



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

Paulo Ivonir Gubiani⁽¹⁾; Rafael Ziani Goulart⁽²⁾

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

RESUMO: A pressão de preconsolidação (σ_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 (ρ), do índice de vazios (ε) e da porosidade total (n) para cálculo do σ_p e do lc . A σ_p e o lc foram determinados em 157 amostras de um Latossolo Vermelho. A σ_p é idêntica com o uso de ρ e de n ou com o uso de ε 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 ρ 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 σ_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 (σ_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 σ_p e no lc (Mosaddeghi et al., 2003; Rücknagel et al., 2010). Isso sugere que a σ_p e lc são dependentes da variável usada para gerar a CC, o que merece ser estudado.

A densidade do solo (ρ , kg m⁻³) e dos sólidos do solo (ρ_s , kg m⁻³), índice de vazios (ε , m³ m⁻³) e porosidade total do solo (n , m³ m⁻³) 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 (m³) é o volume do solo, V_v (m³) é o volume de vazios (poros) e V_s (m³) é o volume dos sólidos do solo. Para uma amostra de solo, ρ_s não varia se a amostra sofrer deformação. Diferentemente, ρ , ε 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 ρ , ε 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 ρ :

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



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

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

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 ρ , ε 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 σ que vão sucessivamente aumentando h_1 . Consequentemente, h_1 é dependente de σ , mas sem haver uma função analítica $h_1(\sigma)$ que determine a relação entre eles. Semelhantemente, ρ , ε e n , por serem funções de h_1 , também são dependentes de σ . Portanto, h_1 , ρ , ε e n podem ser usados como variáveis relacionadas com o arranjo de partículas do solo provocado por σ . 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}), ρ (CC_ρ), ε (CC_ε) ou n (CC_n).

Uma questão pertinente, e que constitui o objetivo deste estudo, é investigar quais as implicações na σ_p e no l_c obtidos com CC_{h_1} ($\sigma_{p_{h_1}}$ e $l_{c_{h_1}}$), CC_ρ (σ_{p_ρ} e l_{c_ρ}), CC_ε (σ_{p_ε} e l_{c_ε}) e CC_n (σ_{p_n} e l_{c_n}) e se seria errado usar curvas CC_{h_1} e CC_n ao invés de curvas CC_ρ , CC_ε . Essas questões só podem ser investigadas experimentalmente, pois σ_p e l_c não são funções analíticas conhecidas de h_1 , ρ , ε 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⁻¹. 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 ρ , ε e n foram calculadas, respectivamente com as equações (9) (10) e (11). A média, seguida pelo desvio padrão, da ρ_s foi de 2,72 g cm⁻³ ($\pm 0,065$ g cm⁻³).

A σ_p e o l_c foram calculados com o procedimento de Dias Junior & Pierce (1995), originalmente descrito com o uso da ρ , mas já aplicado com o uso do ε (Cavaliere et al., 2008). Resumidamente, a σ_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 σ_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 σ_{p_ρ} é idêntica à σ_{p_n} e que a σ_{p_ε} é idêntica à $\sigma_{p_{h_1}}$ (**Figura 1a**). Porém, σ_{p_ρ} e σ_{p_n} são ambas diferentes e maiores de σ_{p_ε} e de $\sigma_{p_{h_1}}$ (**Figura 1b**). Isso indica que curvas CC_ρ podem ser substituídas por curvas CC_n , e curvas CC_ε podem ser substituídas por curvas CC_{h_1} , sem haver diferenças na σ_p . Diferentemente, a substituição de curvas CC_ρ ou curvas CC_n por curvas CC_ε ou curvas CC_{h_1} implicará diferenças na σ_p . Portanto, se curvas CC_ρ e curvas CC_ε são consideradas válidas para o cálculo de σ_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_ρ} é 2,72 vezes o l_{c_n} , ou seja, $l_{c_\rho} = \rho_s l_{c_n}$, pois a ρ_s usada foi igual a 2,72 g cm⁻³ (**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 ρ 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_ε são diferentes (**Figura 1d**). Mesmo assim, as curvas CC_p e CC_ε 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 σp da variável usada para descrever a deformação do solo na CC . Consequentemente, a comparação de σp 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 σp 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.

