



## Seria errado usar outras variáveis além do índice de vazios e da densidade para cálculo de parâmetros de compressibilidade do solo?

**Paulo Ivonir Gubiani<sup>(1)</sup>; Rafael Ziani Goulart<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> Professor; Universidade Federal de Santa Maria; Santa Maria, RS; paulogubiani@gmail.com; <sup>(2)</sup> Professor; Instituto Federal Farroupilha – Campus Alegrete.

**RESUMO:** A pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e o índice de compressão ( $lc$ ) são parâmetros relacionados com a capacidade de suporte de carga e da suscetibilidade do solo à compactação, respectivamente. O objetivo deste estudo foi investigar as implicações do uso da deformação do solo ( $h_1$ ), da densidade do solo ( $\rho$ ), do índice de vazios ( $\varepsilon$ ) e da porosidade total ( $n$ ) para cálculo do  $\sigma_p$  e do  $lc$ . A  $\sigma_p$  e o  $lc$  foram determinados em 157 amostras de um Latossolo Vermelho. A  $\sigma_p$  é idêntica com o uso de  $\rho$  e de  $n$  ou com o uso de  $\varepsilon$  e de  $h_1$ . Diferentemente, não foi verificada nenhuma coincidência de valores de  $lc$ . A única relação exata foi a de que o  $lc$  calculado com  $\rho$  foi 2,72 vezes o  $lc$  calculado com  $n$ , sendo 2,72 o valor da densidade dos sólidos do solo. Sem a medida *in situ* da capacidade de carga do solo e de sua suscetibilidade à compactação, todos os valores de  $\sigma_p$  e de  $lc$ , bem como as variáveis usados no cálculo, podem ser válidos ou falhos, ou seja, nenhum está comprovadamente errado ou certo.

**Termos de indexação:** compressibilidade, compactação, capacidade de suporte de carga.

### INTRODUÇÃO

A curva de compressão (CC) é amplamente utilizada para estimativa da capacidade de suporte de carga e da suscetibilidade do solo à compactação, que são expressos pela pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e pelo índice de compressão ( $lc$ ), respectivamente (Keller et al., 2011). Pesquisadores têm usado a densidade do solo (Dias Junior & Pierce, 1995; Fritton, 2001; Assouline et al., 2002) ou o índice de vazios (Gregory et al., 2006, Cavalieri et al., 2008; Keller et al., 2011) para gerar a CC, o que provoca diferenças na  $\sigma_p$  e no  $lc$  (Mosaddeghi et al., 2003; Rücknagel et al., 2010). Isso sugere que a  $\sigma_p$  e  $lc$  são dependentes da variável usada para gerar a CC, o que merece ser estudado.

A densidade do solo ( $\rho$ , kg m<sup>-3</sup>) e dos sólidos do solo ( $\rho_s$ , kg m<sup>-3</sup>), índice de vazios ( $\varepsilon$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e porosidade total do solo ( $n$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) são expressas por:

$$\rho = \frac{M_s}{V_t} \quad (1)$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_s} \quad (3)$$

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (4)$$

em que  $M_s$  (kg) é a massa de sólidos,  $V_t$  (m<sup>3</sup>) é o volume do solo,  $V_v$  (m<sup>3</sup>) é o volume de vazios (poros) e  $V_s$  (m<sup>3</sup>) é o volume dos sólidos do solo. Para uma amostra de solo,  $\rho_s$  não varia se a amostra sofrer deformação. Diferentemente,  $\rho$ ,  $\varepsilon$  e  $n$  são alterados com a deformação da amostra.

Sendo  $H$  (m) a altura de um anel que contém solo e  $h_1$  (m) a deformação que o solo sofre ao receber carga, a altura resultante do solo,  $h_2$  (m) é dada por:

$$h_2 = H - h_1 \quad (5)$$

Embora  $h_2$  represente de forma mais sucinta a altura da amostra após sofrida a deformação  $h_1$ , a expressão  $H-h_1$  será utilizada, para explicitar a relação de  $\rho$ ,  $\varepsilon$  e  $n$  com  $h_1$ .

