

Comissão 3.3 - Manejo e conservação do solo e da água

COMPRESSIBILIDADE DE UM LATOSSOLO AMARELO DISTROCOESO NÃO SATURADO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DA CANA-DE-AÇÚCAR⁽¹⁾

Romero Falcão Bezerra de Vasconcelos⁽²⁾, José Ramon Barros
Cantalice⁽³⁾, Geber Barbosa de Albuquerque Moura⁽³⁾, Mário Monteiro
Rolim⁽²⁾ & Carlos Eduardo de Vasconcelos Montenegro⁽⁴⁾

RESUMO

Os sistemas de manejo que promovem adição de resíduos de cana-de-açúcar ao solo podem provocar alterações nos parâmetros de compressibilidade. O objetivo deste trabalho foi investigar o comportamento da compressibilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, considerando a adição de resíduos orgânicos em três diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. O trabalho experimental foi realizado na Usina Santa Clotilde, localizada no Estado de Alagoas. Foram escolhidas três áreas em talhões com cana-de-açúcar, sendo investigadas: uma área cultivada sob sistema de manejo irrigado (SMI), uma área sob sistema de manejo de fertirrigação com vinhaça (SMV) e uma área sob sistema de manejo com aplicação de vinhaça + torta de filtro (SMVT). Esses sistemas de manejo foram comparados entre si e em relação a uma testemunha-padrão, representada por uma mata nativa (MN). Os três sistemas de manejo sob cultivo da cana-de-açúcar foram implantados quatro anos antes do início da coleta das amostras de solo. Para o ensaio de compressão uniaxial foram coletadas amostras indeformadas, nas profundidades de 0–0,20 e 0,20–0,40 m, com a intervenção de um amostrador metálico. As amostras preparadas foram ensaiadas por compressão uniaxial, nas seguintes umidades gravimétricas: 0,10; 0,14; 0,18; e 0,22 kg kg⁻¹. No ensaio de compressão foram aplicados carregamentos verticais, correspondentes a tensões de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, e realizadas leituras aos 30 s. Após o ensaio, as

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. Recebido para publicação em 29 de março de 2011 e aprovado em 19 de janeiro de 2012.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Tecnologia Rural, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. Av. Dom. Manoel de Medeiros s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900 Recife(PE). E-mails: romerofalcao@hotmail.com; rolim@dtr.ufrpe.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Agronomia, UFRPE. E-mails: cantalico@terra.com.br; geber@depa.ufrpe.br

⁽⁴⁾ Graduando de Engenharia, UFPE. E-mail: dudu475@gmail.com

amostras foram levadas à estufa, para determinação da umidade gravimétrica. Os resultados foram submetidos à análise de variância e análise de regressão múltipla da tensão de pré-compactação, considerando as seguintes variáveis independentes: densidade do solo (D_s), umidade gravimétrica (U_g), diâmetro médio ponderado de agregados via úmida (DMPu) e energia dissipada (E_d). O solo sob mata nativa apresenta menor capacidade de suporte de cargas nas duas profundidades estudadas, em relação aos três sistemas de manejo sob cultivo com cana-de-açúcar; os sistemas de manejo sob cultivo da cana-de-açúcar aos quais foram adicionados resíduos orgânicos (SMVT e SMV) apresentam menores históricos de tensões; as curvas-limite (SI e LC) podem ser empregadas no planejamento da execução das operações mecanizadas; e a tensão de pré-compactação pode ser predita a partir de propriedades físicas.

Termos de indexação: tensão de pré-compactação, resíduos orgânicos, Tabuleiros Costeiros.

SUMMARY: COMPRESSIBILITY OF A YELLOW LATOSOL UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS WITH SUGARCANE

The application of sugarcane residues to the soil may induce changes in soil compressibility parameters. The objective of this study was to investigate the compressibility behavior of a dystrophic cohesive Yellow Latosol in the coastal tablelands of the state of Alagoas, in three different management systems with sugarcane, with different levels of organic residue application. The experiment was conducted in an area of sugarcane production (Usina Santa Clotilde), Alagoas. Three plots were chosen in sugarcane fields: sugarcane under irrigation (SMI), under fertigation with vinasse (SMV) and with application of vinasse + filter cake (SMVT). These management systems were compared to each other and to a control plot, represented by native forest (NF). The three sugar cane management systems had been established four years before soil sampling. Undisturbed soil were collected (layers 0–0.20 m and 0.20–0.40 m), using a metal sampler. The samples were first tested by uniaxial compression (gravimetric moisture levels of 0.10; 0.14; 0.18; and 0.22 kg kg⁻¹). For the compression test, loads were applied with vertical tensions of 12.5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 and 1600 kPa and readings taken every 30 sec. Thereafter, the samples were oven-dried for gravimetric moisture determination. The results were subjected to variance and multiple regression analysis of the pre-compaction tension, according to the following independent variables: bulk density (D_s), gravimetric moisture (U_g), mean weight diameter of water-stable aggregates (DMPu) and dissipated energy (E_d). The load carrying capacity of native forest soil was lower in both layers than in the three sugarcane managements; the management systems under sugar cane with organic residue application (SMV and SMVT) have lower tension levels; the limit curves (suction increase and loading collapse) can be used in the planning of mechanical operations and pre-compaction stress can be predicted from the physical properties.

Index terms: pre-compaction stress, organic residue, coastal tablelands.

INTRODUÇÃO

Atualmente, no Brasil, como no mundo, há grande preocupação com o aumento da área de terras agrícolas com problemas de compactação. Esse aumento tem como um dos principais motivos as operações agrícolas mecanizadas, principalmente quando realizadas com a umidade do solo inadequada (Silva et al., 2000). A compactação influi nas

propriedades e nas funções físicas, químicas e biológicas do solo, sendo uma das importantes causas da degradação dos solos agrícolas no mundo (Hakansson et al., 1988).

Compressibilidade é a capacidade que o solo não saturado tem de sofrer redução de volume quando submetido a carga (Gupta & Allmaras, 1987). De acordo com Holtz & Kovacs (1981), a deformação do solo (dh/H) é definida como a diferença entre

a altura inicial da amostra e a altura final após a aplicação de cada tensão, dividida pela altura inicial da amostra. Segundo Holtz & Kovacs (1981), o estudo da tensão efetiva foi proposto por Terzaghi (1925), demonstrando que a resposta de um volume de solo a mudanças resultantes da aplicação de cargas depende exclusivamente da tensão efetiva a ele aplicada.

