

Modelagem e determinação do estado crítico de consolidação a partir da relação massa e volume em solos canavieiros

Modeling and determination of critical state of consolidation from mass-volume ratio in farmland

R. B. Silva¹, P. Iori², F. A. M. Silva¹, K. P. Lanças³ & M. S. Dias Júnior²

RESUMO

O trabalho teve por objetivo sugerir equações, as quais permitam estimar a densidade do solo (ρ_{σ_p}) e o volume total de poros (n_{σ_p}), ambos referentes à pressão de preconsolidação (σ_p), propondo-os como indicadores físicos na avaliação da qualidade e do estado crítico de consolidação dos solos agrícolas. Os índices físicos foram obtidos por meio de ensaios de consolidação uniaxial de amostras indeformadas de um Nitossolo Vermelho, depois de submetidas aos seguintes estados de consistência: tenacidade, friabilidade e plasticidade. Os resultados permitiram estimar a ρ_{σ_p} e a n_{σ_p} que o solo pode atingir para que o mesmo não tenha a sua estrutura degradada. As equações mostraram-se ferramentas poderosas na avaliação da capacidade de suporte de carga dos solos podendo estimar a máxima relação de massa/volume que o solo pode atingir.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, compressibilidade, pressão de preconsolidação, variabilidade espacial.

ABSTRACT

The objectives of this research was to suggest equations, to estimate the bulk density (ρ_{σ_p}) and total porosity (n_{σ_p}), on the pre-compression stress (σ_p), proposing them as indicators for the evaluation of the quality and the critical consolidation state of farmland. The physical characteristics were obtained by uniaxial precompression tests of undisturbed samples of an Alfisol after being subject to the following states of consistency: toughness, friability and plasticity. The results allowed estimating the ρ_{σ_p} and n_{σ_p} which the soil can reach without having its structure degraded. The equations were shown to be powerful tools in assessing the soil bearing capacity and the maximum mass-volume ratio that may reach the ground.

Key-words: compressibility, preconsolidation pressure, spatial variability, sugar cane

¹ Universidade Estadual Paulista, campus Experimental de Registro, Rua Nelson Brihi Badur, 4320, Vila Tupy, Vila Ponce, 11900-000, Registro/SP, Brasil, rbsilva@registro.unesp.br; ² Universidade Federal de Lavras – UFLA, Departamento de Ciência do Solo, Lavras/MG, Brasil; ³ Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu/SP, Brasil

INTRODUÇÃO

Avaliar a compacidade da estrutura dos solos agrícolas, no contexto da Agricultura de Precisão (AP), tem se constituído uma tarefa trabalhosa e de custo muito elevado, uma vez que a precisão da informação em função do tempo e espaço requer equipamentos e metodologias que se adéquem às exigências desta atividade.

A modelagem da capacidade de suporte de carga (CSC) do solo por meio da predição da pressão de preconsolidação (σ_p) foi proposta por Silva *et al.* (2005) como alternativa para avaliar e quantificar o processo de compactação em áreas sucroalcooleiras. Todavia, apesar de se constituir uma ferramenta preditiva e auxiliar no dimensionamento do parque de máquinas, assim como, no planejamento de manejos subseqüentes, o custo desta tecnologia, ainda não tem sido possível de ser adicionado no planejamento agrícola.

Desta forma, a caracterização (qualitativa e quantitativa) de índices físicos como, a densidade e a porosidade do solo tem sua relevância, especialmente quando elas puderem auxiliar em decisões, como por exemplo, a de respeitar a capacidade de suporte de carga (CSC) dos solos, possibilitando a preservação da estrutura do solo nos manejos subseqüentes, por meio da estimativa do estado crítico de consolidação do solo. Em adição, além da simplicidade de sua determinação, estas propriedades são de ampla utilização em estudos de avaliação da estrutura e compactação do solo.

Uma alternativa a ser considerada, portanto, são a modelagem e predição da densidade do solo (ρ_{op}), assim como o volume total de poros (n_{op}), ambos referentes à pressão de preconsolidação

(σ_p). A σ_p , de acordo com Dias Junior (1994) e Dias Junior & Pierce (1995) é a pressão que um determinado solo, parcialmente saturado, pode suportar sem que o mesmo venha sofrer compactação adicional. De acordo com a metodologia para obtenção da σ_p , utilizada por estes autores, entre outros, Silva *et al.* (1998), Kondo & Dias Junior (1999), Miranda (2001), Silva *et al.* (2002), Silva *et al.* (2003a), Silva *et al.* (2003b) e Silva *et al.* (2004), também é possível quantificar ρ_{op} e n_{op} e em adição também estabelecer relações, a exemplo da σ_p , com a capacidade de suporte de carga (CSC) e a degradação da estrutura dos solos agrícolas. A ρ_{op} e a n_{op} representariam, portanto, a maior densidade e a menor porosidade (valores críticos), que um solo deve ser submetido. Estes índices indicariam a relação crítica de massa e volume a ser alcançada por um solo, para que o mesmo tenha preservado de forma sustentável, a sua estrutura.

