



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Brasil

Barboza da Silva, Reginaldo; Pereira Lanças, Kleber; Junior Masquetto, Batista  
Consolidômetro: equipamento pneumático-eletrônico para avaliação do estado de consolidação do  
solo

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 31, núm. 4, agosto, 2007, pp. 607-615

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214056001>

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

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

## CONSOLIDÔMETRO: EQUIPAMENTO PNEUMÁTICO-ELETRÔNICO PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSOLIDAÇÃO DO SOLO<sup>(1)</sup>

Reginaldo Barboza da Silva<sup>(2)</sup>, Kleber Pereira Lanças<sup>(3)</sup> & Batista Junior Masquetto<sup>(4)</sup>

### RESUMO

A obtenção da pressão de preconconsolidação ( $\sigma_p$ ) se dá a partir de um método denominado ensaio de consolidação, cuja definição consiste no processo de transferência gradual de uma carga aplicada ao solo até que todos os vazios deste sejam comprimidos. O ensaio de consolidação preconiza a utilização de um consolidômetro. Entretanto, esse equipamento não é ainda produzido no Brasil, e os modelos disponíveis para importação são de alto custo. Motivos como estes têm inviabilizado, em alguns casos, o acesso por parte de pesquisadores e agricultores às informações sobre a Capacidade de Suporte de Carga (CSC) do solo. Como alternativa, este trabalho teve por objetivo desenvolver e avaliar um equipamento pneumático-eletrônico que possibilitasse a obtenção de  $\sigma_p$ . O equipamento foi desenvolvido no Núcleo de Estudos de Máquinas e Pneus Agrícolas (NEMPA) da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista, campus de Botucatu, SP. A sua avaliação se deu por meio de ensaios uniaxiais, os quais foram realizados em corpos-de-prova de duas camadas (superficial e subsuperficial) de um Latossolo Vermelho. O desempenho do equipamento foi constatado durante a sua avaliação; nas curvas de compressão do solo, verificaram-se incrementos dos valores de densidade do solo, isto é, variação no recalque dos corpos-de-prova em função do aumento dos níveis de pressão e de crescentes teores de água. A eficiência do equipamento na realização dos ensaios uniaxiais pôde ser comprovada pelo comportamento diferenciado tanto das curvas de compressão

---

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em maio de 2005 e aprovado em março de 2007.

<sup>(2)</sup> Professor da Universidade Estadual Paulista – UNESP. Campus Experimental de Registro. Rua Tamekische Tarano 5, Centro, CEP 11900-000 Registro (SP). E-mail: rbsilva@fca.unesp.br

<sup>(3)</sup> Professor da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista – UNESP. Campus de Botucatu, Fazenda Lageado, Portaria I, Rua José Barbosa de Barros 1780, CEP 18608-460 Botucatu (SP). E-mail: kplancas@fca.unesp.br

<sup>(4)</sup> Técnico da Masquetto Usinagem. Rua 1º de Maio 60, Vila Antártica, CEP 18608-460 Botucatu (SP). E-mail: masquetto@ig.com.br

como das equações obtidas para os modelos de capacidade de suporte de carga, as quais foram capazes de detectar os diferentes graus de consolidação, assim como as distintas histórias de tensão da estrutura de cada camada do Latossolo Vermelho.

**Termos de indexação:** ensaio uniaxial, compressibilidade, solo, pressão de preconsolidação.

**SUMMARY:** *CONSOLIDOMETER: ELECTRONIC-PNEUMATIC EQUIPMENT TO EVALUATE SOIL CONSOLIDATION*

*Preconsolidation pressure ( $\sigma_p$ ) is determined by a consolidation test method, based on the gradual transference of a load onto the soil until all porosity is compressed. The equipment used for this test is a consolidometer, which is not available in Brazil, while the models used abroad are very costly. In some cases this situation impairs the access of Brazilian researchers and farmers to data of Soil Load Support Capacity (SLCS). This study had the objective of developing and evaluating an electronic-pneumatic device by which  $\sigma_p$  can be obtained in the consolidation test. The equipment was developed at the Universidade Estadual Paulista and evaluated in uniaxial tests using specimens of two Oxisol horizons (surface and sub surface). The soil density values in the soil compression curves increased showing the variation of specimen strain recalque/sinkage or displacement in function of the increasing pressure levels and soil moisture. The equipment efficiency was confirmed by the differentiated compression curves and equations obtained for the soil load support capacity models, which were able to detect the different soil consolidation degrees as well as the different sequences of structure tension in each Oxisol layer.*

*Index terms:* uniaxial test, compressibility, soil, preconsolidation pressure.

## INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, com os avanços técnicos e científicos da agricultura brasileira, o surgimento de novas técnicas e métodos, tanto de laboratório quanto de campo, tem contribuído para um novo enfoque da avaliação da estrutura dos solos agrícolas. Em grandes áreas, de culturas anuais ou perenes, a avaliação estrutural dos solos agrícolas tem sido feita a partir de modelos de predição da capacidade de suporte de carga (CSC) do solo (Dias Junior, 1994; Kondo, 1998; Silva, 2002). Esses modelos permitem prever a resistência mecânica do solo e, quando ajustados em função do teor de água (Dias Junior, 1994; Kondo & Dias Junior, 1999; Miranda, 2001; Silva, 2002; Silva et al., 2003a,b; Silva et al., 2004), constituem uma poderosa ferramenta para estudos de interação máquina-solo.

De acordo com os autores citados, a utilização de modelos de CSC do solo para prever os efeitos do tráfego sobre a estrutura do solo preconiza o uso da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ). Propriedade mecânica do solo obtida em laboratório, ela é uma indicadora da pressão máxima que pode ser aplicada ao solo de maneira que não ocasione compactação adicional (Dias Junior & Pierce, 1996).

A obtenção de  $\sigma_p$  se dá a partir de um método denominado ensaio de consolidação, que, de acordo com a publicação EM 1110-2-1906 (US Department of the Army, 1970), consiste no processo de transferência gradual de uma carga aplicada ao solo até que todos os vazios deste sejam comprimidos. A quantidade de água que sai da amostra depende da intensidade da carga e da compressibilidade do solo, enquanto a taxa com que a água é drenada depende do coeficiente de permeabilidade, da densidade do solo e também da compressibilidade da amostra (US Department of the Army, 1970).

Todavia, para realização de um ensaio de consolidação faz-se necessário o uso de um equipamento específico, denominado consolidômetro. Esse equipamento não é produzido no Brasil, e os modelos disponíveis no exterior, automatizados ou não, são caros, o que dificulta a sua utilização.

Diante do exposto, é fato que a dificuldade de acesso à tecnologia para obtenção da  $\sigma_p$  e por conseguinte aos modelos de CSC do solo priva os pesquisadores e agricultores brasileiros do uso dessa importante propriedade na predição do processo de compactação dos solos agrícolas.

Buscando alternativa para esse problema, o presente trabalho teve por objetivos desenvolver e

avaliar um consolidômetro pneumático-eletrônico que possibilitasse a obtenção de  $\sigma_p$ , propriedade mecânica utilizada na predição da capacidade de suporte de carga, em função do teor de água no solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

A realização desta pesquisa se deu em três etapas: projeto, desenvolvimento do protótipo e avaliação, por meio da realização de ensaios de consolidação.

### Equipamento

#### Projeto e desenvolvimento do protótipo

O equipamento foi projetado e desenvolvido no Núcleo de Estudos de Máquinas e Pneus Agrícolas (NEMPA) da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus de Botucatu, SP.

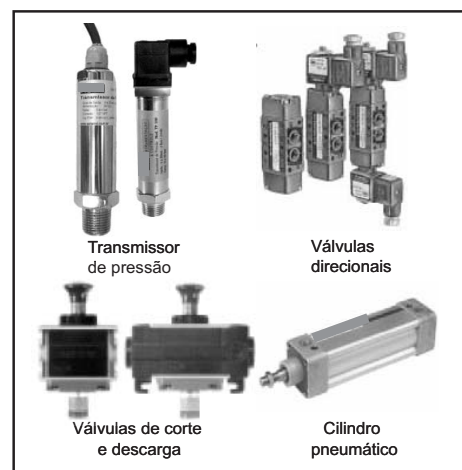
O seu princípio de funcionamento preconiza que um corpo-de-prova (amostra indeformada de solo) confinado lateralmente em anel de aço, porém com drenagem livre nas extremidades superior e inferior, seja submetido a incrementos sucessivos de pressão vertical (US Department of the Army, 1970). Isso se deve basicamente à atuação simultânea de: (a) um conjunto pneumático que foi projetado para aplicar cargas instantâneas e manter o carregamento por tempos definidos sobre o corpo-de-prova; e (b) um dispositivo medidor de consolidação que, localizado acima do corpo-de-prova e preso a uma estrutura fixa, indica a deformação vertical (recalque) do solo.