As deformações físicas do solo devem-se a uma complexa interação de fatores internos e externos (Semmel & Horn, 1995). Os fatores internos são: histórico de tensões, umidade do solo, textura do solo, estrutura do solo, densidade inicial do solo e matéria orgânica. Os fatores externos estão relacionados com o tipo, a intensidade e a frequência da carga aplicada e do manejo do solo (Holtz & Kovacs, 1981; Horn, 1988). Há estimativas de que as pressões médias aplicadas pelas máquinas agrícolas situam-se entre 50 e 300 kPa (Lebert & Horn, 1991; Carpenedo, 1994; Silva et al., 2000), enquanto os reboques e caminhões podem exercer pressões entre 300 e 600 kPa (Carpenedo, 1994; Silva et al., 2000).

Os sistemas de manejo podem exercer forte influência nos parâmetros de compactação e compressibilidade do solo. Silva & Cabeda (2006), estudando diversos sistemas de manejo com cana-de-açúcar em Argissolo Amarelo Coeso latossólico textura média/argilosa, verificaram que, nos sistemas sequeiro e irrigado, a tensão de pré-compactação 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.

Os sistemas de manejo sob cultivo tradicional da cana-de-açúcar promovem alterações nas propriedades físicas, verificando-se aumento da densidade do solo e diminuição da porosidade, da infiltração e da condutividade hidráulica, quando comparados com o solo sob mata nativa. Oliveira et al. (2010), investigando três sistemas de manejo da cana-de-açúcar (sequeiro, irrigado e fertirrigado), constataram que a área com fertirrigação – pelo fato de adicionar matéria orgânica – degradou menos fisicamente o solo.

A tensão de pré-compactação vem sendo usada para estimar a capacidade de suporte de carga do solo (Larson & Gupta, 1980; Kondo & Dias Júnior, 1999b; Dawidowski et al., 2001). Esse parâmetro quantifica a maior pressão que o solo já sofreu no passado e representa o limite máximo de carga suportado antes que a compactação adicional ocorra (Dias Júnior & Pierce, 1996). A tensão de pré-compactação pode ser determinada por meio da curva de compressão do solo, obtida do ensaio de compressão uniaxial (Horn & Lebert, 1994; Dias Júnior, 1994). A curva de compressão secundária representa as pressões

sofridas pelo solo no passado e caracteriza-se por deformações pequenas, elásticas e recuperáveis, enquanto a curva de compressão virgem apresenta deformações plásticas não recuperáveis (Chancellor, 1997; Holtz & Kovacs, 1981; Kondo & Dias Júnior, 1999a; Silva et al., 2001). O solo agrícola deve ser preparado ou trafegado na região da curva de compressão secundária, para que não ocorra compactação adicional irreversível (Dias Júnior & Pierce 1996).

A tensão de pré-compactação (σ_p) pode ser obtida por meio da curva de compressão do solo, que representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo. Essa curva pode ser obtida usando-se o método gráfico de Casagrande (1936), o de Pacheco e Silva (ABNT, 1990) e o proposto por Dias Junior & Pierce (1995).

A tensão de pré-compactação (σ_p) e o índice de compressão (C_c) podem ser preditos a partir de propriedades físicas de fácil mensuração, como a densidade do solo, a umidade gravimétrica e a resistência do solo à penetração. A predição desses parâmetros possibilita avaliar o estado mecânico do solo, visando ao seu uso, manejo e planejamento sustentável da mecanização agrícola (Silva et al., 2000; Imhoff et al., 2004; Lima et al., 2006).

Canarache et al. (2000) confirmaram a existência de correlação significativa entre diversas propriedades físicas do solo (densidade, estrutura e resistência à penetração) e a tensão de pré-compactação; o mesmo comportamento não foi verificado para o índice de compressão.

Imhoff et al. (2004), investigando amostras de Latossolos com variação de textura em uma toposequência sob cultivo com cana-de-açúcar, utilizaram um modelo de predição da tensão de pré-compactação que incorpora o efeito do teor de água, argila e densidade do solo.

Diante desse contexto, o objetivo geral deste estudo foi investigar o comportamento da compressibilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, considerando a adição de resíduos orgânicos proporcionados pelos diferentes sistemas de manejo estudados.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho experimental foi realizado na Fazenda Pau Amarelo, da Usina Santa Clotilde S/A, localizada no município de Rio Largo, litoral do Estado de Alagoas. O clima do local é tropical chuvoso com verão seco (As), segundo a classificação de Köppen & Geiger (1928). A precipitação pluvial média anual é de 1.752 mm, e a temperatura média anual, de 29 °C.

O solo estudado foi classificado como Latossolo Amarelo distrocoeso (Embrapa, 2009), relevo plano, textura média/argilosa. O solo é derivado do grupo Barreiras, o qual é formado por sedimentos arenos-argilosos, com fração areia constituída basicamente de quartzo e fração argila constituída de caulinita, com baixos teores de óxidos de ferro (Jacomine et al., 1975). Foram escolhidos solos em áreas de produção com a cultura da cana-de-açúcar, sendo objeto de estudo três áreas, representativas dos três sistemas de manejo adotados pela unidade sucroalcooleira.

As três áreas cultivadas escolhidas como experimentais são exploradas com cana-de-açúcar há mais de 20 anos. Durante o período de condução do experimento foi feito um rígido controle de tráfego de máquinas nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Os três sistemas de manejo estudados foram adotados na unidade sucroalcooleira desde a safra 2003/2004. A coleta de amostras do solo foi realizada em fevereiro de 2007.

Nas três áreas selecionadas para estudo foram avaliados os seguintes tratamentos: uma área cultivada sob sistema de manejo irrigado (SMI), uma área cultivada sob sistema de manejo de fertirrigação com vinhaça (SMV) e uma área cultivada com a aplicação de vinhaça + torta de filtro (SMVT). Esses sistemas de manejo foram comparados entre si e em relação a uma testemunha-padrão, representada por solo em condições naturais (floresta nativa).

Na área cultivada sob SMI foi aplicada uma lâmina de 120 mm de água, por ciclo da cultura. A adubação química da cana-planta foi realizada de acordo com a análise do solo, sendo aplicados 40, 120 e 90 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, e na cana-soca foram aplicados 80, 50 e 90 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

Na área cultivada sob SMV foram aplicados, por ciclo da cultura, 300 m³ ha⁻¹ de vinhaça diluída, por aspersão. Na adubação química da cana-planta foram aplicados 40 kg ha⁻¹ de N e, na cana-soca, 80 kg ha⁻¹ de N.

Na área cultivada sob SMVT foram aplicados 30 Mg ha⁻¹ de torta de filtro associada com vinhaça, por aspersão. Na adubação química da cana-planta foram aplicados 40 kg ha⁻¹ de N e, na cana-soca, 80 kg ha⁻¹ de N.

