

COMPRESS – SOFTWARE E PROPOSTA DE MODELO PARA DESCREVER A COMPRESSIBILIDADE DOS SOLOS E SEUS PARÂMETROS

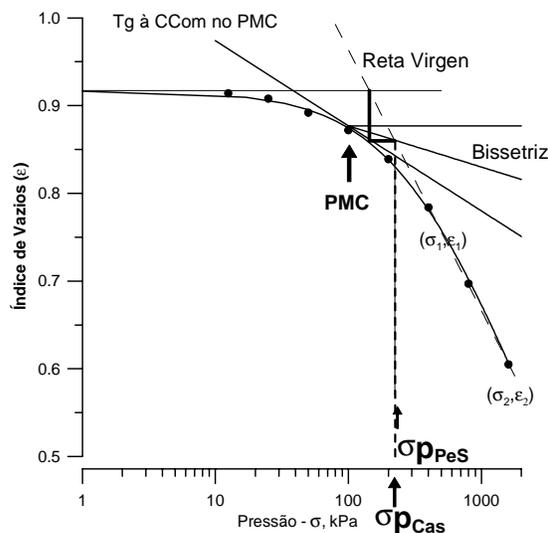
D. J. Reinert; A. D. Robaina; J. M. Reichert

Centro de Ciências Rurais, UFSM, 97105-900 Santa Maria, RS.

Financiado por CNPq, FAPERGS

A compactação do solo, quando atinge estados acima dos considerados críticos ao crescimento e desenvolvimento, para determinados solos e culturas, significativamente afeta a produtividade das lavouras e, conseqüentemente, a produtividade média regional, estadual ou nacional. É um fenômeno comum a todos os sistemas agrícolas que utilizam tração animal ou mecanizada e, para as mesmas condições iniciais, seus efeitos são tanto mais intensos quanto maior for a carga aplicada ao solo e quanto maior for o número de aplicações. A resposta do solo à aplicação de cargas é um fenômeno associado às características dos solos e das cargas aplicadas e refere-se a importante aspecto associado à compactação dos solos.

Quando submetidos a cargas, os solos tendem a aumentar sua densidade e reduzir sua porosidade e índice de vazios. O relacionamento entre o índice de vazios e o logaritmo da pressão efetiva aplicada ao solo, durante o processo de compressão, tem sido convencionalmente chamado de curva de compressão (Hillel, 1998; Holtz&Kolvac, 1981). Pela união dos pontos observados em testes laboratoriais tem-se a curva de compressibilidade -CCom (Figura 1) cujos parâmetros principais, de interesse para o estudo da capacidade suporte e da suscetibilidade à compactação dos solos, são: índice de recompressão, pressão de precompactação e índice de compressão. Estes parâmetros estão definidos pela ABNT (1990), onde são apresentados os métodos recomendados para suas determinações.



Índice de recompressão = Cr

$$Cr = -(\epsilon_{\sigma p} - \epsilon_i) / \log(\sigma p)$$

Pressão de precompactação = $\sigma_{PCas} = \sigma_{PeS}$

Exemplo: $\sigma_{PCas} = \sigma_{PeS} = 223 \text{ kPa}$

Cas = método de Casagrande

Pes = método de Pacheco e Silva

Índice de compressão = Cc

$$Cc = -(\epsilon_2 - \epsilon_1) / \log(\sigma_2 / \sigma_1)$$

PMC = ponto de máxima curvatura ou de mínimo raio de curvatura

Figura 1. Modelo de CCom e seus parâmetros

O modelo analítico que descreve a CCom tem sido proposto sem ter sido aceito universalmente. Originalmente foi proposto como o modelo que descreve a compressibilidade dos solos a relação da redução do volume com o logaritmo da pressão efetiva aplicada. Modelo logarítmico com dois parâmetros foi proposto por Bailey&Vanden Berg (1967):

$$\rho = [m \log(\sigma) + d]^{-1} \quad [1]$$

onde, ρ é a densidade do solo, σ a pressão aplicada e m e d coeficientes empíricos de ajuste não linear. Modelo multiplicativo com três parâmetros foi apresentado por Bailey et al. (1986):

$$\ln(\rho) = \ln(\rho_0)(a + b\sigma)(1 - e^{-c\sigma}) \quad [2]$$

onde, ρ_0 é a densidade do solo para pressão zero e a , b e c coeficientes empíricos de ajuste não linear. Modelo simples com dois parâmetros, sendo um de significado físico, foi proposto por Assouline et al. (1997):

$$\rho = \rho_0 + (\rho_{m\acute{a}x} - \rho_0)(1 - e^{-c\sigma}) \quad [3]$$

onde, $\rho_{m\acute{a}x}$ é a densidade máxima para determinada umidade inicial e c parâmetro empírico de ajuste não linear. Modelo de três parâmetros, análogo ao modelo intensamente usado para ajustar curvas de retenção de água (van Genuchten, 1980), foi proposto por Fritton (2001):