O equipamento é constituído de um gabinete de metal que aloja um conjunto pneumático (Figura 1), cujos componentes, caracterizados a seguir, foram definidos conforme as necessidades técnicas do projeto.

a) Um cilindro tipo pneumático de simples efeito com amortecimento (VDMA 24562 – ISO 6431; série CN 10), sem ímã incorporado no pistão e pressão de trabalho de 0,5 a 10 bars (7,3 a 145 psi). A haste do pistão tem diâmetro de 100 mm, curso de 50 mm e é construída em aço SAE 1045 cromado duro.

b) Duas unidades reguladoras de pressão (unidade R; série QB0) de corpos plásticos, conexão G 1/8" e posição de trabalho indiferente. A reguladora 1 tem pressão de trabalho de 0,5 a 4 bars (8 a 58 psi) e foi destinada aos carregamentos de baixa pressão (25, 50, 100 e 200 kPa), a serem aplicados no corpo-de-prova. A reguladora 2 tem pressão de trabalho de 0,5 a 8 bars (8 a 116 psi) e destinou-se aos carregamentos de alta pressão, isto é, pressões de 400, 800 e 1.600 kPa, a serem aplicadas no corpo-de-prova.

c) Duas válvulas direcionais (série SB0 1/8") de atuação pneumática com atuador manual monoestável, conexões G 1/8" e pilotagem M5 x 0,8. A válvula 1 tem pressão de trabalho de 0,5 a 4 bars (8 a 58 psi) e foi destinada aos carregamentos de baixa



**Figura 1. Alguns dos dispositivos do conjunto pneumático utilizados no equipamento. (a) transmissor de pressão; (b) válvulas direcionais; (c) válvulas de corte e descarga; (d) cilindro pneumático.**

pressão. A válvula 2 tem pressão de trabalho de 0,5 a 8 bars (8 a 116 psi) e destinou-se aos carregamentos de alta pressão.

d) Uma unidade de válvula de corte e descarga (série QBS4), atuação com botão para cima ou para baixo e pressão de trabalho de 0 a 10 bars (0 a 145 psi), cuja função foi interromper o fornecimento de ar ou descarregar o circuito.

e) Um transmissor de pressão (com indicador digital) com material do invólucro em aço inoxidável AISI 304 e proteção do invólucro (IP-65/IP-67), conforme norma da ABNT. O modelo utilizado foi o TP200N, com faixa de trabalho de 0 a 10 bars (0 a 145 psi), saída de 4 a 20 mA e conexão 3/4" BSP.

Esse conjunto foi alimentado por ar comprimido produzido por um compressor de baixa pressão e alto volume (motor de 5 cv, 2 pistões em V e pressão de trabalho de 12 bars/175 psi), que, a partir de níveis de pressão e tempos de compressão previamente determinados, propulSIONA a haste do pistão contra uma estrutura rígida onde está posicionado o corpo-de-prova. Acima, na base do gabinete, uma estrutura metálica fixa permite o acondicionamento, de maneira orientada e precisa, do corpo-de-prova, de forma que durante os carregamentos axiais a transmissão da pressão à estrutura do solo não seja comprometida. A compressibilidade do corpo-de-prova é conhecida por meio da deformação vertical, que é indicada por um relógio comparador digital de curso de 12 mm e precisão de 0,01 mm. Na figura 2 são apresentados os cortes esquemáticos das vistas frontal (Figura 2a) e lateral do consolidômetro (Figura 2b), com suas principais dimensões e detalhes da orientação e condicionamento do corpo-de-prova nos anéis de consolidação (Figura 2c).

Acompanham o equipamento os seguintes acessórios: (a) dispositivos de acondicionamento do corpo-de-prova (anel flutuante de consolidação); (b) anéis de consolidação com áreas de 36,3 e 18,8 cm<sup>2</sup> para corpos-de-prova de áreas distintas; (c) placas porosas para drenagem da água; e (d) indicador digital de medida de consolidação (relógio comparador digital, série 543-682B, e saída de dados SPC), com curso de 12,7 mm, resolução de 0,01 e exatidão de  $\pm 0,02$  mm.