No plantio e na renovação do canavial, o preparo periódico do solo foi o mesmo nas três áreas, constando do uso de subsoladores de três hastes parabólicas, cujo modo de ação é expresso por cortes verticais e intensa vibração no interior do solo. Em seguida, foram utilizadas grades de discos de 30 polegadas de diâmetro na destruição

da socaria e, ao mesmo tempo, houve deslocamentos horizontais do solo, ficando este preparado para a operação de plantio. Finalmente, foram abertos sulcos de aproximadamente 0,25 m de profundidade, utilizando sulcadores de três linhas. O plantio foi manual, sendo as canas-sementes jogadas nos sulcos, que posteriormente foram cobertos mecanicamente com solo. Em todas as áreas cultivadas a cana-de-açúcar foi queimada antes da colheita. Na colheita, a cana foi cortada manualmente e carregada em caminhão, utilizando carregadoras convencionais.

As amostras foram coletadas ao acaso, nas áreas com os diferentes sistemas de manejo, nas profundidades de 0–0,20 e 0,20–0,40 m, sendo retiradas num ponto situado nas entrelinhas de plantio da cana-de-açúcar.

Na análise granulométrica empregou-se o método do densímetro de Boyoucos, e na dispersão física do solo utilizou-se um agitador mecânico durante 15 min e, como dispersante químico, o calgon (Embrapa, 1997). A densidade das partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico, e a densidade do solo, obtida com anel volumétrico (Embrapa, 1997).

A estabilidade dos agregados foi determinada por via úmida, sendo as amostras coletadas ao acaso, com auxílio de enxadão e pá de corte. Na separação de agregados por via úmida, adotou-se o procedimento descrito por Kemper & Rosenau (1986), ou seja, peneiramento em água, após pré-umedecimento lento dos agregados, por capilaridade. Os agregados assim preparados foram transferidos para dois conjuntos de cinco peneiras de 3,35; 2,00; 1,00; 0,50; e 0,25 mm de diâmetro de malha, sendo submetidos à agitação vertical (42 ciclos/min), durante 15 min, imersos em recipiente com água. O solo retido em cada peneira foi acondicionado em recipientes de alumínio para secagem em estufa a 105 °C, durante 24 h. Em seguida, pesou-se e calculou-se a massa e a porcentagem de agregados estáveis em cada uma das classes de diâmetro de agregados.

O método utilizado para obtenção da curva característica do solo foi por dessorção com reumedecimento (secamento). Foram coletadas amostras indeformadas de solo por meio de anéis metálicos, nas profundidades de 0–0,20 e 0,20–0,40 m. A amostra de solo indeformada foi previamente saturada e, em seguida, o solo úmido foi equilibrado a uma sucessão de potenciais matriciais ou sucções conhecidas; determinou-se, a cada vez, a quantidade de água retida. Para as tensões de 0,1 a 10 kPa utilizou-se aparelho de placas porosas (funil de Haynes) e, nas tensões de 50, 500 e 1.500 kPa, o aparelho de Richards. Posteriormente, plotando os valores de umidade volumétrica *versus* sucção matricial ($U_a - U_w$), elaborou-se a curva de retenção de água do solo.

Para avaliar o teor de matéria orgânica do solo, determinou-se o teor de C orgânico, em cada uma das amostras, conforme descrito por Embrapa (1997).

A porosidade total (Pt) foi calculada para cada amostra, com base na densidade do solo (D_s) e na densidade de partículas (D_p). A microporosidade do solo foi determinada aplicando-se sucção de 0,6 kPa, e a macroporosidade, por meio da diferença entre porosidade total e microporosidade (Embrapa, 1997).

Para o ensaio de compressão uniaxial, foram coletadas 128 amostras de solo indeformadas, nas profundidades de 0–0,20 e 0,20–0,40 m, com a intervenção de amostrador metálico contendo, em seu interior, dois anéis metálicos de parede fina, com 6,4 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura.

Após a extração do amostrador da superfície do solo, os anéis coletores de amostra indeformada de solo foram separados e envolvidos com filme plástico e, posteriormente, acondicionados em sacos plásticos sobre papel, para serem transportados com segurança até o Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco. No laboratório, foi retirado o excesso de solo do anel, para determinação da umidade inicial e preparação da amostra para o ensaio.

A amostra de solo indeformada devidamente preparada foi saturada por capilaridade, e as umidades gravimétricas, equilibradas em temperatura ambiente. As amostras preparadas foram ensaiadas por compressão uniaxial, nas seguintes umidades gravimétricas médias: 0,10; 0,14; 0,18; e 0,22 kg kg⁻¹. No ensaio de compressão uniaxial foi utilizada uma prensa mecânica, marca Solotest, sendo o ensaio desenvolvido em conformidade com a norma NBR-12007 (ABNT, 1990). O ensaio consistiu de carregamentos verticais correspondentes a tensões de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800; e 1.600 kPa e de leituras realizadas aos 30 s. A razão de carga aplicada foi igual a 2, e os estádios de carregamento foram trocados aos 30 s. No final do ensaio, as amostras foram levadas à estufa a 105 °C, por 24 h, para determinação da umidade gravimétrica final.

Em pesquisa experimental, Costa et al. (2003) utilizaram as curvas-limite representadas por função exponencial, conforme segue:

$$\sigma_{pc} = a + b (u_a - u_w)^c$$

em que σ_{pc} = tensão de pré-compactação; a, b e c = parâmetros de ajuste; u_a = pressão do ar; u_w = pressão da água; e $(u_a - u_w)$ = sucção matricial. Esses autores definiram a curva SI (suction increase) considerando que a sucção matricial do solo, na profundidade investigada, não excedeu 50 kPa.

Os dados obtidos da deformação vertical, medida no relógio microcomparador após a aplicação de cada

uma das cargas verticais, alimentaram o programa computacional “Compress” (Reinert et al., 2003), que calculou e forneceu o índice de vazios, a partir do deslocamento registrado, a curva de compressão, a tensão de pré-compactação (σ_p') e o índice de compressão (C_c). Na determinação da tensão de pré-compactação (σ_p') utilizou-se o método gráfico de Silva (ABNT, 1990).

Os resultados foram submetidos à análise de variância, e as médias, comparadas pelo teste de Tukey a 5 %, utilizando o programa SAEG (2005). As análises de correlação e de regressão foram desenvolvidas para algumas variáveis, utilizando o programa Statistica 6.0 (STATSOFT, 2001). Para a escolha dos modelos de regressão, os coeficientes foram testados pelo teste F, com base no quadrado médio do resíduo da Anova do experimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tensões de pré-compactação e relações de predição

As características granulométricas, a densidade do solo e da partícula, o C orgânico total e as porosidades (micro e macroporosidade) do solo pesquisado estão apresentados no quadro 1.

