregados à ruptura, umidade e densidade do solo.

A capacidade de suporte de carga do solo pode ser elevada, conforme duas situações extremas: a primeira, quando o solo está com um grau de compactação elevado, refletindo na maior resistência do solo à compressão, esta condição, porém, não é favorável ao desenvolvimento das plantas. Uma segunda situação, em que o solo pode apresentar alta pressão de precompactação, ocorre quando ele está com uma boa estabilidade estrutural, que ocorre em solos submetidos a sistemas de manejo com ausência de revolvimento do solo, como observado por alguns autores (Carpenedo, 1994; Silva et al., 2002a), que verificaram maiores pressões de precompactação em solos cultivados sob sistema plantio direto, em relação a solos sob preparo convencional.

Dentre os quatro sistemas de manejo deste estudo, verifica-se que a capacidade de suporte de carga dos solos sob mata nativa e vinhaça está associada às melhores condições para o desenvolvimento das plantas (menor grau de compactação), indicando que a sua resistência, representada pela pressão de precompactação, está vinculada, possivelmente, à estabilidade estrutural. Por outro lado, os solos sob sequeiro e irrigado têm a sua capacidade de suporte de carga associada ao maior grau de compactação do solo.

Houve efeito significativo dos sistemas de manejo e umidade sobre o índice de compressão do solo nas duas camadas estudadas (Quadro 5). O índice de compressão, por ser a inclinação da reta de compressão virgem, é usado como um indicador da compressibilidade do solo, sendo um solo tanto mais compressível quanto maior o seu índice de compressão.

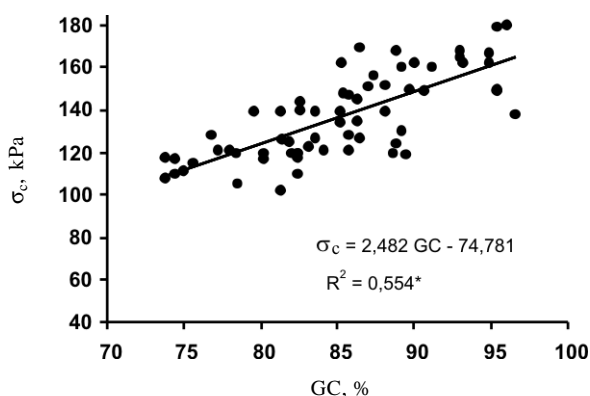


Figura 2. Relação entre a pressão de precompactação (σ_c) e o grau de compactação do solo (GC).

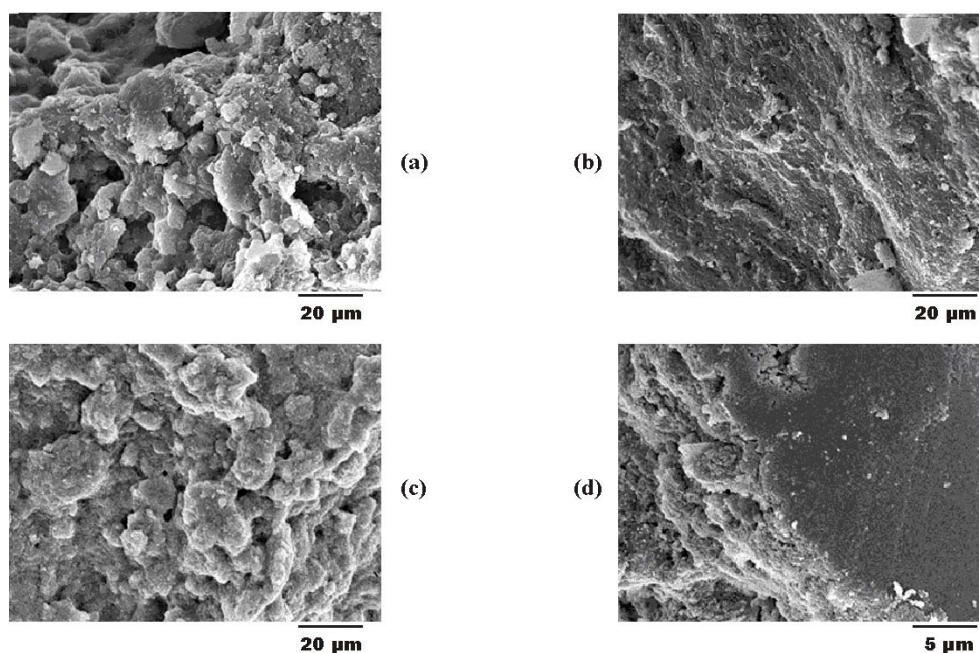


Figura 3. Foto micrografias obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) de amostras do solo sob mata nativa (camada 0–0,2 m), após teste de compressão uniaxial. (a) $\sigma_n = 50$ kPa; $U_g = 0,19$ kg kg⁻¹ (b) $\sigma_n = 100$ kPa; $U_g = 0,19$ kg kg⁻¹ (c) $\sigma_n = 100$ kPa; $U_g = 0,14$ kg kg⁻¹ (d) $\sigma_n = 200$ kPa; $U_g = 0,14$ kg kg⁻¹.