Em qualquer momento da compressão, o volume do solo,  $V_t$ , é dado por:

$$V_t = \pi r^2 (H - h_1) \quad (6)$$

e o volume dos sólidos de solo,  $V_s$ , que se mantém constante, a partir da equação (2) é expresso por:

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_s} \quad (7)$$

O volume de vazios,  $V_v$ , substituindo os termos que o definem pelas equações (6) e (7), é expresso por:

$$V_v = V_t - V_s = \pi r^2 (H - h_1) - \frac{M_s}{\rho_s} \quad (8)$$

Substituindo (6) em (1) se obtém a densidade do solo  $\rho$ :

$$\rho = \frac{M_s}{\pi r^2 (H - h_1)} \quad (9)$$



Substituindo (7) e (8) em (3) se obtém o índice de vazios,  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\pi r^2 \rho_s (H - h_1)}{M_s} - 1 \quad (10)$$

Por fim, substituindo (8) e (6) em (4) se obtém a porosidade total  $n$ :

$$n = 1 - \frac{M_s}{\rho_s \pi r^2 (H - h_1)} \quad (11)$$

As equações (9) (10) e (11) permitem calcular  $\rho$ ,  $\varepsilon$  e  $n$  em função de uma única variável,  $h_1$ , pois os demais termos são constantes.

No ensaio de compressibilidade, a amostra de solo sofre sucessivas cargas  $\sigma$  que vão sucessivamente aumentando  $h_1$ . Consequentemente,  $h_1$  é dependente de  $\sigma$ , mas sem haver uma função analítica  $h_1(\sigma)$  que determine a relação entre eles. Semelhantemente,  $\rho$ ,  $\varepsilon$  e  $n$ , por serem funções de  $h_1$ , também são dependentes de  $\sigma$ . Portanto,  $h_1$ ,  $\rho$ ,  $\varepsilon$  e  $n$  podem ser usados como variáveis relacionadas com o arranjo de partículas do solo provocado por  $\sigma$ . Tendo em vista que a CC representa a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e alguma variável relacionada com o arranjo de partículas (Dias Junior & Pierce, 1996), então a CC pode ser representada pela relação do logaritmo da pressão aplicada com  $h_1$  ( $CC_{h_1}$ ),  $\rho$  ( $CC_\rho$ ),  $\varepsilon$  ( $CC_\varepsilon$ ) ou  $n$  ( $CC_n$ ).

Uma questão pertinente, e que constitui o objetivo deste estudo, é investigar quais as implicações na  $\sigma_p$  e no  $l_c$  obtidos com  $CC_{h_1}$  ( $\sigma_{p_{h_1}}$  e  $l_{c_{h_1}}$ ),  $CC_\rho$  ( $\sigma_{p_\rho}$  e  $l_{c_\rho}$ ),  $CC_\varepsilon$  ( $\sigma_{p_\varepsilon}$  e  $l_{c_\varepsilon}$ ) e  $CC_n$  ( $\sigma_{p_n}$  e  $l_{c_n}$ ) e se seria errado usar curvas  $CC_{h_1}$  e  $CC_n$  ao invés de curvas  $CC_\rho$ ,  $CC_\varepsilon$ . Essas questões só podem ser investigadas experimentalmente, pois  $\sigma_p$  e  $l_c$  não são funções analíticas conhecidas de  $h_1$ ,  $\rho$ ,  $\varepsilon$  e  $n$ .