Observa-se, no quadro 1, que as áreas cultivadas com cana-de-açúcar sob SMV e SMVT apresentaram percentualmente quantidade maior de macroporos e menores valores para a densidade do solo em relação ao SMI. Oliveira (2008), investigando um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos da cana-de-açúcar, encontrou resultados semelhantes.

A curva característica do solo pode contribuir para a compreensão do comportamento dos solos não saturados diante da variação de umidade (Rahardjo & Leong, 1997). Essa curva é definida como a relação entre o teor de umidade e a correspondente sucção matricial, sendo representação da capacidade do solo em armazenar água.

A umidade é uma variável determinante no processo de compressão do solo e da magnitude de sua deformação. Diversas pesquisas constataram que a capacidade de suporte de carga relaciona-se negativamente com a umidade do solo (Horn, 1988; Kondo & Dias Júnior, 1999a; Silva & Cabeda, 2006; Lima et al., 2006).

Observa-se que a entrada de ar ou sucção matricial crítica ocorreu a partir de 0,3 kPa de sucção matricial para os diferentes sistemas de manejo nas duas profundidades (Figura 1). Quando uma amostra de solo fica submetida a sucções matriciais crescentes, inicia-se um fluxo de água para fora

Quadro 1. Caracterização física do Latossolo Amarelo distrocoeso, sob diferentes sistemas de manejo e profundidades

Profundidade	Granulometria			Densidade		COT ⁽¹⁾	Porosidade	
	Areia	Silte	Argila	Solo	Partícula		Micro	Macro
m	g kg ⁻¹			Mg m ⁻³		%		
	Irrigado (SMI)							
0 - 0,20	680	70	250	1,65	2,67	1,26	30,98	8,91
0,20 - 0,40	580	80	340	1,72	2,63	0,87	29,70	7,81
	Mata (MN)							
0 - 0,20	655	90	255	1,05	2,62	3,05	35,61	21,22
0,20 - 0,40	553	140	307	1,21	2,64	1,85	31,17	19,37
	Vinhaça + torta (SMVT)							
0 - 0,20	625	100	275	1,49	2,61	1,59	33,05	14,76
0,20 - 0,40	520	110	360	1,56	2,68	0,85	30,91	13,65
	Vinhaça (SMV)							
0 - 0,20	588	90	322	1,56	2,64	1,51	33,49	11,58
0,20 - 0,40	550	90	360	1,63	2,62	0,68	32,72	10,29

⁽¹⁾ Carbono orgânico total.

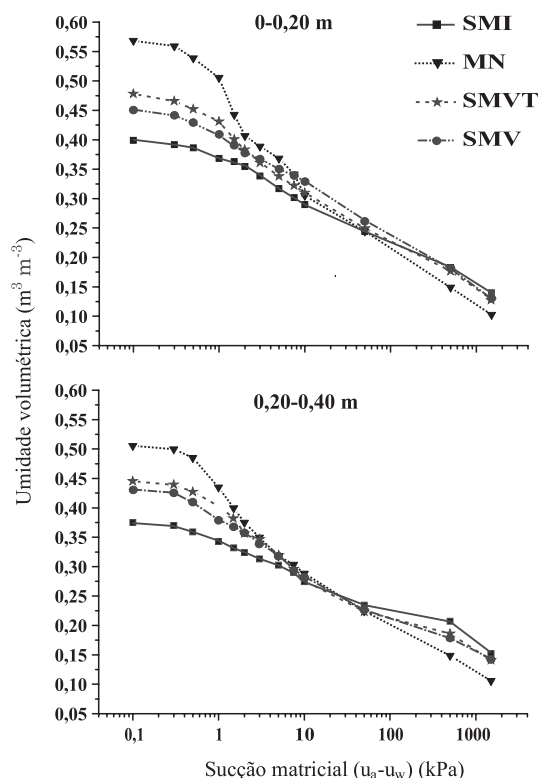


Figura 1. Curvas características do solo sob os sistemas de manejo: área irrigada (SMI), mata nativa (MN), área de vinhaça+torta (SMVT) e área de vinhaça (SMV), nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m.

da amostra a partir de um determinado valor de sucção matricial – valor esse denominado de entrada de ar ou sucção matricial crítica (Hillel, 1971). Todavia, a entrada de ar ocorreu em umidades

volumétricas diferenciadas, obedecendo à seguinte ordem decrescente: MN>SMVT>SMV>SMI. Esse comportamento, provavelmente, encontra-se associado ao tamanho dos poros. O efeito da sucção produz, no solo, uma ação intergranular, que tende a manter mais fortemente unidas as partículas, resultando em aumento de sua rigidez e, conseqüentemente, de sua resistência ao cisalhamento.

Os resultados obtidos para tensão de pré-compactação (σ'_p) em função dos sistemas de manejo culturais da cana-de-açúcar e dos teores de água, nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, estão apresentados no quadro 2. Houve diferença significativa nas comparações entre médias da interação dos sistemas de manejo dos resíduos culturais da cana-de-açúcar e umidade do solo sobre a tensão de pré-compactação do solo, nas duas profundidades investigadas.

Na profundidade de 0-0,20 m, a tensão de pré-compactação do solo apresentou variação de 67,1 a 162,1 kPa para os diferentes sistemas de manejo e umidade. Os solos sob cultivo da cana-de-açúcar apresentaram os maiores valores de tensão de pré-compactação, independentemente da umidade do solo. Para o teor de água mais baixo (0,10 kg kg⁻¹), observa-se maior tensão de pré-compactação, que resulta em maior capacidade de suporte de carga. Quanto menor o teor de água no solo, mais resistente sua matriz, proporcionando-lhe maior resistência às deformações causadas por forças externas a ele aplicadas. Assim, a amplitude de variação da tensão de pré-compactação está associada ao teor de água no solo. A diminuição da tensão de pré-compactação com o aumento da umidade do solo tem sido relatada

Quadro 2. Valores médios das tensões de pré-compactação (σ_p , kPa) em função dos sistemas de manejo e teor de água, nas profundidades estudadas

Teor de água	Sistema de manejo			
	SMI	MN	SMVT	SMV
kg kg ⁻¹	Camada de 0–0,20 m			
0,10	162,1Aa	112,1Ca	126,1Ba	130,3Ba
0,14	131,0Ab	86,4Cb	101,2Bb	105,5Bb
0,18	95,1Ac	77,8Bc	82,9Bc	86,7Bc
0,22	76,4Ad	67,1Bd	71,6Ad	74,6Ad
	Camada de 0,20–0,40 m			
0,10	200,9Aa	131,8Ca	148,0Ba	156,9Ba
0,14	156,5Ab	116,6Bb	124,3Bb	131,5Bb
0,18	124,9Ac	96,2Bc	105,1Bc	114,3Bc
0,22	76,7Ad	70,5Ad	74,3Ad	75,3Ad

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey (5 %). SMI: área irrigada; MN: mata nativa; SMVT: área de vinhaça + torta; SMV: área de vinhaça. Média de quatro repetições.

por diversos pesquisadores (Carpenedo, 1994; Kondo & Dias Júnior, 1999b; Silva & Cabeda, 2006; Oliveira, 2008).