Quadro 5. Índice de compressão do solo, considerando o sistema de manejo e conteúdo de água, nas profundidades estudadas

| Conteúdo de água | Sistema de uso e manejo do solo | | | |
|---------------------|---------------------------------|----------|----------|----------|
| | Mata | Sequeiro | Irrigado | Vinhaça |
| kg kg ⁻¹ | | | | |
| | Camada 0–0,2 m | | | |
| 0,08 | 0,23 Ab | 0,13 Bb | 0,14 Bb | 0,21 Ab |
| 0,11 | 0,28 Aa | 0,14 Cb | 0,15 Cb | 0,25 Ba |
| 0,14 | 0,31 Aa | 0,21 Ba | 0,19 Ba | 0,28 Aa |
| 0,19 | 0,29 Aa | 0,18 Ba | 0,19 Ba | 0,28 Aa |
| | Camada 0,2–0,4 m | | | |
| 0,08 | 0,22 Ab | 0,16 Bb | 0,15 Bb | 0,21 Ab |
| 0,11 | 0,29 Aa | 0,18 Bb | 0,15 Bb | 0,27 Aa |
| 0,14 | 0,30 Aa | 0,27 Ba | 0,26 Ba | 0,28 ABA |
| 0,19 | 0,30 Aa | 0,27 Aa | 0,26 Aa | 0,30 Aa |

Letras maiúsculas iguais, na mesma linha, e minúsculas iguais, na mesma coluna, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (5%).

Os maiores valores do índice de compressão do solo ocorreram nos conteúdos de água mais elevados em todos os sistemas de manejo nas duas camadas estudadas, o que demonstra a menor resistência do solo à compressão, à medida que aumenta o conteúdo de água do solo. Tal fenômeno ocorre pelo fato de a água agir como lubrificante, favorecendo o deslocamento e o rearranjo das partículas, resultando numa maior compressibilidade do solo

(Al-Shayea, 2001). Silva et al. (2002a) também verificaram maiores valores de índice de compressão em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos conteúdos de água mais elevados. O atrito entre as partículas quando o solo está mais seco é suficientemente grande para limitar o seu deslocamento e rearranjo, sendo necessária maior quantidade de água para facilitar o deslocamento das partículas do solo.

Os solos sob os sistemas mata nativa e vinhaça apresentaram os maiores valores de índice de compressão nas duas camadas estudadas, possivelmente por seu menor grau de compactação nestes dois solos, que possibilita maior espaço poroso, permitindo maior rearranjo das partículas do solo com a aplicação das pressões externas pelo teste de compressão uniaxial.

Nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado, a maior compactação destes solos proporcionou menor índice de compressão, ou seja, menor compressibilidade do solo, como consequência do maior número de pontos de contatos entre as partículas e maior atrito entre elas. A influência do grau de compactação do solo na sua compressibilidade é mostrada na figura 4, onde se verifica que o índice de compressão tem correlação negativa e significativa com o grau de compactação do solo, mostrando que o estado de maior compactação e o arranjo mais compacto das partículas do solo tornam-no menos susceptível à compressão. Carpenedo (1994) também verificou correlação negativa entre o índice de compressão e o grau de compactação do solo em um Podzólico Vermelho-Escuro.

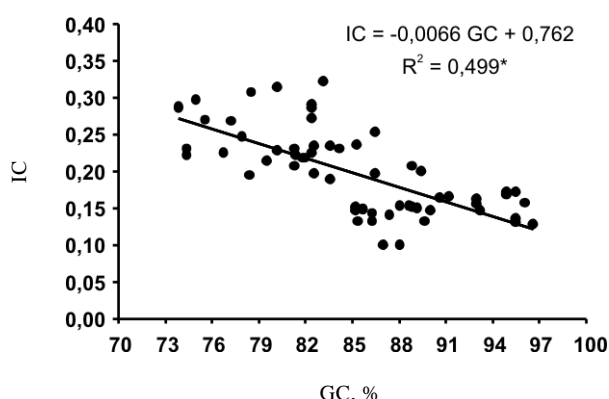


Figura 4. Relação entre o índice de compressão (IC) e o grau de compactação do solo (GC).