Os valores de ρ_{op} e a n_{op} podem ser obtidos concomitante com σ_p , por meio de uma metodologia denominada ensaio de consolidação, cuja definição consiste no processo de transferência gradual de uma carga aplicada à água dos poros do solo para a sua estrutura, até que todos os vazios do solo sejam comprimidos (US Department of the Army, 1970). O ensaio, que preconiza a utilização de um consolidômetro é feito em corpos-de-prova indeformados, o que possibilita a melhor avaliação da história de tensão e do manejo do solo (Dias Junior & Pierce, 1995).

É sabido que o uso da densidade do solo, especificamente a relativa, tem sido

proposta por alguns pesquisadores para caracterizar o estado de compactação do solo (Hakansson, 1990; Lipiec *et al.*, 1991; Marcolin, 2006). Ela consiste da relação entre a densidade do solo atual (D_{s_i}) pela densidade máxima do solo ($D_{s_{max}}$), sendo esta última obtida pelo ensaio de Próctor (Carter, 1990), um método destrutivo da estrutura, que, certamente, apaga a história de tensão do solo. Apesar de se tratar de um índice, esta maneira de se obter a densidade máxima - $D_{s_{max}}$ pode não ser a mais adequada, quando o objetivo for avaliar a estrutura de solos agrícolas.

Em adição ao exposto acima, independente da escolha de qual atributo do solo deva ser o mais apropriado em estudos de avaliação da compactação, o tamanho da área agrícola e a dependência espacial tem sido os fatores preponderantes na definição do número de amostras. E neste último caso, o custo, tem sobressaído. Motivos como estes têm possibilitado, cada vez mais, o uso dos recursos geoestatísticos e das técnicas de AP para elaboração de mapas em estudos de avaliação da estrutura dos solos agrícolas (Silva *et al.*, 2005).

O uso desta tecnologia pode propiciar uma melhor avaliação dos atributos propostos neste estudo (ρ_{op} e a n_{op}), como indicadores do estado crítico de consolidação do solo, além de facultar a precisa localização de áreas com maior ou menor problema estrutural.

O trabalho teve por objetivo sugerir equações, as quais permitam estimar a densidade do solo (ρ_{op}) e o volume total de poros (n_{op}), ambos referentes à pressão de preconsolidação (σ_p), propondo-os como indicadores físicos na avaliação da qualidade e do estado crítico de consolidação dos solos agrícolas.

MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental onde foram coletadas as amostras indeformadas trata-se de um talhão de 8,34 ha de cana-de-açúcar que estava no segundo ciclo de cultivo, localizado no município de Piracicaba, SP cujas coordenadas geográficas são dadas pela Latitude 22°40'30"S e Longitude 47°36'38"W.

O estudo foi conduzido em amostras de NITOSSOLO VERMELHO (EMBRAPA, 1999) as quais foram coletadas na linha de tráfego, isto é, nas entrelinhas da cultura e em duas profundidades: a) *SP- Superficial* (0,0 a 0,10 m) e b) *SSP- subsuperficial* (profundidade de maior resistência mecânica, determinada previamente através de um perfil de penetrometria, obtido com o auxílio de um penetrômetro hidráulico eletrônico desenvolvido por Lanças *et al.* (2000).

Os anéis de amostragem (com dimensões de 0,0254 x 0,0652 m de altura e diâmetro compatíveis com a célula de compressão que acompanham o consolidômetro e construídos em aço carbono) eram cravados e extraídos do solo com auxílio de um amostrador do tipo *Uhland* que foi desenvolvido especificamente para esse fim. Em seguida, as amostras eram devidamente impermeabilizadas utilizando-se de papel filme e parafina, objetivando manter a umidade e a história de tensão tal como se encontravam no campo.

No laboratório os corpos-de-prova eram equilibrados a teores de água, conforme sugestão de Silva *et al.* (2004), que correspondessem aos seguintes estados de consistência: i) *tenacidade* (teores médios de água de 0,05 kg kg⁻¹, abaixo do limite de contração kg kg⁻¹), ii) *friabilidade* (teores médios de água 0,22 kg kg⁻¹, acima do limite de contração e abaixo do limite de plástico); e iii) *plasticidade* (teores médios

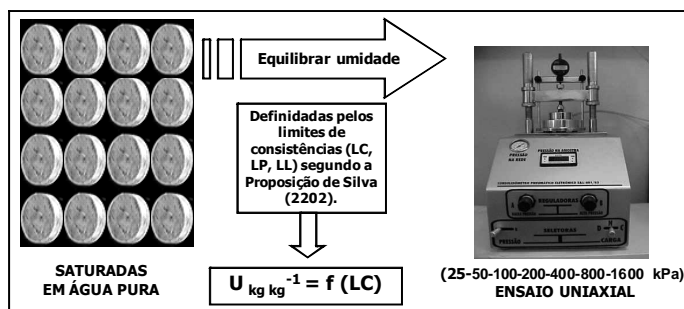


Figura 1. Procedimentos para realização dos ensaios de compressibilidade e obtenção da pressão de preconsolidação (σ_p).

de água de $0,32 \text{ kg kg}^{-1}$, acima do limite plástico e abaixo do limite de liquidez). A metodologia utilizada para determinar os limites de consistência foi a de Bowles (1986) e Sowers (1965).