O dispositivo de acondicionamento da amostra (Figura 2c), proposto para o equipamento, é do tipo anel flutuante, isto é, a fricção entre as paredes internas do anel e o solo é menor do que no tipo de anel fixo. Nesse caso, para corpos-de-prova de solos de textura arenosa ou de textura argilosa de atividade alta, quando muito secos, se ensaiados, a fricção lateral não suporta o peso do anel, havendo o desprendimento do solo. De acordo com EM 1110-2-1906 (US

Department of the Army, 1970), o dispositivo de anel flutuante só é satisfatório para solos coesos e duros, ou seja, que permitam o adequado acondicionamento do solo dentro do anel de consolidação. Em decorrência desses fatores, além do anel de consolidação-padrão (altura de 0,025 m e diâmetro de 0,063 m), foi proposto um anel de consolidação de altura e diâmetro de 0,05 x 0,05 m, respectivamente para ensaios com solos mais soltos (arenosos) ou com predomínio de argilomineral 2:1, que, quando secos, apresentam elevado grau de contração. A vantagem do uso deste anel é que as suas dimensões, sugeridas como padrão pela Embrapa (1997), são utilizadas em estudos e análises de rotinas de algumas propriedades físicas do solo, como, por exemplo, a densidade do solo.

Na figura 3 pode ser visto o protótipo do equipamento desenvolvido, com detalhes dos seus acessórios, cujo peso total é de aproximadamente 30 kg.

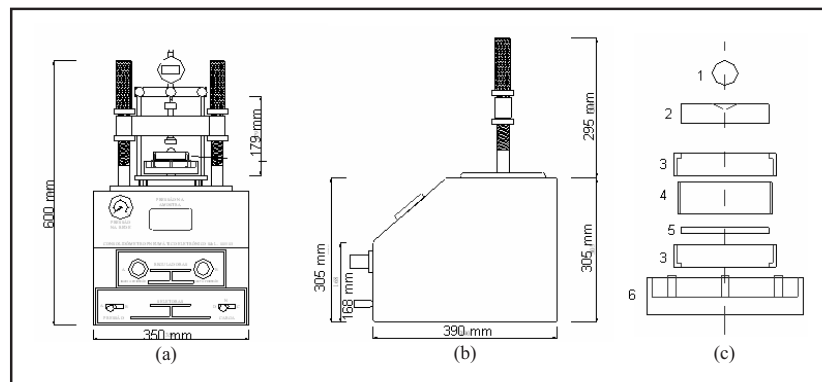


Figura 2. Cortes e dimensões do equipamento. (a) vista frontal, (b) vista lateral e (c) detalhes da orientação de acondicionamento do corpo-de-prova nos anéis de consolidação (1 e 2: esfera de aço e dispositivo de transferência de pressão ao corpo-de-prova; 3: anéis de consolidação; 4: corpo-de-prova; 5: placa porosa; 6: dispositivo para coleta da água drenada).

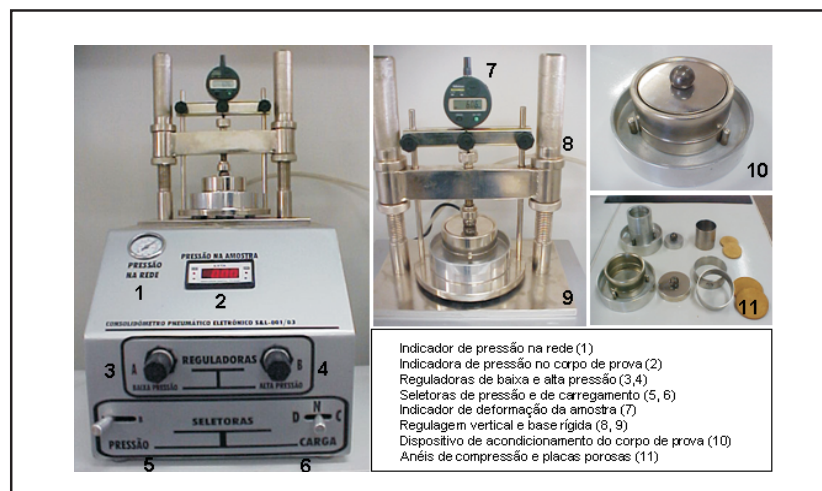


Figura 3. Protótipo do equipamento pneumático-eletrônico, com seus componentes e acessórios.