$$\rho = \rho_{m\acute{a}x} - (\rho_{m\acute{a}x} - \rho_0) \left\{ 1 + [\alpha(\sigma + 1)]^n \right\}^m \quad [4]$$

onde, $\rho_{m\acute{a}x}$ é assumida como sendo igual a densidade de partículas e α , n e m são parâmetros empíricos de ajuste não linear. Assouline (2002) incluiu um terceiro parâmetro na equação 3, o termo ω ($\omega > 0$), ampliando o uso desta equação:

$$\rho = \rho_0 + (\rho_{m\acute{a}x} - \rho_0)(1 - e^{(k\sigma)^\omega}) \quad [5]$$

Os modelos 2, 3, 4 e 5 tem mostrado bom ajuste a dados experimentais, porém a ABNT (1990) e o método proposto por Casagrande (Holtz&Kolvacs, 1981) apresentam estratégias gráficas de estimativa dos parâmetros de compressibilidade usando a relação entre o índice de vazios com o logaritmo da pressão aplicada.

Modelo proposto

Similarmente à estratégia usada por Fritton (2001), foi adotada a equação de van Genuchten (1980), substituindo-se os valores de umidade pelo índice de vazios (ε) e os valores de potenciais de água pelos valores de pressão aplicada σ , ficando:

$$\varepsilon = \varepsilon_f + (\varepsilon_i - \varepsilon_f) / (1 + \alpha \sigma^n)^m \quad [6]$$

onde os índices i e f de ε significam valor inicial e final. Assumindo a situação de contorno, onde na máxima compactação possível o $\varepsilon_f = 0$, a equação [6] se reduz a:

$$\varepsilon = \varepsilon_i / (1 + \alpha \sigma^n)^m \quad [7]$$

Software

O programa computacional foi desenvolvido em Visual Basic 6.0 com o objetivo de usar dados laboratoriais de testes de compressibilidade para: 1) calcular as relações básicas no início e final dos testes; 2) ajustar a equação [6] ou [7] aos dados, traçando a CCom na tela do computador; 3) determinar a pressão de precompactação, o índice de compressão e o índice de compressão primária pelo método de Casagrande e pelo método de Pacheco e Silva (ABNT, 1990) e 4) criar banco de dados com todos os dados e valores calculados.

A tela inicial apresenta os campos para a entrada dos dados de identificação da amostra e laboratoriais (Figura 2) necessários para o cálculo das relações básicas entre massa e volume do solo no início e no final do teste de compressibilidade.