As variáveis avaliadas foram: i) Densidade do solo inicial (ρ_i) e volume total de poros do solo inicial (n_i), as quais refletem as informações dos respectivos atributos do solo na sua condição natural, isto é, antes de ser submetido ao ensaio de consolidação ii) densidade do solo (ρ_{op}) e o volume total de poros (n_{op}), ambos referentes à pressão de preconsolidação, propostas neste estudo, como a máxima e menor densidade e porosidade (valores críticos), respectivamente, que um solo deva ser submetido, de modo que o valor da sua relação massa e volume a ser alcançada, seja indicadora da preservação e sustentabilidade da estrutura do solo.

A ρ_i (Mg m^{-3}) e n_i ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) foram obtidas, utilizando-se do método do anel volumétrico, conforme metodologia da EMBRAPA (1997). A determinação destes atributos permitiu fazer uma avaliação atual do efeito do manejo sobre a estrutura do solo. Para determinar os valores de ρ_{op} e a n_{op} , os corpos-de-prova foram submetidos a

ensaios de compressibilidade, utilizando-se de um consolidômetro pneumático-eletrônico, desenvolvido por Silva *et al.* (2007), como pode ser visto na Figura 1. A realização destes ensaios seguiu a metodologia utilizada por Dias Junior (1994), a qual preconiza carregamentos em corpos-de-prova de dimensões de $0,0652 \text{ m}$ de diâmetro por $0,0254 \text{ m}$ de altura, dos seguintes níveis de pressões: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. A troca do nível de pressão era feita depois que 90% da deformação máxima do corpo-de-prova fosse obtida e atendesse a sugestão de Taylor (1971), modificada por Silva *et al.* (2007).

Do ensaio uniaxial foi obtida a curva de compressão do solo, a qual representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo (Casagrande, 1936). A partir desta curva é que os valores de ρ_{op} e n_{op} foram estimados, com base nas equações apresentadas a seguir:

a) Estimativa ρ_{op} para corpos-de-prova, com teores de água referentes ao potencial matricial igual e, ou abaixo de 100 kPa (M_1), de acordo com sugestão de Dias Junior & Pierce (1995):

$$\rho_{\sigma p} = \rho_{(\sigma 50)} [(\log \sigma p - \log \sigma(50))A] \quad (1)$$

onde:

$\rho_{\sigma p}$ = densidade do solo referente a σp , Mg m^{-3}

$A = \text{tg} \alpha$

$\log \sigma p$ = logaritmo de σp

$\log \sigma(50)$ = logaritmo da pressão de 50kPa

$\rho_{(\sigma 50)}$ = densidade do solo na pressão de 50kPa, Mg m^{-3}

$$\text{tg} \alpha = \frac{\rho(\sigma 50) - \rho(\sigma 25)}{\log \sigma(50) - \log \sigma(25)} \quad (2)$$

onde:

$\log \sigma(25)$ = logaritmo da pressão de 25kPa

$\rho(\sigma 25)$ = densidade do solo na pressão de 25kPa, Mg m^{-3}

$$\sigma p = 10^B \quad (3)$$

σp = pressão de preconsolidação

$$B = \frac{A(-\log \sigma(50)) + \rho(\sigma 50) - \rho(\sigma 1600) - m(-\log \sigma(1600))}{m - A} \quad (4)$$

onde:

$\log \sigma(1600)$ = logaritmo da pressão de 1600kPa

$\rho(\sigma 1600)$ = densidade do solo na pressão de 1600kPa, Mg m^{-3}

m = índice de compressão

$$m = \text{tg} \beta \quad (5)$$

$$\text{tg} \beta = \frac{\rho(\sigma 1600) - \rho(\sigma 800)}{\log \sigma(1600) - \log \sigma(800)} \quad (6)$$

onde:

$\log \sigma(800)$ = logaritmo da pressão de 800kPa

$\rho(\sigma 800)$ = densidade do solo na pressão de 800kPa, Mg m^{-3}

b) Estimativa $\rho_{\sigma p}$ para corpos-de-prova, com teores de água referentes a potencial matricial acima de 100kPa (M_3), de acordo com sugestão de Dias Junior e Pierce (1994):

$$\rho_{\sigma p} = a + b(\log \sigma p) \quad (7)$$

onde:

$\rho_{\sigma p}$ = densidade do solo em σp , Mg m^{-3}

a = intercepto linear

b = coeficiente angular

$\log \sigma p$ = logaritmo de σp

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (8)$$

$$b = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2} \quad (9)$$

onde:

\bar{y} = valores médios conhecidos de ρ referentes a $\sigma : 25, 50, 100, 200 \text{ kPa}$