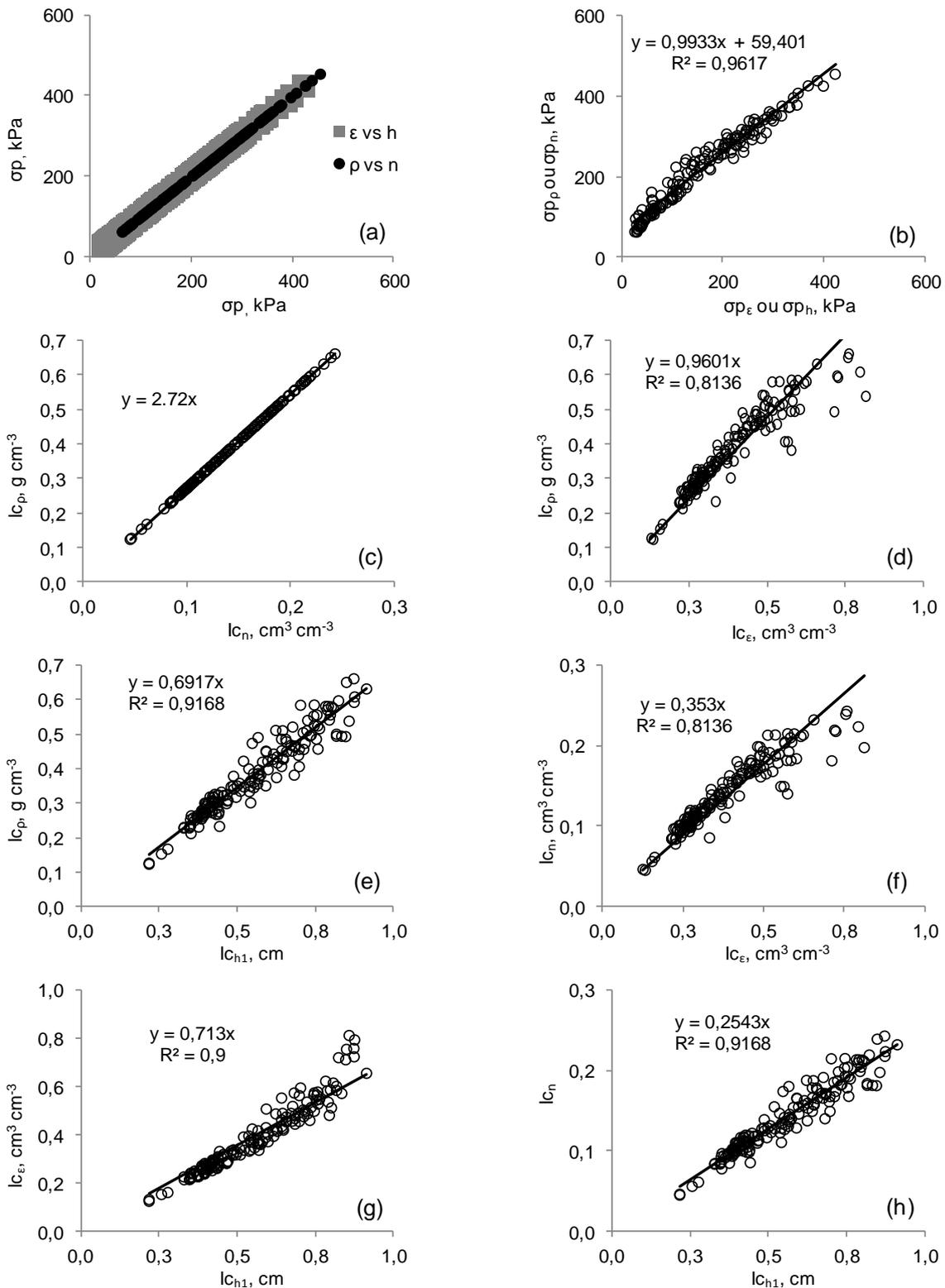


Figura 1. Pressão de preconsolidação (σ_p) e índice de compressão calculados com densidade do solo (ρ), índice de vazios (ϵ), porosidade total do solo (n) e deformação (h_1).