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado utilizando 157 amostras com estrutura preservada (anéis de aço inoxidável de 0,061 m de diâmetro e 0,03 m de altura), coletadas nas profundidades de 0,07 e 0,25 m em um Latossolo Vermelho cultivado em plantio direto. A quantidade média de areia, silte e argila nos pontos amostrados foi, respectivamente de, 0,10, 0,25 e 0,65 kg kg<sup>-1</sup>. Previamente ao ensaio de compressão, as amostras foram saturadas com água por capilaridade, drenadas nas tensões de 10 kPa em coluna de areia (Reinert & Reichert, 2006), 33, 100, 500 e 1500 kPa em câmara de Richards (Klute, 1986).

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado

em um consolidômetro, modelo S-450 Terraload (Durham Geo-Interprises). Foram aplicadas cargas sucessivas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa e medidas as sucessivas deformações  $h_1$ . Cada carga foi mantida durante cinco minutos, período suficiente para atingir 99% da deformação máxima (Silva et al., 2000). Ao final do ensaio, as amostras foram secas em estufa a 105 °C até atingirem peso constante. Em cada carga as variáveis  $\rho$ ,  $\varepsilon$  e  $n$  foram calculadas, respectivamente com as equações (9) (10) e (11). A média, seguida pelo desvio padrão, da  $\rho_s$  foi de 2,72 g cm<sup>-3</sup> ( $\pm 0,065$  g cm<sup>-3</sup>).

A  $\sigma_p$  e o  $l_c$  foram calculados com o procedimento de Dias Junior & Pierce (1995), originalmente descrito com o uso da  $\rho$ , mas já aplicado com o uso do  $\varepsilon$  (Cavaliere et al., 2008). Resumidamente, a  $\sigma_p$  correspondeu ao valor de carga na intersecção da reta de compressão secundária (traçada com os dois pares de dados iniciais) com a reta de compressão virgem (traçada com os dois pares de dados finais). Por fim, o  $l_c$  foi definido como o módulo do coeficiente angular da reta de compressão virgem. Mais detalhes do procedimento estão descritos em Dias Junior & Pierce (1995).

A  $\sigma_p$  e o  $l_c$  obtidos com os diferentes parâmetros foram comparados graficamente e por análise de regressão.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A representação gráfica dos resultados ilustra que a  $\sigma_{p_\rho}$  é idêntica à  $\sigma_{p_n}$  e que a  $\sigma_{p_\varepsilon}$  é idêntica à  $\sigma_{p_{h_1}}$  (**Figura 1a**). Porém,  $\sigma_{p_\rho}$  e  $\sigma_{p_n}$  são ambas diferentes e maiores de  $\sigma_{p_\varepsilon}$  e de  $\sigma_{p_{h_1}}$  (**Figura 1b**). Isso indica que curvas  $CC_\rho$  podem ser substituídas por curvas  $CC_n$ , e curvas  $CC_\varepsilon$  podem ser substituídas por curvas  $CC_{h_1}$ , sem haver diferenças na  $\sigma_p$ . Diferentemente, a substituição de curvas  $CC_\rho$  ou curvas  $CC_n$  por curvas  $CC_\varepsilon$  ou curvas  $CC_{h_1}$  implicará diferenças na  $\sigma_p$ . Portanto, se curvas  $CC_\rho$  e curvas  $CC_\varepsilon$  são consideradas válidas para o cálculo de  $\sigma_p$ , então curvas  $CC_n$  e curvas  $CC_{h_1}$ , são igualmente válidas.

Em relação ao  $l_c$ , não foi verificada nenhuma coincidência de valores de  $l_c$  entre duas curvas quaisquer (**Figura 1c,d,e,f,g,h**). A única relação exata ( $y = 2,72 x$ ) foi a de que o  $l_{c_\rho}$  é 2,72 vezes o  $l_{c_n}$ , ou seja,  $l_{c_\rho} = \rho_s l_{c_n}$ , pois a  $\rho_s$  usada foi igual a 2,72 g cm<sup>-3</sup> (**Figura 1c**). Isso indica que a suscetibilidade do solo a compactação pode ser erroneamente interpretada se a análise dos valores