Para calibrar o equipamento, foi considerada a relação entre os diâmetros do corpo-de-prova e do êmbolo do pistão, e, utilizando a expressão  $F = P \times A$ , em que P: pressão, F: força e A: área, estimaram-se os níveis de força em função de suas respectivas pressões teóricas (25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa), a serem aplicadas no corpo-de-prova. A partir dos níveis de força e por meio de uma célula de carga (modelo Z de tração/compressão) de capacidade de 5.000 kgf e sensibilidade (mv/v de  $2 \pm 0,1\%$ , com indicador digital DMY-2030-light-CC) de precisão de  $0,1\%$  de fundo escala, determinaram-se, experimentalmente, os níveis de pressão (em bar) para os corpos-de-prova de áreas distintas (36,3 e 18,8 cm<sup>2</sup>) e ajustaram-se duas equações de calibração (Figura 4).

Independentemente da área do corpo-de-prova, as curvas de calibração, ajustadas para pressão na amostra (Pa), apresentaram coeficientes de correlação elevados ( $R^2 = 0,99$ ). Dessa forma, além da leitura, que pode ser verificada no indicador digital do transdutor de pressão, o operador pode também fazer uso dessas equações e de uma tabela para determinar os carregamentos a serem aplicados no corpo-de-prova (Figura 4).

## Avaliação

### Amostragem dos corpos-de-prova

A avaliação do equipamento se deu por meio de ensaios de consolidação em amostras indeformadas (corpos-de-prova) de solo de classe textural muito argilosa, classificado como Nitossolo Vermelho (Embrapa, 1999). Este solo está sob uma pista de ensaios de máquinas e pneus agrícolas, da FCA/UNESP, campus de Botucatu, localizado entre as coordenadas geográficas  $22^\circ 49'$  de latitude sul,  $48^\circ 24'$  de longitude oeste e a uma altitude de 770 m, cujo histórico de uso lhe confere registros de tensão diferenciada em suas diferentes profundidades. Assim, na expectativa de que o equipamento detectasse essas diferenças, corpos-de-prova de duas camadas: (a) superficial, isto é, de 0 a 0,10 m e (b) subsuperficial de 0,20 a 0,30 m foram coletadas utilizando um amostrador hidráulico, visando à manutenção da estrutura da amostra. Os anéis utilizados pelo amostrador são de aço e de dimensões de 0,025 x 0,068 m de altura e diâmetro, respectivamente, as quais são compatíveis com o dispositivo de acondicionamento (anéis de consolidação) da amostra que acompanha o equipamento.

Corpo-de-prova 1			Corpo-de-prova 2		
Área = 36,3 cm <sup>2</sup>			Área = 18,8 cm <sup>2</sup>		
Força	Pressão na amostra		Força	Pressão na amostra	
kgf	bar	kPa	kgf	bar	kPa
9,26	0,55	25	4,81	0,45	25
18,52	0,72	50	9,62	0,56	50
37,04	0,99	100	19,23	0,73	100
74,07	1,47	200	38,46	1,00	200
148,14	2,43	400	76,93	1,51	400
296,29	4,35	800	153,85	2,50	800
592,58	8,16	1.600	307,71	4,49	1.600

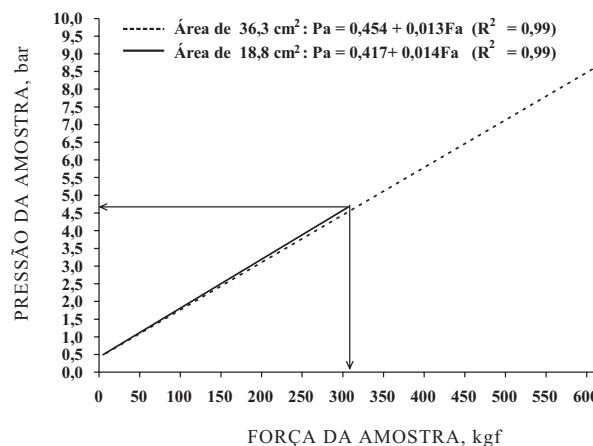


Figura 4. Curvas de calibração da pressão aplicada na amostra (bar), em função da força (kgf), para as duas áreas distintas de corpo-de-prova. Pa: pressão na amostra.



Atendendo à recomendação da literatura (Dias Junior, 1994; Kondo, 1998; Silva, 2002), para gerar um modelo, cada amostra foi submetida a cinco teores de água. Considerando três repetições, cada modelo totalizou a amostragem e consolidação de 15 anéis para cada uma das camadas de solo. Portanto, para avaliação do equipamento, foram ensaiados 30 corpos-de-prova.