\bar{x} = valores médios conhecidos de $\log \sigma$

$$\sigma p = 10^C \quad (10)$$

σp = pressão de preconsolidação

$$C = \frac{a + m (\log \sigma(1600)) - D\rho(\sigma(1600))}{m - b} \quad (11)$$

onde:

m = índice de compressão

$\log \sigma(1600)$ = logaritmo da pressão de 1600kPa

$\rho(\sigma(1600))$ = densidade do solo na pressão de 1600kPa, Mg m^{-3}

$$m = \text{tg} \beta \quad (12)$$

$$\text{tg} \beta = \frac{\rho(\sigma(1600)) - \rho(\sigma(800))}{\log \sigma(1600) - \log \sigma(800)} \sigma \quad (13)$$

onde:

$\log \sigma(800)$ = logaritmo da pressão de 800kPa

$\rho(\sigma(800))$ = densidade do solo na pressão de 800kPa, Mg m^{-3}

c) Estimativa $n_{\sigma p}$:

$$n_{\sigma p} = 1 - \frac{\rho_{\sigma p}}{\rho_s} \quad (14)$$

onde:

$n_{\sigma p}$ = volume total de poros, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$

$\rho_{\sigma p}$ = densidade do solo na pressão de preconsolidação, Mg m^{-3}

ρ_s = densidade de partículas, Mg m^{-3}

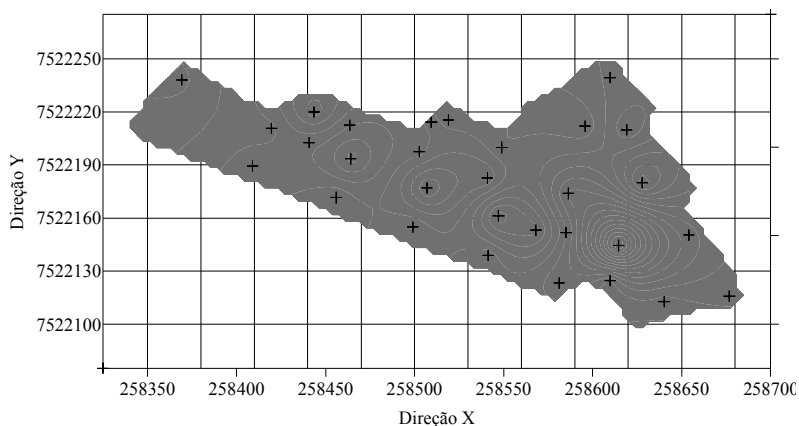


Figura 2 - Espacialização dos pontos de amostragem para elaboração do mapa de capacidade de suporte de carga do solo.

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial ($2 \times 2 \times 3$), isto é, 2 estados de consolidação (inicial e referente à σ_p), 2 profundidades (superficial e subsuperficial) e 3 estados de consistência (tenacidade, friabilidade e tenacidade).

Os valores médios de ρ_{op} e n_{op} foram inicialmente, submetidos a uma análise de correlação com os valores médios de σ_p . Posteriormente, constatada a significância entre os fatores por meio da análise de variância, assim como, a interação entre os mesmos, procedeu-se o teste de média de Scott & Knott (1974).

Para elaboração de mapas da dependência espacial dos respectivos índices físicos (densidade e porosidade), os pontos de amostragens foram georreferenciados no sentido longitudinal e transversal formando grades de 60 x 60 metros, sempre que as curvas de nível e os carregadores permitiam (Figura 2). Nesta operação foi utilizado uma Unidade Móvel de Amostragem do Solo (UMAS) equipada com um sistema de GPS. O aplicativo

Surfer, versão 8.0 foi utilizado para fazer, respectivamente, a espacialização dos dados pelo método de interpolação da krigagem, assim como, elaboração dos mapas para o presente estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1 estão apresentados os valores de densidade e porosidade do solo antes e depois de receber crescentes níveis de pressão (ensaio de consolidação uniaxial) de uma amostra da camada superficial (0 – 0,10 m) de Nitossolo Vermelho depois de submetida a dois teores de água (0,32 e 0,05 kg kg^{-1}), correspondentes aos limites de plasticidade e tenacidade, respectivamente. Em função destes valores e de σ_p utilizando-se das Equações de 1, 7 e 14 foram estimados os novos valores de valores de ρ_{op} e n_{op} , ambos referentes à pressão de preconsolidação.

Observa-se aumento e redução, respectivamente nos valores de densidade e porosidade total, independentemente do teor

de água da amostra. Os valores de ρ_{op} e n_{op} encontrados foram de 1,2260 Mg m⁻³ e 0,5391 m³ m⁻³, respectivamente, para o solo na condição do limite de plasticidade e 1,1570 Mg m⁻³ e 0,5650 para o solo na condição de tenacidade. Os valores de 98 e 448 kPa de σ_p encontrados para a mesma amostra evidencia a influência do teor de água na capacidade de suporte de carga (CSCS) do solo e por outro lado evidencia, através dos valores de ρ_{op} (1,2260 Mg m⁻³) e n_{op} 0,5391 (m³ m⁻³) o impacto sobre a estrutura do solo for trafegado sob teores de água inadequado e pressões de contato acima da CSC.