de  $lc$  não levar em conta a unidade da variável usada no cálculo. Neste estudo, seria errado afirmar que o solo é 2,72 vezes mais suscetível à compactação ao se comparar os valores de  $lc_p$  com os valores de  $lc_n$ . O que se pode afirmar apenas é a que a variação na  $\rho$  foi 2,72 vezes a variação que ocorre em  $n$ . O mesmo cuidado deve ser tomado ao se comparar qualquer duas relações de  $lc$  calculado com variáveis diferentes. Também se nota que  $lc_p$  e  $lc_\varepsilon$  são diferentes (**Figura 1d**). Mesmo assim, as curvas  $CC_p$  e  $CC_\varepsilon$  são consideradas válidas para o cálculo de  $lc$ . Então, por analogia, curvas  $CC_n$  e curvas  $CC_{n1}$  são igualmente válidas.

Com base nas análises deste estudo verifica-se que o  $lc$  depende bem mais que a  $\sigma p$  da variável usada para descrever a deformação do solo na  $CC$ . Consequentemente, a comparação de  $\sigma p$  e  $lc$  (Cavaliere et al., 2008; Gregory et al., 2006; Keller et al., 2011) e de modelos que descrevem a  $CC$  (Dias Junior & Pierce, 1995; Fritton, 2001; Assouline et al., 2002; Gregory et al., 2006, Cavaliere et al., 2008; Keller et al., 2011) está sujeita a erros decorrentes das diferenças provocadas pela escolha da variável usada na  $CC$ . Consequentemente, a estimativa da capacidade de suporte de carga e suscetibilidade do solo à compactação por meio da  $\sigma p$  e do  $lc$  pode conter erros dessa natureza.

## CONCLUSÕES

As pressões de preconsolidação calculadas com a densidade e com a porosidade total foram idênticas. Também foram idênticas as calculadas com o índice de vazios e com a deformação. Portanto, se é aceito o uso da densidade e do índice de vazios para o cálculo da pressão de preconsolidação, então o uso da porosidade e da deformação pode ser igualmente aceito.

No segmento de reta virgem pode ser calculada a taxa de alteração de qualquer variável sensível à deformação da amostra de solo e não somente do índice de vazios ou da densidade. Portanto, a porosidade e a deformação também podem ser usadas para cálculo do índice de compressão.

Enquanto não se medir *in situ* a capacidade de carga do solo e sua suscetibilidade à compactação, todos os valores de pressão de preconsolidação e de índice de compressão, bem como os variáveis usadas no cálculo, podem ser válidos ou falhos, ou seja, nenhum está comprovadamente errado ou certo.

## REFERÊNCIAS

ASSOULINE, S. Modeling soil compaction under uniaxial compression. Soil Science Society of America Journal, 66:1784-1787, 2002.

CAVALIERI, K.M.V. et al. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. Soil and Tillage Research, 98:17-26, 2008.

DIAS JUNIOR, M.S; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. Soil Technology, 8:139-151, 1995.

FRITTON, D.D. An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses. Soil Science Society of America Journal, 65:678-684, 2001.

GREGORY, A.S. et al. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. Soil and Tillage Research, 89:45-57, 2006.

KELLER, T. et al. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. Geoderma, 163:13-23, 2011.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-662.

MOSADDEGHI, M.R. et al. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. Soil and Tillage Research, 70:53-64, 2003.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. Ciência Rural, Santa Maria, 36:1931-1935, 2006.

RUCKNAGEL, J. et al. Variance of mechanical precompression stress in graphic estimations using the Casagrande method and derived mathematical models. Soil & Tillage Research, 106:165-170, 2010.

SILVA, V. R. et al. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 4:239-249, 2000.