### Ensaio de consolidação

Em laboratório, as amostras foram saturadas por capilaridade com água destilada e, após 48 h, transferidas para o extrator de placa porosa ou, quando necessário, colocadas à temperatura ambiente, para que fossem obtidos os cinco teores de água de interesse neste estudo: 0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; e 0,25 kg kg<sup>-1</sup>. Neste trabalho foram seguidos os procedimentos de Silva (2002), os quais recomendam que as umidades sejam definidas em função dos limites de consistência (limite de liquidez - LL, limite de plasticidade - LP e limite de contração - LC). Posteriormente, as amostras foram submetidas aos ensaios de consolidação usando o equipamento, seguindo o método sugerido por Bowles (1986) e modificado por Dias Junior (1994), que preconiza a aplicação dos seguintes níveis de pressão: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, até que 90 % da deformação máxima na amostra seja obtida (Taylor, 1971).

### Estimativa de $\sigma_p$ , obtenção e análise estatística dos modelos de capacidade de suporte de carga (CSC) do solo

Os valores de deformação das amostras, avaliados por meio da densidade do solo para as duas camadas, foram grafados em função do logaritmo das pressões aplicadas, obtendo-se a curva de compressão do solo (Figura 5). A partir desta curva foi estimada a  $\sigma_p$ , em função dos cinco teores de água, utilizando os métodos M1 e M3 (Dias Junior, 1996), os quais preconizam que as amostras sejam consolidadas a

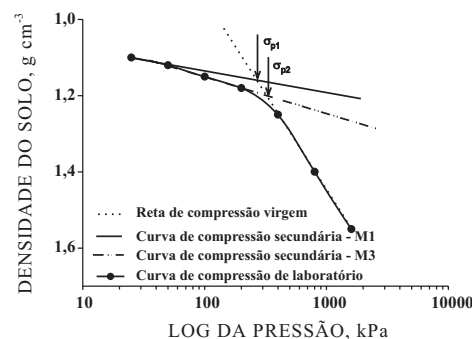


Figura 5. Curva de compressão do solo: estimativas de  $\sigma_p$  por meio dos métodos M1 e M3, adaptado de Dias Junior (1994).

teores de água cujos potenciais matriciais estejam abaixo de 100 kPa e acima de 100 kPa, respectivamente. Os valores de  $\sigma_p$  foram ajustados em função dos teores de água (U), obtendo-se, portanto, o modelo de CSC do solo ( $\sigma_p = 10^{(a-bU)}$ ), segundo sugestão de Dias Junior (1994). O teste de homogeneidade das equações ajustadas, para cada camada, foi feito de acordo com os procedimentos de Snedecor & Cochran (1989).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No quadro 1 é apresentado o resumo de alguns índices volumétricos gerados durante o ensaio de consolidação de corpos-de-prova, submetidos a dois conteúdos de água.

Verifica-se redução dos valores de deformação e aumento dos valores de índice de vazios, altura, volume, porosidade, bem como a sua redução, em função dos níveis crescentes de pressão aplicados no corpo-de-prova. Também se observa que, quanto maior o teor de água do solo, maior o efeito da pressão sobre esses índices. Esse comportamento já evidencia o bom desempenho do conjunto pneumático e do medidor de consolidação sobre o corpo-de-prova, assim como a interação e atuação conjunta de todos os dispositivos pneumáticos.

Os incrementos nos valores de densidade do solo ocasionados pelo recalque (redução do volume do corpo-de-prova) – em função do aumento dos níveis de pressão e de crescentes teores de água, durante a realização dos ensaios de consolidação em amostras da camada superficial (0–0,10 m) – podem ser observados nas curvas de compressão, apresentadas na figura 6. Segundo Larson et al. (1980) e Larson & Gupta (1980), essa curva tem sido utilizada para simular tais reduções e relacionar o logaritmo da pressão aplicada e alguma propriedade do solo dependente do arranjo das partículas e, ou, agregados do solo, como, por exemplo, o índice de vazios ou a densidade do solo (Casagrande, 1936; Holtz & Kovacs, 1981). Percebe-se que, quanto maior o teor de água, maior a compressibilidade da amostra em função do aumento das pressões. Esse comportamento é esperado, já que, quando todos os demais fatores do solo se mantêm constantes, é a umidade que governa a magnitude de deformação que pode ocorrer no solo. Resultados semelhantes foram observados na literatura e confirmados em estudos com solos de clima temperado e tropical (Larson & Gupta, 1980; Dias Junior, 1994; Kondo, 1999; Silva, 2003a), utilizando equipamentos importados.