Quando são comparados os valores dos indicadores físicos da amostra na sua condição inicial (sem receber nenhum nível de pressão, isto é, da forma como se encontrava no campo) com os valores

quando a amostra recebe pressões referentes a sua σ_p , são verificadas alterações (aumento e redução) da ordem de 6 e 5% para a ρ_{op} e n_{op} , respectivamente para amostra com 0,32 kg kg⁻¹ e de 3 e 2% para a amostra com 0,05 kg kg⁻¹.

Estes valores evidenciam o estado degradado da estrutura deste Nitossolo Vermelho o que é corroborado pela estreita faixa da relação massa/volume entre a sua condição estrutural atual e condição depois de submetida a um nível de correspondente à pressão de preconsolidação. Desta forma, pode se afirmar que as equações 1, 7 e 14 podem estimar de forma satisfatória a ρ_{op} e n_{op} , as quais podem indicar a maior densidade e a menor porosidade (valores críticos) que um solo deve ser submetido para que o mesmo tenha preservado de forma sustentável, a sua estrutura.

Quadro 1 - Valores de ρ_{op} e n_{op} , estimados em função da σ_p e dos valores de densidades para cada nível de pressão aplicada de um único ensaio de consolidação uniaxial.

Pressão, kPa	Limites de consistência do solo e seus respectivos teores de água			
	Plasticidade (0,32 kg kg ⁻¹)		Tenacidade (0,05 kg kg ⁻¹)	
	ρ (Mg m ⁻³)	n (m ³ m ⁻³)	ρ (Mg m ⁻³)	n (m ³ m ⁻³)
0 ^a	1,1486 ^b	0,5682 ^c	1,1207 ^b	0,5787 ^c
25	1,1643	0,5623	1,1267	0,5764
50	1,1956	0,5505	1,1313	0,5747
100	1,2287	0,5381	1,1385	0,5720
200	1,2997	0,5114	1,1499	0,5677
400	1,3880	0,4782	1,1728	0,5591
800	1,4829	0,4425	1,2240	0,5398
1600	1,5678	0,4106	1,3040	0,5098
Indicadores físicos estimados a partir das Equações 1, 7 e 14				
σ_p (kPa)	98		448	
ρ_{op} (Mg m ⁻³)	1,2260		1,1570	
n_{op} (m ³ m ⁻³)	0,5391		0,5650	

^a corpo-de-prova na sua condição natural sem receber nenhuma aplicação de pressão, ^b densidade do solo inicial

(ρ_i); ^b porosidade do solo inicial (n_i).

Quadro 2 - Correlação de Pearson entre σ_p e ρ_{op} e n_{op} de 32 corpos-de-prova da camada 0-0,10m de um Nitossolo Vermelho, submetidos ao estado de consistência plástico.

Índices físicos-mecânicos	Índices físicos			
	ρ_i	ρ_{op}	n_i	n_{op}
σ_p	r= 0,67* P= 2,62x10 ⁻⁵	r= 0,79** P= 8,24x10 ⁻⁸	r= -0,61* P= 1,84x10 ⁻⁴	r= -0,79** P= 7,71x10 ⁻⁸
ρ_i	-	r= 0,87* P*= 1,02x10 ⁻⁹	r= -0,89** P*= 6,46x10 ⁻¹²	r= 0,87 P= 1,49x10 ⁻¹⁰
ρ_{op}	-	-	r= -0,81* P= 2,34x10 ⁻⁸	r= -0,99** P= 6,16x10 ⁻³⁶
n_i	-	-	-	r= 0,81** P= 2,81x10 ⁻⁸

r- coeficiente de correlação de Pearson; P-probabilidade.

Quadro 3 - Valores médios de densidade (ρ_i) e volume total de poros inicial (n_i) e densidade (ρ_{op}) e volume total de poros (n_{op}) referente à pressão de preconsolidação nas profundidades superficial e subsuperficial de amostras de um Nitossolo Vermelho, submetidas a três estados de consistência.

Profundidade	Estados de consistência					
	Tenacidade		Friabilidade		Plasticidade	
	ρ_i	ρ_{op}	ρ_i	ρ_{op}	ρ_i	ρ_{op}
	----- Mg m ⁻³ -----					
Superficial	1,40 Ab	1,47 Aa	1,39 Ab	1,52 Aa	1,40 Ab	1,47 Aa
Subsuperficial	1,41 Ab	1,47 Aa	1,40 Ab	1,50 Aa	1,38 Ab	1,51 Aa
	n_i	n_{op}	n_i	n_{op}	n_i	n_{op}
	----- m ³ m ⁻³ -----					
Superficial	0,47 Aa	0,45 Ab	0,48 Aa	0,43 Ab	0,47 Aa	0,45 Ab
Subsuperficial	0,47 Aa	0,45 Ab	0,47 Aa	0,43 Ab	0,48 Aa	0,43 Ab

Médias seguidas por mesma letra maiúscula para cada estado de consolidação (inicial e na pressão de preconsolidação) dentro de cada estado de consistência não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott (1974). Médias seguidas por mesma letra minúscula para cada profundidade dentro de cada estado de consistência não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott (1974).