Nas condições deste estudo, os solos sob cultivo com cana-de-açúcar foram submetidos ao mesmo tipo de preparo periódico, bem como ao tráfego de máquinas. Todavia, observa-se que, nas umidades de 0,10, 0,14 e 0,18 kg kg⁻¹, os valores médios de tensão de pré-compactação dos SMV e SMVT foram estatisticamente diferentes e inferiores aos do SMI (Quadro 2). Esse fato demonstra a importância da adoção de sistemas de manejo que proporcionem aumento dos teores de matéria orgânica nos solos, pois todos os sistemas de manejo sob cultivo da cana-de-açúcar receberam as mesmas cargas externas, porém apresentaram históricos de tensões diferentes.

Para a camada subsuperficial (0,20–0,40 m), a tensão de pré-compactação mostrou variação maior (70,5 a 200,9 kPa) do que a observada na camada superficial (67,1 a 162,1 kPa), creditando-se esse comportamento mecânico ao maior grau de compactação nessa profundidade. Salire et al. (1994) e Silva (2003) encontraram relação linear e positiva entre a tensão de pré-compactação e a densidade do solo, ou seja, maiores valores de densidade estiveram associados à história de tensões suportadas pelo solo. O achado foi corroborado por Silva et al. (2002), ao constatarem aumento significativo da tensão de pré-compactação, de 68 para 164 kPa, para densidades de 1,3 e 1,6 Mg m⁻³, respectivamente, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.

Para a condição de umidade do solo de 0,22 kg kg⁻¹, observa-se que as médias de tensão de pré-compactação dos diferentes sistemas de manejo foram estatisticamente iguais (Quadro 2). Esse comportamento provavelmente resultou do teor de umidade, próximo ou acima dos limites de plasticidade dos solos sob os sistemas de manejo estudados.

O solo sob mata nativa apresentou os menores valores de tensões de pré-compactação, pelo fato de não ter sofrido as cargas de um solo cultivado, mas tão-somente as tensões naturais de um solo exposto ao ambiente – as tensões matriciais que originam as tensões efetivas desenvolvidas durante os ciclos de umedecimento e secagem. Diante desse fato, pode-se inferir que a capacidade de suporte de carga do solo com mata nativa está associada à estabilidade de sua estrutura.

Já os solos sob os SMV e SMVT estão em posição intermediária, enquanto o SMI tem a sua capacidade de suporte de carga associada ao maior grau de compactação. Para Kanali et al. (1997), a compactação do solo torna-se crítica ao desenvolvimento de plantas quando a tensão de pré-compactação assume valores superiores a 122 kPa em solos franco-arenosos, com umidade e densidade média, respectivamente, de 0,23 kg kg⁻¹ e 1,40 Mg m⁻³. Diante desses referenciais, o Latossolo Amarelo distrocoeso estudado apresenta boas condições físicas de enraizamento da cana-de-açúcar. Já Soane et al. (1981) indicaram tensões inferiores a 200 kPa para controle efetivo e redução da compactação do solo. Dessa forma, só a área sob SMI apresentaria risco de restrição ao desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar.

O comportamento mecânico do solo não saturado pode ser representado pelas curvas-limite SI (*suction increase*) e LC (*loading collapse*), conforme as figuras 2 e 3 (Alonso et al., 1987). Plotando os valores de umidades volumétricas utilizados no ensaio de compressão uniaxial nas curvas características dos solos dos diferentes sistemas de manejo, podem-se encontrar as respectivas sucções matriciais. Em seguida, com os valores de sucção matricial e as respectivas tensões de pré-compactação, foram construídas as curvas-limite (Figuras 2 e 3). Estas curvas limites (SI e LC) definem a região de comportamento elástico do solo. Caso esses limites sejam ultrapassados, o solo poderá acumular deformações irreversíveis. As curvas-limite (SI e LC) podem ser utilizadas no planejamento da execução das operações mecanizadas, possibilitando redução do risco de degradação física de solos agrícolas.

Segundo Alonso et al. (1987), essas curvas-limite representam situações de carregamento e de sucção matricial já experimentadas pelo solo. Esses autores concluíram que os limites definidos pelas curvas SI e LC são acoplados, ou seja, uma variação de carregamento externo ou de sucção

matricial provocará o deslocamento dos dois limites. De maneira geral, a rigidez dos solos não saturados aumenta com a sucção matricial. Contudo, para os solos do Nordeste existem poucos dados experimentais para estabelecer-se uma relação precisa.

Observa-se que em todos os diferentes sistemas de manejo a capacidade de suporte de carga aumentou de forma exponencial com o aumento da sucção matricial (Figuras 2 e 3).

Todas as equações de regressão apresentaram elevado poder explicativo, ou seja, R^2 acima de 85 %. O solo sob mata nativa apresenta a área contida pelas curvas SI e LC menor do que as áreas sob cultivo com cana-de-açúcar. Pode-se inferir que o solo sob mata nativa possui menor região de comportamento elástico e, no caso de exceder esses limites, significa acumulação de deformações irreversíveis pelo solo com mata nativa; no entanto, nessa condição de uso de solo, isso nunca acontecerá.

As figuras 4 a 7 apresentam relações de predição da capacidade de suporte de carga do solo investigado. As relações foram obtidas a partir dos resultados de equações de regressão múltiplas lineares da tensão de pré-compactação, em função de variáveis independentes previamente escolhidas, pelas suas vinculações com o fenômeno investigado. As variáveis independentes foram: densidade seca do solo (D_s), diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu), umidade gravimétrica (U_g) e energia dissipada (E_d).