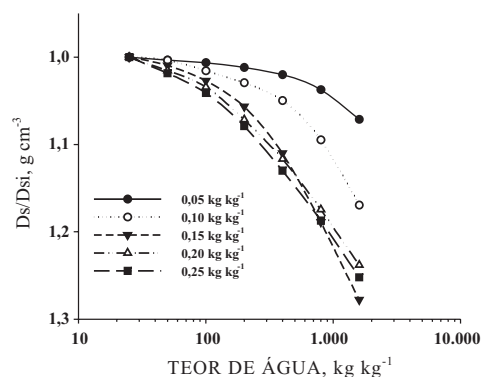
Observando a figura 6, nota-se que, quanto maior o teor de água, maiores são os valores de densidade do solo normalizados ( $D_s/D_{si}$ ) em função da pressão aplicada e, portanto, maior a suscetibilidade do solo à compactação. Resultados como estes, obtidos em equipamentos importados, levaram alguns autores –

**Quadro 1. Alguns dos índices volumétricos gerados durante o ensaio de consolidação do corpo-de-prova submetidos a dois conteúdos de água**

Pr <sup>(1)</sup>	Def <sup>(2)</sup>	IV <sup>(3)</sup>	Al <sup>(4)</sup>	Vol <sup>(5)</sup>	Por <sup>(6)</sup>	Red Por <sup>(7)</sup>
kPa	cm		cm	dm <sup>3</sup>	——— % ———	
0,05 kg kg <sup>-1</sup>						
25	0,006350	1,04	2,54	0,0803	51,05	0,24
50	0,013462	1,04	2,54	0,0801	50,91	0,51
100	0,022860	1,03	2,53	0,0798	50,73	0,86
200	0,041402	1,01	2,51	0,0792	50,36	1,58
400	0,074676	0,99	2,48	0,0781	49,70	2,88
800	0,137160	0,94	2,41	0,0762	48,39	5,42
1.600	0,229108	0,86	2,32	0,0733	46,35	9,42
0,25 kg kg <sup>-1</sup>						
25	0,025400	1,00	2,53	0,0803	50,09	0,98
50	0,050546	0,98	2,51	0,0795	49,59	1,97
100	0,098044	0,95	2,46	0,0780	48,62	3,89
200	0,168402	0,89	2,39	0,0757	47,11	6,88
400	0,262636	0,82	2,30	0,0728	44,94	11,17
800	0,383540	0,72	2,18	0,0689	41,88	17,21
1.600	0,473710	0,65	2,09	0,0661	39,37	22,18

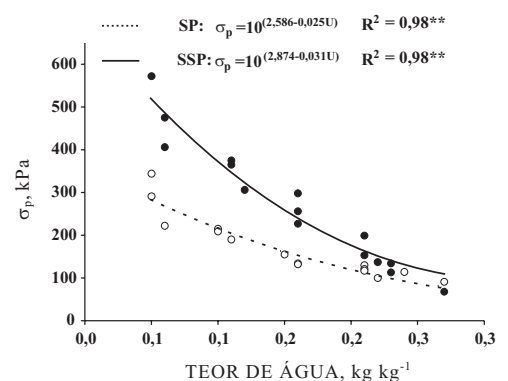
<sup>(1)</sup> Pressão aplicada no corpo-de-prova. <sup>(2)</sup> Deformação do corpo-de-prova. <sup>(3)</sup> Índice de vazios de corpo-de-prova. <sup>(4)</sup> Altura do corpo-de-prova. <sup>(5)</sup> Volume do corpo-de-prova. <sup>(6)</sup> Porosidade total do corpo-de-prova. <sup>(7)</sup> Redução da porosidade do corpo-de-prova.

entre eles Larson et al. (1980), Dias Junior (1994) e Silva (2002) – a sugerir o uso da curva de compressão do solo para estimar a suscetibilidade deste à compactação. Com isso, fica demonstrada a capacidade do equipamento em aplicar pressões e registrar deslocamentos, sendo ele sensível a diferentes teores de água e graus de consolidação a que possa estar submetido o corpo-de-prova.