A proposta de uso das equações 1, 7 e 14 para estimativa dos valores críticos de densidade e porosidade do solo referentes à pressão de preconsolidação pode, também, ser fundamentada pelos elevados e significativos valores dos coeficientes de correlação (r) apresentados no Quadro 2. A alta correlação positiva e negativa, respectivamente, entre os valores de σ_p , ρ_{op} e n_{op} em 32 corpos-de-prova

evidenciam a sensibilidade das equações (1, 7 e 14) e, portanto estimar estes atributos do solo.

A análise de variância dos dados, tanto de densidade (P<6,54%) quanto de volume total de poros (P<4,01%), revelou interação significativa tripla, ou seja, entre os fatores (estados de consistência, estado de consolidação e camada de solo) para as condições propostas neste estudo. O desdobramento e o teste de médias dos

Quadro 4 - Valores médios de densidade (ρ_i) e volume total de poros inicial (n_i) e densidade (ρ_{op}) e volume total de poros (n_{op}) na pressão de preconsolidação nas profundidades superficial e subsuperficial de amostras de um Nitossolo Vermelho, submetidas a três estados de consistência.

Profundidade	Estados de consistência					
	Tenacidade	Friabilidade	Plasticidade	Tenacidade	Friabilidade	Plasticidade
	ρ_i			ρ_{op}		
	----- Mg m ⁻³ -----					
Superficial	1,40 a	1,39 a	1,41 a	1,47 b	1,52 a	1,47 b
Subsuperficial	1,41 a	1,40 a	1,38 a	1,47 a	1,50 a	1,51 a
	n_i			n_{op}		
	----- m ³ m ⁻³ -----					
Superficial	0,47 a	0,48 a	0,47 a	0,45 a	0,43 b	0,45 a
Subsuperficial	0,47 a	0,47 a	0,48 a	0,45 a	0,43 a	0,43 a

Médias seguidas por mesma letra minúscula para cada profundidade dentro de cada estado de consolidação (inicial e na pressão de preconsolidação) não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott (1974).

atributos avaliados e seus respectivos fatores estão apresentados nos Quadros 3 e 4. Os valores ρ_{op} e n_{op} foram aumentados e diminuídos, respectivamente, em relação à densidade e o volume total de poros inicial do solo, de forma significativa, independente do estado de consistência e da profundidade avaliada (Quadro 3). Por outro lado, na foi verificado diferença significativa entre profundidades o que denota o grau de degradação da estrutura deste solo em função, muito provavelmente, da trafegabilidade de rodados agrícolas e da mobilização excessiva do solo sob a cultura da cana-de-açúcar.

Verifica-se ainda que o estado crítico de consolidação foi dependente da consistência que este solo possa estar submetido, ou seja, a ρ_{op} e n_{op} foram afetadas significativamente pelo teor de água, o mesmo não acontecendo com as

profundidades das quais foram amostrados os corpo-de-prova (Quadro 3 e 4).

Nota-se que quando é desconsiderado o efeito da consolidação, os valores médios de ρ_i e n_i não são afetados pela consistência (Quadro 4). Muito provavelmente, isto se deve ao estado avançado de degradação estrutural deste solo em função do preparo e tráfego exaustivos. O manejo empregado na cultura de cana-de-açúcar, certamente, tem descaracterizado os atributos dependentes da relação massa e volume e da distribuição das partículas granulométricas em todo o perfil cultivado.

De acordo com os Quadros 3 e 4, nota-se que apesar do impacto do manejo utilizado na cultura de cana-de-açúcar sobre os valores de ρ_i e n_i , o estado crítico de consolidação do Nitossolo Vermelho, ainda não foi alcançado. Estes resultados informam ao produtor, portanto, o valor de densidade e, ou

de porosidade crítica que este solo deveria alcançar, dentro de cada estado de consistência e em cada profundidade, quando as pressões de contato aplicadas (carregamentos) venham ser iguais ou acima da pressão de preconsolidação (σ_p).

Os resultados encontrados arremetem a duas pressuposições: i) a ρ_{σ_p} e n_{σ_p} permitem auxiliar no manejo da CSC do solo, possibilitando que as pressões de contato a serem aplicadas ao solo durante o tráfego não excedam a sua pressão de preconsolidação (σ_p) e ii) o estado de consistência do solo no momento do tráfego deve ser considerado durante a quantificação de ρ_{σ_p} e n_{σ_p} para que seja,

então, respeitada a primeira pressuposição, já que como mostrado no Quadro 3, os valores médios de densidade e porosidade são alterados significativamente, com a mudança da umidade.