A figura 4 apresenta um modelo para predição da tensão de pré-compactação (σ_{pc}), em função das variáveis independentes umidade gravimétrica (U_g) e diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu), na profundidade de 0–0,20 m, para as condições em que esse Latossolo foi estudado. A representação matemática para a dispersão dos pontos experimentais foi uma reta. Nesse modelo de predição obtém-se $R^2 = 0,8870$, que corresponde a um coeficiente de correlação (r) de 0,9418 entre os valores observados e estimados, implicando que o conjunto das covariáveis explica 88,70 % do fenômeno. Além disso, é atingido elevado nível de significância estatística, pois a probabilidade de erro (do tipo 1) é $p > 0,0001$. Essa estimativa baseou-se no cálculo por meio de modelo linear ajustado, com intervalo de confiança a 95 % para o valor estimado.

Em termos físicos, a figura 4 apresenta as tensões de pré-compactação obtidas com todas as adições de resíduos da cana-de-açúcar por meio dos diferentes tratamentos na camada superficial de 0 a 0,20 m, em função das variáveis umidade gravimétrica (U_g) e diâmetro médio ponderado via úmida (DMPu) dos agregados do solo.

A variável independente umidade gravimétrica (U_g) exerce papel decisivo no valor da tensão de pré-compactação do solo. De maneira geral, quando os demais fatores mantêm-se constantes, a umidade do solo é quem governa a quantidade de deformação do solo. Assim, a capacidade de suporte de carga do solo cresce com a sua secagem, e menor será a

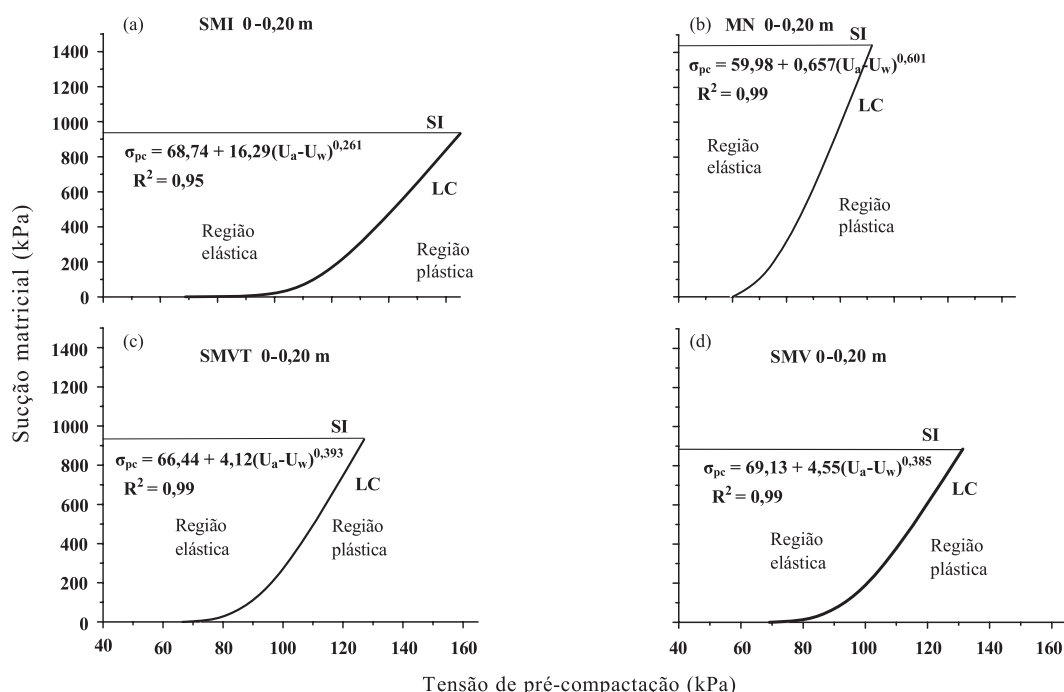


Figura 2. Sucção matricial em função da tensão de pré-compactação, para as quatro condições de sistemas de manejo, na profundidade de 0–0,20 m.

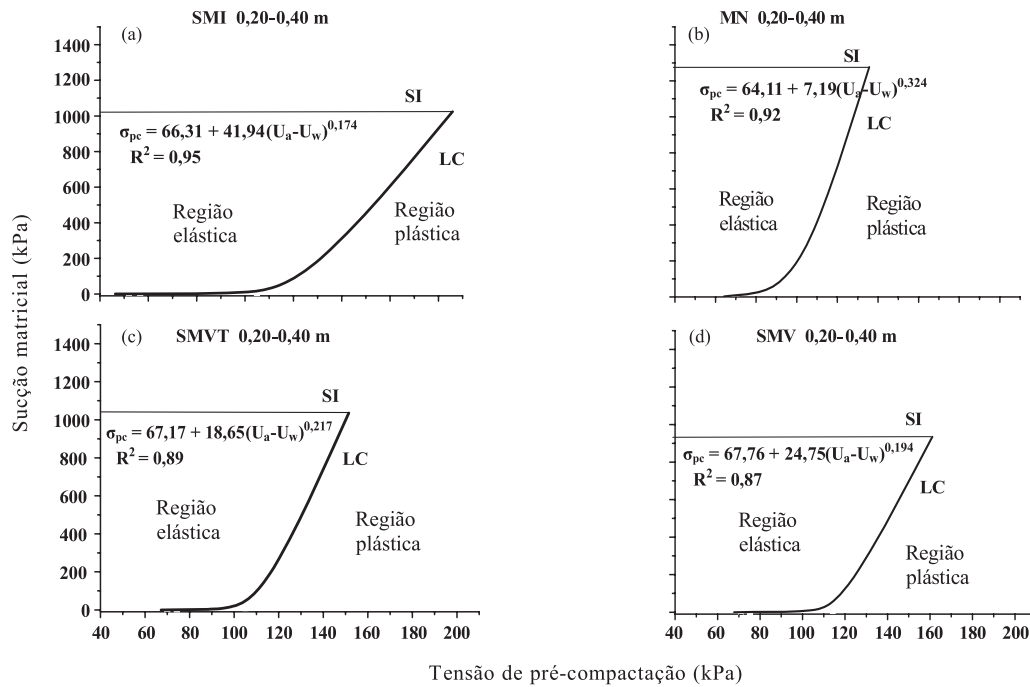


Figura 3. Sucção matricial em função da tensão de pré-compactação, para as quatro condições de sistemas de manejo, na profundidade de 0,20–0,40 m.

probabilidade de compactação. De acordo com Hillel (1980), quando o solo se encontra com baixo teor de água, apresenta-se mais resistente em função da rigidez de sua matriz, que exibe alta resistência friccional às cargas externas. Entretanto, quando o teor de água do solo aumenta, forma-se um filme de água que enfraquece as ligações interpartículas, como também reduz a fricção entre elas, produzindo efeito lubrificante e favorecendo o rearranjo.