CONCLUSÕES

1. Os sistemas de manejo com cana-de-açúcar influenciaram os parâmetros de compressibilidade do solo, ou seja, nos sistemas sequeiro e irrigado, a pressão de precompactação aumentou e diminuiu o índice de compressão em relação ao solo de mata, refletindo o maior grau de compactação do solo e a maior resistência dos agregados à ruptura nesses sistemas de manejo.

2. Os parâmetros de compressibilidade foram influenciados pelo conteúdo de água do solo, verificando-se que, à medida que aumentava a umidade do solo, diminuía os valores da pressão de precompactação

e aumentava o índice de compressão do solo, indicando menor capacidade de suporte de carga e maior compressibilidade do solo, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Usina Triunfo e aos engenheiros-agrônomo Arnaldo Jugurta (Usina Triunfo) e José Fernandes Wanderley (UFRPE), pelo apoio logístico nas atividades de campo.

LITERATURA CITADA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Ensaio de adensamento unidimensional. NER-12007. Rio de Janeiro, 1990. 13p.
- AL-SHAYEA, N.A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. *Eng. Geol.*, 62:319-342, 2001.
- BOENI, M. Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 99p. (Tese de Mestrado)
- CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1997. 132p.
- CAPUTO, H.P. Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos. 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1988. 234p.
- CARPENEDO, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 106p. (Tese de Doutorado)
- CHAN, K.Y. & HULUGALLE, N.R. Changes in some soil properties due to tillage practices in rainfed hardsetting Alfisols and irrigated Vertisols of eastern Australia. *Soil Till. Res.*, 53:49-57, 1999.
- D'AGOSTINI, L.R. Variações temporais da coesividade entre agregados de solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 82p. (Tese de Doutorado)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P. & DEFRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. *Adv. Agron.*, 42:311-338, 1989.
- HAKANSSON, I. Soil compaction control: objectives, possibilities and prospects. *Soil Technol.*, 3:231-239, 1990.
- HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 413p.
- HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733p.

- HORN, R.; DOMZAL, H. & OUWERKERK, C. van. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Till. Res.*, 35:23-36, 1995.
- JACOMINE, P.K.T.; CAVALCANTI, A.C.; PESSOA, S.C.P. & SILVEIRA, C.O. Levantamento Exploratório Reconhecimento de Solos de Estado de Alagoas. Recife, EMBRAPA/Centro de Pesquisas Pedológicas, SUDENE-DRN, 1975. 531p. (Boletim Técnico, 35)
- KONDO, M.K. & DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:211-218, 1999.
- LAMBE, T.W. Soil testing for engineers. 2.ed. New York, John Wiley, 1951. 165p.
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. & USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soils orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:450-457, 1980.
- LEBERT, M. & HORN, T. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Till. Res.*, 19:275-286, 1991.
- MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. Curso de uso e manejo da irrigação, 5. Sete Lagoas, 1990. Embrapa/CNPMS, 1990. 11p.
- MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M. & VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber-and metal-tracked tractors. *Soil Till. Res.*, 49:185-199, 1998.
- NIMER, E. Climatologia do Brasil. 2.ed. Rio de Janeiro, IBGE-DERNA, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 422p.
- PROSPED. Levantamento detalhado dos solos da Usina Triunfo na escala de 1:10.000. Boca da Mata, AL, 1992. 114p.
- ROTH, C.H.; CASTRO FILHO, C. & MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um latossolo roxo distrófico. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:241-248, 1991.
- SILVA, A.J.N. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 120p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho Distrófico típico. II – Grau de saturação em água. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:9-15, 2002a.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:239-249, 2000.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SOARES, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho Distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:1-8, 2002b.
- SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A. & LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactibility and compressibility. *Soil Till. Res.*, 43:335-354, 1997.
- SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W. & PAINER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: a review I. soil and wheel characteristics. *Soil Till. Res.*, 1:207-237, 1981.
- SUPERIOR PERFORMING STATISTICAL SOFTWARE - SPSS. SigmaStat for windows, version 2.03. Chicago, 1995.
- VOORHEES, W.B.; SENST, C.G. & NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern corn belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42:344-349, 1978.
- ZONTA, E.P. & MACHADO, A.A. SANEST - Sistema de Análise Estatística. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". São Paulo, Universidade de São Paulo. 1980.