Devido a existência da alta e significativa correlação negativa existente entre ρ_{σ_p} e n_{σ_p} , mostrado no Quadro 2, optou-se por avaliar a dependência espacial, apenas para a densidade. Os mapas de isodensidades (ρ_i e ρ_{σ_p}) são apresentados nas Figuras 3 e 4, ilustrando a espacialização de valores deste atributo na condição natural (inicial) e referente a σ_p , para os distintos estados de consistência a que foram submetidos os

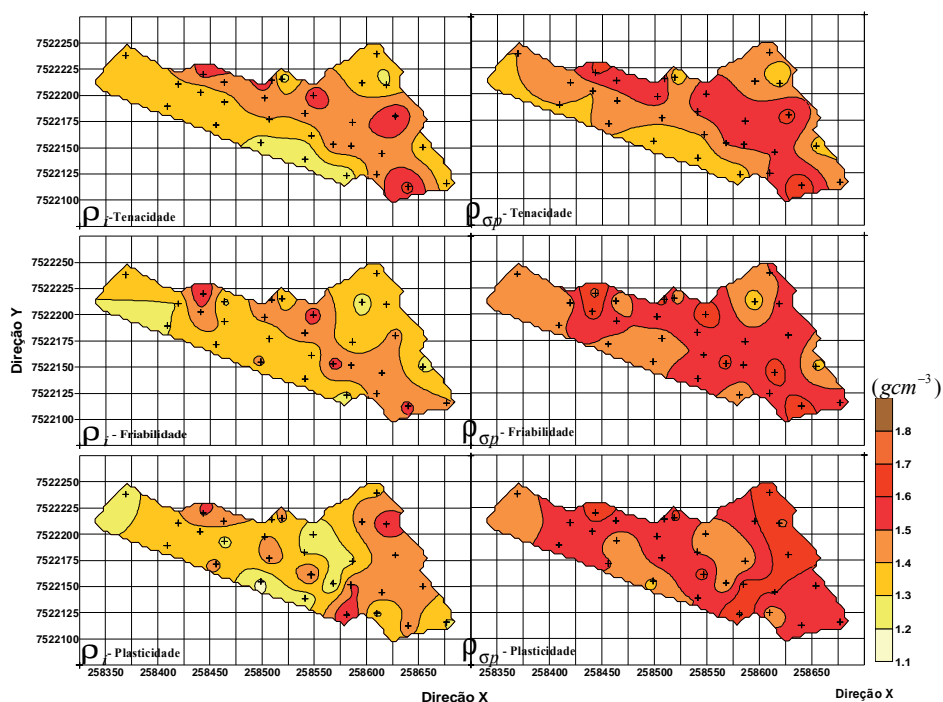


Figura 3 - Valores de ρ_i e ρ_{σ_p} de corpos-de-prova da camada superficial (0,0 – 0,10m), submetidos a diferentes estados de consistência.

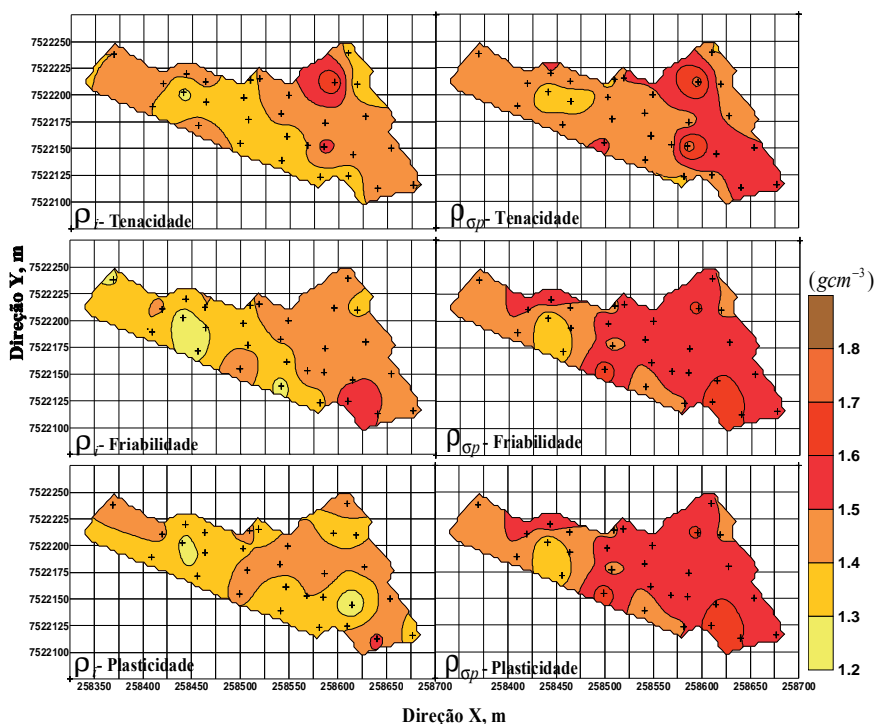


Figura 4 - Valores de ρ_i e ρ_{op} de corpos-de-prova da camada subsuperficial, submetidos a diferentes estados de consistência.

corpos-de-prova, dentro das camadas superficial e subsuperficial.