A relação linear e positiva da figura 4 também se deu pelo incremento do diâmetro dos agregados do solo pela incorporação de matéria orgânica, devido à elevação da quantidade de resíduos, pelos

tratamentos. Dessa forma, o solo absorveu maior quantidade de água e apresentou resistência à compressão associada à estabilidade estrutural pelo aumento de diâmetro dos agregados. Assim, esse efeito interativo resultou em diminuição das tensões de pré-compactação.

A figura 5 expressa um modelo para predição da tensão de pré-compactação (σ'_p), em função de três variáveis independentes (U_g , DMP_u e E_d), na profundidade de 0–0,20 m, para as condições em que esse Latossolo foi estudado. A representação matemática para a dispersão dos pontos experimentais foi uma reta, e a equação que descreve a relação entre valores estimados vs. valores observados apresenta $R^2 = 0,8918$, que corresponde a um coeficiente de correlação (r) de 0,9443 entre os valores observados e estimados, implicando que o conjunto das covariáveis do modelo explica 89,18 % das variações na variável dependente. Essa figura acrescentou, à relação da figura 4, um pequeno incremento nos coeficientes de correlação e de determinação, pela inclusão da variável quantidade de energia dissipada (E_d). A ação dessa variável representa o efeito da quantidade de energia dissipada pelos resíduos adicionados na forma de vinhaça e torta de filtro. Essa quantidade de energia não tornou-se energia de deformação ou de compactação do solo, pela ação positiva da matéria orgânica. De maneira geral, solos com altos teores de matéria orgânica apresentam históricos de menores valores de tensão de pré-compactação. Assim, ficou demonstrada a afirmação de Lebert & Horn (1991), de que as tensões de pré-compactação

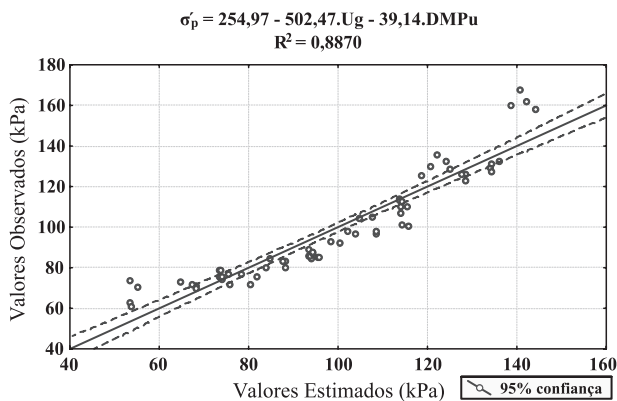


Figura 4. Modelo de tensão de pré-compactação (σ'_p) em função da umidade gravimétrica (U_g) e do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMP_u). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0–0,20 m.

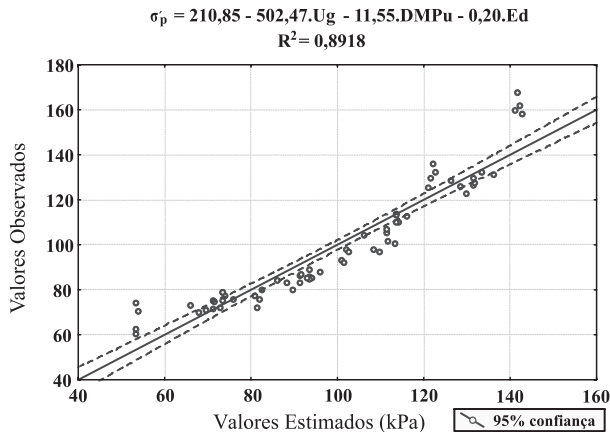


Figura 5. Modelo de tensão de pré-compactação (σ_p) em função da umidade gravimétrica (U_g), do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu) e da quantidade de energia dissipada (Ed). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0–0,20 m.

têm forte vinculação não somente a atributos, como à densidade e à umidade do solo, mas também a fatores relacionados com sua estrutura e agregação.

A figura 6 apresenta um modelo para predição da tensão de pré-compactação (σ_p), em função de quatro variáveis independentes (Ds, U_g , DMPu e Ed), na profundidade de 0–0,20 m e nas condições em que esse Latossolo foi estudado.

A influência da densidade seca do solo sobre sua capacidade de suporte de carga está associada ao maior número de pontos de contato entre as partículas e, conseqüentemente, maior resistência friccional.

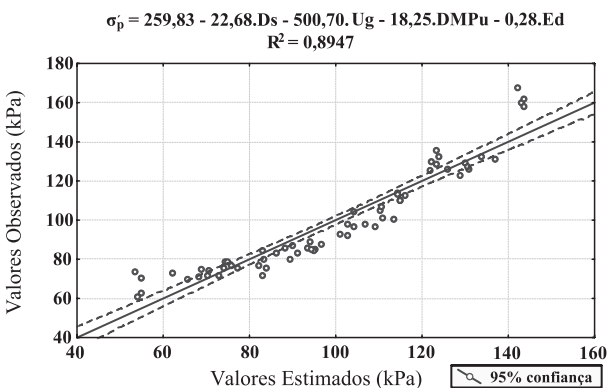


Figura 6. Modelo de tensão de pré-compactação (σ_p) em função da umidade gravimétrica (U_g), do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu), da quantidade de energia dissipada (Ed) e da densidade do solo (Ds). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0–0,20 cm.

A representação matemática para a dispersão dos pontos experimentais foi uma reta, e a equação que descreve a relação entre valores estimados vs. valores observados apresenta $R^2 = 0,8947$, que corresponde a um coeficiente de correlação de 0,9459 entre os valores observados e estimados, implicando que o conjunto das covariáveis do modelo explica 89,47 % das variações na variável dependente.

A figura 7 apresenta uma relação para predição da tensão de pré-compactação (σ_p) em função de duas variáveis independentes (U_g e DMPu), na profundidade de 0,20–0,40 m: o valor $R^2 = 0,8755$ e $r = 0,9357$, implicando que o conjunto das covariáveis do modelo não explica 12,45 % das variações na variável dependente.

Para a profundidade de 0,20 a 0,40 m, foi também observada a interação positiva e linear entre as variáveis da umidade gravimétrica (U_g) do solo e do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu) do solo na explicação das tensões de pré-compactação desenvolvidas.