**Figura 6. Curvas de compressão normalizadas (Ds/Dsi) de amostras de solo da camada superficial, equilibradas em cinco teores de água, obtidas a partir de ensaios uniaxiais no equipamento pneumático-eletrônico.**

Os modelos de capacidade de suporte de carga (Figura 7), que ajustam valores de  $\sigma_p$  em função dos teores de água (Dias Junior, 1994) para as duas camadas de solos avaliadas (superficial e subsuperficial), mostram a diferença entre os valores de  $\sigma_p$ , corroborando, também, a eficiência do equipamento. De acordo com o teste de significância de Snedecor & Cochran (1989), não foi observada



**Figura 7. Modelos de capacidade de suporte de carga das camadas superficial (SP) e subsuperficial (SSP) do solo. Os coeficientes a e b da equação e o valor de R² foram altamente significativos a 1 %.**



**Quadro 2. Teste de significância de acordo com Snedecor & Cochran (1989) entre as equações obtidas para as duas camadas de solo, ajustadas ao modelo de capacidade de suporte de carga,  $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$**

Camada de solo	Teste de homogeneidade, F	Parâmetro da equação	
		Intercepto linear, a	Coefficiente angular, b
Superficial vs subsuperficial	NH	**	**

Teste de F, segundo Snedecor & Cochran (1989); NH: não há homogeneidade e \*\* significativo a 1 %.

homogeneidade entre as equações de cada camada de solo e tanto o intercepto linear como o coeficiente angular de cada equação também diferenciaram estatisticamente a 1 % (Quadro 2). Esses resultados ratificam a capacidade de o equipamento detectar os diferentes graus de consolidação da estrutura de cada camada, em função de teores crescentes de água, ressaltando, portanto, as diferentes histórias de tensão de cada camada do Nitossolo Vermelho, como evidencia o comportamento distinto de cada curva (Figura 7).

## CONCLUSÕES

1. Verifica-se variação no recalque dos corpos-de-prova de acordo com o aumento dos níveis de pressão e dos crescentes teores de água.

2. A eficiência do equipamento na realização dos ensaios uniaxiais pôde ser comprovada pelo comportamento diferenciado, tanto das curvas de compressão, como das equações obtidas para os modelos de capacidade de suporte de carga, as quais foram capazes de detectar os diferentes graus de consolidação, assim como as distintas histórias de tensão da estrutura de cada profundidade do Latossolo Vermelho.

## AGRADECIMENTO

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela concessão de bolsa de pós-doutoramento ao primeiro autor deste trabalho.

## LITERATURA CITADA

- BOWLES, J.E. Engineering properties of soils and their measurements. 3.ed. Auckland, McGraw-Hill, 1986. 218p.
- CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load its practical significance. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Cambridge, 1936. Proceedings. Cambridge, Harvard University. 1936. v.3. p.60-64.
- DIAS JÚNIOR, 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. 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 solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solo. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. An introduction to geotechnical engineering. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1981. 733p.
- KONDO, M.K. Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 1998. 95p. (Tese de Mestrado)
- KONDO, M.K. & DIAS JUNIOR, M.S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três latossolos. R. Bras. Ci. Solo, 23:497-506, 1999.
- LARSON, W.E. & GUPTA, S.C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:1127-1132, 1980.
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. & USECHE, R.A. Compression of agricultural soil from eight soil orders. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:450-457, 1980.
- MIRANDA, E.E.V. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um Latossolo sob cultivo de cafeeiro na região do cerrado. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2001. 57p. (Tese de Mestrado)
- SILVA, R.B. Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2002. 142p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SANTOS, F.L. & FRANZ, C.A.B. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada por meio da pressão de preconsolidação. R. Bras. Ci. Solo, 23:219-226, 2003a.

- SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, F.A.M. & FOLE, S.M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. R. Bras. Ci. Solo, 27:973-983, 2003b.
- SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P. & MIRANDA, E.E.V. Densidad crítica del suelo como indicador de la capacidad de soporte de carga, en áreas bajo cultivo de caña de azúcar, em la región de Piracicaba, SP-Brasil. In: JORNADA SOBRE AGRICULTURA DE PRECISION, 2., La Coruña, 2004. Resumens. La Coruña, Universidad de La Coruña, 2004. p.32-38.
- SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. Statistical methods. 8.ed. Ames, Iowa State University Press, 1989. 503p.
- TAYLOR, H.M. 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. & van den BERG, G.E. Compaction of agricultural soils. St. Joseph, ASAE, 1971. p.292-305.
- US DEPARTMENT OF THE ARMY. Army Corps of Engineers. Engineer Manual em 1110-2-1906. Washington, DC, Laboratory Soils Testing, 1970.