Observam-se classes de isodensidades que variam de $1,10 \text{ Mg m}^{-3}$ a $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ para a camada superficial e de $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$ a $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ para a camada subsuperficial, mostrando, certamente, os transtornos que podem ser provocados, caso a opção pela a estatística clássica, quando adotada de maneira equivocada, seja a única a ser considerada em estudos dessa natureza. De acordo com os mapas (Figura 4), nota-se que a maior parte da área apresentou valores de ρ_i da ordem de $1,20$ a $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$, muito embora perceba-se também, manchas isoladas com valores que variam de $1,50$ a $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$. Comportamento semelhante é

verificado também na camada subsuperficial (Figura 4).

CONCLUSÕES

1. Para as condições em que foi conduzido o estudo, tanto ρ_{op} quanto n_{op} , a exemplo da op , possibilitaram estimar o estado crítico de consolidação que o solo pode alcançar, para que o mesmo não tenha a sua estrutura degradada;
2. As equações, assim como, ambos os atributos estimados, mostraram-se ferramentas apropriadas para avaliar o estado crítico de consolidação do solo

em áreas sucroalcooleiras;

3. A espacialização ρ_{op} e n_{op} podem auxiliar, tanto na localização de zonas de maior resistência mecânica, quanto estimar a máxima relação de massa e volume que o solo pode alcançar, para que em manejos futuros, a sustentabilidade de sua estrutura não seja comprometida.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por ter concedido a bolsa de Pós-Doc ao primeiro autor deste trabalho.

À Fundação para o Desenvolvimento da UNESP (FUNDUNESP) pela concessão de recursos que viabilizaram a publicação deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bowles, J.E. 1986. Engineering properties of soils and their measurements. McGraw-Hill, New York, 3rd ed. 218 pp.
- Carter, M. R. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, 70:425-433.
- Casagrande, A. 1936. The determination of the pre-consolidation load its practical significance. In *Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Proceeedge. MA Harvard University, Cambridge, 3: 60-64.
- Dias Junior, M.S. 1994. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. *Dissertação de doutoramento*, Michigan State University, East Lansing, 114 pp.
- Dias Junior, M.S. & Pierce, F.J. 1995. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology*, 8: 139-151.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. 1997. Manual de métodos de análises de solo. Ministério da Agricultura e do Abastecimento, Rio de Janeiro, 2.ed., 212 pp.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. 1999. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Serviço de Produção de Informações, Brasília, 412 pp.
- Hakansson, I. 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil e Tillage Research*, 16: 105-120.
- Kondo, M. K. & Dias Junior, M.S. 1999. Compressibilidade de três Nitossolos em função da umidade e uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23: 211-218.
- Lipiec, J., Tarkiewicz, S., Kossowski, J. & Hakansson, I. 1991. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. *Soil & tillage Research*, 19: 307-317.
- Marcolin, C.D. 2006. Propriedades físicas de nitossolo e latossolos argilosos sob plantio direto. *Dissertação de mestrado*, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 110 pp.
- Miranda, E.E.V. 2001. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um nitossolo sob o cultivo de cafeeiro na região dos Cerrados. *Dissertação de mestrado*, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 57 pp.
- Scott, A.J. & Knott, M. 1974. Accounter analysis methods for grouping means in the analysis of variants. *Biometrics*, 30:507-512.

- Silva, R.B. 1998. Efeito da adsorção de fósforo em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos da micro-região dos Campos da Mantiqueira, MG. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 109 pp.
- Silva, R.B. 2002. Compressibilidade e Resistência ao Cisalhamento de um Latossolo Sob Diferentes Intensidades de Uso na Região dos Cerrados. Tese de doutoramento, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 142 pp.
- Silva, R.B., Dias Junior, M.S., Santos, F.L.S. & Franz, C.A.B. 2003a. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada por meio da pressão de preconsolidação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27: 961-971.
- Silva, R.B., Dias Junior, M.S., Silva, F. A. M. & Fole, S. M. 2003b. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Nitossolo dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27: 973-983.
- Silva, R., Lanças, K.P. & Miranda, E.K. 2005. Prediction and spatial variability of soil dynamic properties in sugar cane fields of Sao Paulo State - Brazil. In J. V. Sttaford, JTI - Swedish Institute of Agricultural, SLU - Swedish University of Agricultural Science. (Org.). Precision Agriculture 05. Wageningen Academic Publishers, Netherlands, 1: 441-448.
- Silva, R.B., Dias Junior, M.S., Santos, F.L.S & Franz, C.A.B. 2004. Resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27: 165-173.
- Silva, R.B., Lanças, K.P. & Masquetto, B.J. 2007. Consolidômetro: Equipamento pneumático-eletrônico par avaliação do estado de consolidação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31: 617-615.
- Sowers, G.F. 1965. Consistency. In Black, C.A., ed. *Methods of soil analysis physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling*. American Society of Agronomy, 1: 391-399.
- Taylor, H.M. 1971. Effects of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. In Barnes, K. K, Carleton, W. M., TAYLOR, H. M, Throckmorton, R. I., Vandenberg, G. E. *Compaction of agricultural soils*, pp. 292-305. ASAE St. Joseph:
- U.S. 1970. *Army Engineer Manual EM 1110-2-1906, Laboratory Soils Testing*, Washington.