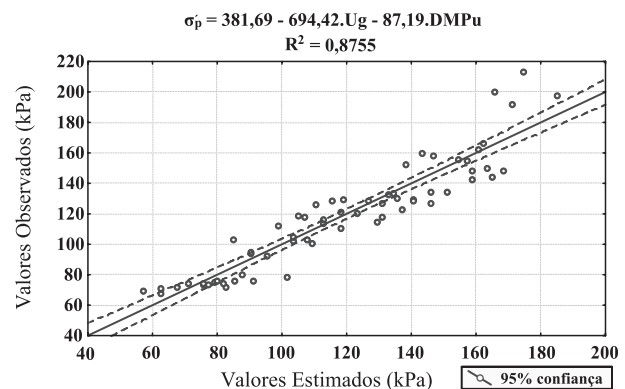


Figura 7. Modelo de tensão de pré-compactação (σ_p) em função da umidade gravimétrica (U_g) e do diâmetro médio ponderado dos agregados via úmida (DMPu). Valores estimados contra valores observados, na profundidade de 0,20–0,40 m.

CONCLUSÕES

1. O solo sob mata nativa apresenta menor capacidade de suporte de cargas nas duas profundidades estudadas, em relação aos três sistemas de manejo sob solo cultivado com cana-de-açúcar.

2. Os sistemas de manejo sob cultivo da cana-de-açúcar aos quais foram adicionados resíduos orgânicos (SMVT e SMV) apresentam menores históricos de tensões.

3. As curvas-limite (SI e LC) podem ser empregadas no planejamento da execução das operações mecanizadas.

4. A tensão de pré-compactação pode ser predita a partir de propriedades físicas.

LITERATURA CITADA

- ALONSO, E.E.; GENS, A. & HIGHT, D.W. General report - Special problem soils. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 9., Dublin, 1987. Proceedings... Dublin, 1987. v.3. p.1087-1146.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 12007: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990. 13 p.
- CANARACHE, A.; HORN, R. & COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. *Soil Tillage Res.*, 56:185-196, 2000.
- CARPENEDO, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 106p. (Tese de Doutorado)
- CASAGRANDE, A. The determination of the pré-consolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Cambridge, 1936. Proceedings... Cambridge, Harvard University, 1936. v.34. p.60-64.
- CHANCELLOR, W.J. Compaction of soil agricultural equipment. *B. Div. Agric. Sci.*, 53:1881, 1997.
- COSTA, Y.D.; CINTRA, J.C. & ZORNBERG, J.G. Influence of matric suction on the results of plate load tests performed on a Lateritic soil deposit. *Geotech. Test J.*, 26:1-9, 2003.
- DAWIDOWSKI, J.B.; MORRISON, J.E. & SNIEG, M. Measurement of soil layer strength with plate sinkage and uniaxial confined methods. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 4:1059-1064, 2001.
- DIAS JUNIOR, M.S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114p. (Tese de Doutorado)
- DIAS JÚNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technol.*, 8:139-151, 1995.
- DIAS JÚNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:175-182, 1996.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de Solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2009. 399p.
- GUPTA, S.C. & ALLMARAS, R.R. Models to the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.*, 6:5-10, 1987.
- HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. & RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Tillage Res.*, 11:239-282, 1988.
- HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 413p.
- HILLEL, D. Soil water - Physical principles and processes. New York, Academic Press, 1971. p.1-5.
- HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 773p.
- HORN, R. Compressibility of arable lands. In: DRESCHER, J.; HORN, R. & DE BOODT, M., eds. Impact of water and external forces on soil structure. *Catena*, Cremlingen-Destedt, 1988. p.53-71 (Supplement, 11)
- HORN, R. & LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:17-24, 2004.
- JACOMINE, P.K.T.; CAVALCANTI, A.C.; PESSOA, S.C.P. & SILVEIRA, C.O. Levantamento exploratório. Reconhecimento de solos do Estado de Alagoas. Recife, Embrapa, 1975. 531p. (Boletim Técnico, 35)
- KANALI, C.L.; KAUMBUTHO, P.G.; MAENDE, C.M. & KAMAU, J. The use of soil compaction levels in the selection of the field-safe sugarcane transport vehicles. *J. Terramech.*, 34:127-140, 1997.
- KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1. p.425-442 (Agronomy, 9)
- KONDO, M.K. & DIAS JUNIOR, M.S. Efeito do manejo da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:497-506, 1999a.
- KONDO, M.K. & DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:211-218, 1999b.
- KÖPPEN, W. & GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha, Verlag Justus Perthes, 1928. Wall-map 150 cm x 200 cm.
- LARSON, W.E. & GUPTA, S.C. Estimating critical stress unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:1127-1132, 1980.
- LEBERT, M. & HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage Res.*, 19:275-286, 1991.
- LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:217-223, 2006.

- OLIVEIRA, V.S. Compactação em solos coesos dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2008. 81p. (Tese de Doutorado)
- OLIVEIRA, V.S.; ROLIM, M.M.; VASCONCELOS, R.F.B.; COSTA, Y.D.J. & PEDROSA, E.M.R. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 14:914-920, 2010.
- RAHARDJO, H. & LEONG, E.C. Soil water characteristic curves and flex boundary problems. New York, Asce, 1997. p.88-112 (Geotechnical Special Publication, 68)
- REINERT, D.J.; ROBAINA, A.D. & REICHERT, J.M. Compress - software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade de solos e seus parâmetros. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. Anais... Ribeirão Preto, SBCS, 2003. CD ROOM.
- SAEG. Sistema para análises estatísticas. Versão 9.0. Viçosa, MG, Fundação Arthur Bernardes, 2005.
- SALIRE, E.V.; HAMMEL, J.E. & HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsolis under short - duration loading. Soil Tillage Res., 31:235-248, 1994.
- SEMMELE, H. & HORN, R. Mögchkeiten zur bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckforpflanzung im Boden Hinblick auf die Ableitung von Bodentyp- und maschinenspezifischen Grenzwert. In: Bodenverdichtung. Darmstadt, KTBL, 1995. p.61-92.
- 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, A.J.N. & CABEDA, M.S.V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. R. Bras. Ci. Solo, 30:921-930, 2006.
- SILVA, R.B.; LIMA, J.M.; DIAS JUNIOR, M.S. & SILVA, F.A.M. Influência da adição de fósforo no índice de compressão e propriedades de consistência de um Latossolo Vermelho Escuro. R. Bras. Ci. Solo, 25:261-268, 2001.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Prodólico Vermelho-Amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 4:239-249, 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, 2002.
- STATSOFT. Statistica: Data analysis software system. Version 6, 2001.
- SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W. & PAINER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: A review II. Compaction under tyres and other running gear. Soil Tillage Res., 1:373-400, 1981.
- TERZAGHI, K.W. Principles of soil mechanics: I- Phenomena of cohesion of clay. Eng. News Rec., 95:742-746, 1925.