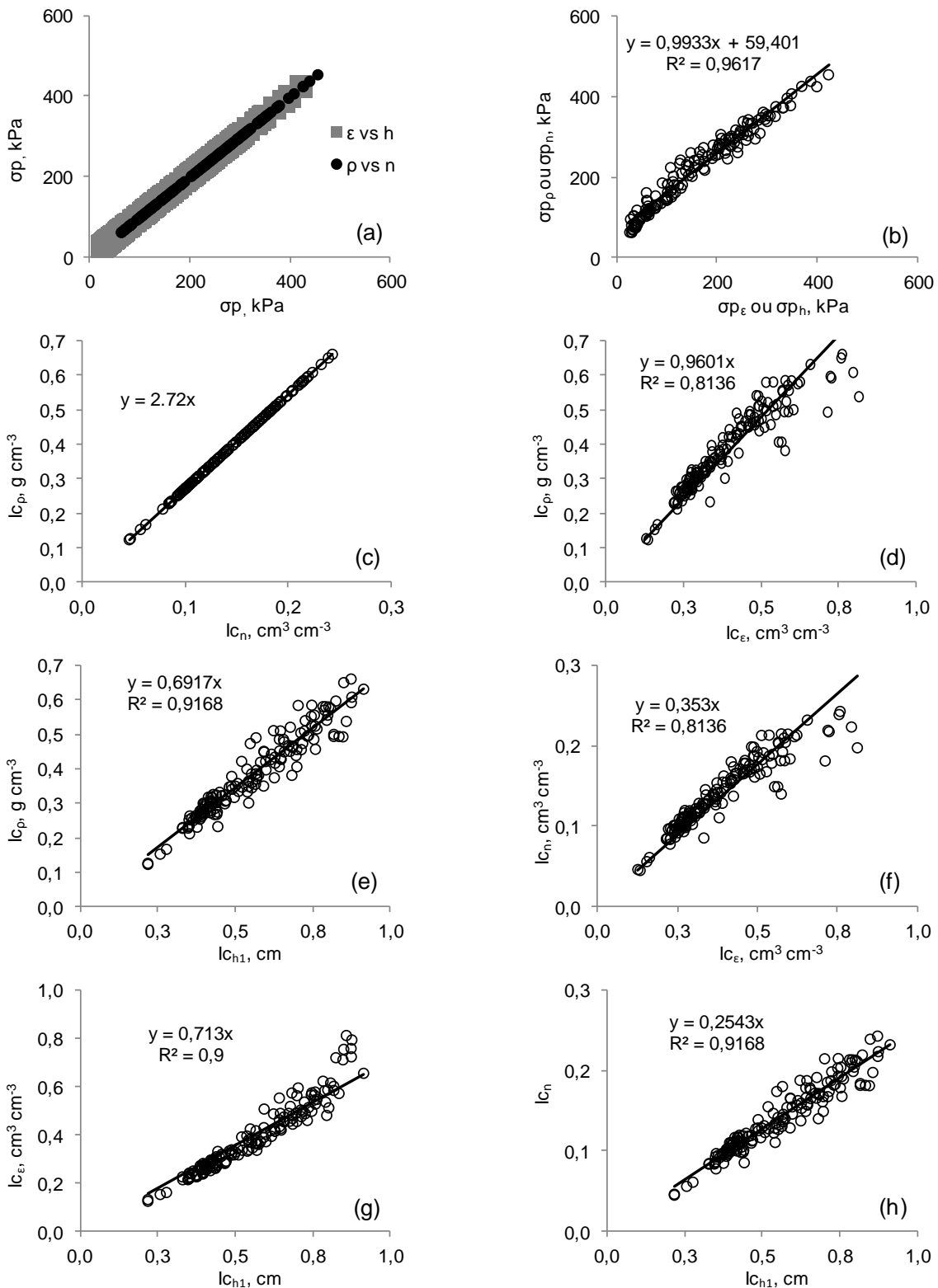


Figura 1. Pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e índice de compressão calculados com densidade do solo ( $\rho$ ), índice de vazios ( $\epsilon$ ), porosidade total do solo ( $n$ ) e deformação ( $h_1$ ).