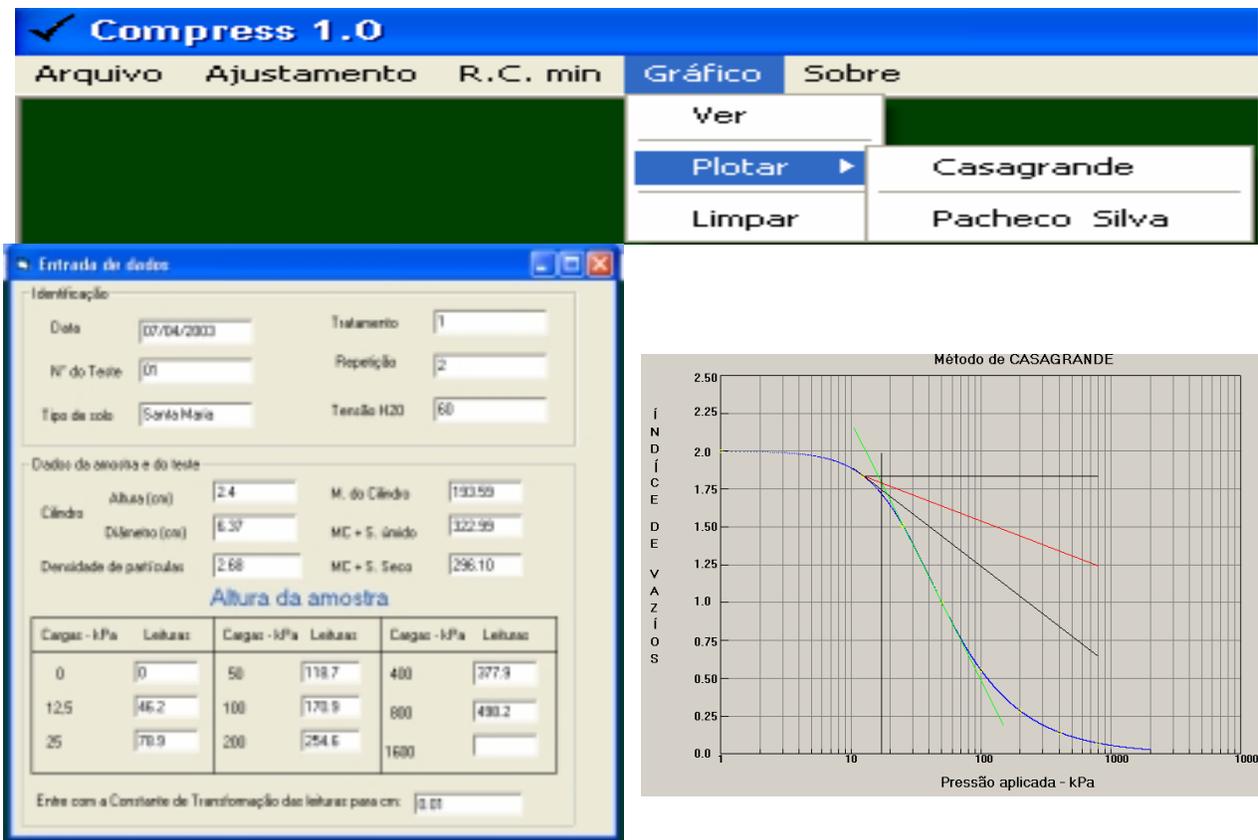


Figura 2. Barra principal do programa, tela de entrada dos dados e o traçado da CCom com as linhas do método de Casagrande para determinar a pressão de precompactação.

Com os valores do índice de vazios (ε), calculados pelo programa, em relação a cada uma das cargas aplicadas (σ), os parâmetros α , n e m da equação [6] ou [7] são estimados pelo método dos mínimos quadrados. Para a equação [6] é necessário o conhecimento ou estimativa do valormáximo de compactação que determinado teste atingiu, entrando com o valor da densidade do solo ou índice de vazios correspondente, o que definirá a parte inferior do formato do “S” do modelo para valores reais. Conhecidos os valores de α , n e m , pode-se estimar os valores ε para cada σ e a curva $\varepsilon = f(\sigma)$, denominada de CCom, é traçada na tela, onde pode-se visualizar os valores do índice de vazios estimados e os experimentais.

Segundo Granville et al. (1961), o raio de curvatura R num ponto qualquer da curva $\varepsilon = f(\sigma)$, pode ser determinado por

$$R = \frac{[1 + (d\varepsilon / d\sigma)^2]^{3/2}}{d^2\varepsilon / d\sigma^2} \quad [8]$$

na qual $d\varepsilon / d\sigma$ é a primeira deriva e $d^2\varepsilon / d\sigma^2$ é segunda derivada da curva $\varepsilon = f(\sigma)$, respectivamente.

O ponto de máxima curvatura (PMC) no qual o raio de curvatura R é mínimo, necessário para o cálculo da σ_p (pressão de precompactação) pelo método de Casagrande, é obtido a partir da expressão $dR / d\sigma = 0$, sujeita a condição $d^2R / d\sigma^2 > 0$, sendo $\varepsilon = f(\sigma)$, modelado pela equação [6] ou [7].

A parte retilínea da CCom, conhecida como curva virgem, pode ser definida a escolha do usuário, seguindo um dos três critérios: 1) ajustar a equação da reta aos pontos observados que

tenha pressão aplicada (x) maior que a pressão (x) correspondente ao PMC; 2) algoritmo pesquisa pelo maior raio de curvatura, parte mais retilínea, após o PMC, usa sua declividade e traça a reta por esse ponto e; 3) ajustar a equação da reta que satisfaça o seguinte – a) passe pelo ponto que tenha a abcissa igual a média geométrica das pressões do PMC até a máxima pressão e sua correspondente ordenada e; b) tenha a declividade igual à do ponto especificado anteriormente.

Com o PMC conhecido e a curva virgem definida o algoritmo segue metodologia descrita na ABNT (1990) e determina a pressão de precompactação, índice de compressão e índice de recompressão pelo método de Casagrande (Figura 1 e 2) e Pacheco e Silva, bem como, traça na CCom as linhas usadas no cálculo.

Como última etapa, o programa cria arquivo com os dados de identificação das amostras, com todos os resultados calculados a partir dos testes laboratoriais, com os coeficientes do ajuste da equação escolhida e com os parâmetros da CCom, sendo que, os dados básicos iniciais e finais se repetem com todas linhas relativo a determinado teste para que inspeção de associação possa ser feita, bem como, gerar figuras ou análise de dados em outros *softwares* mais específicos.

A equação e o software se ajustam perfeitamente ao tipo de uso proposto. Podemos verificar visualmente o excelente ajuste do modelo aos dados observados, bem como, a concordância visual da determinação dos valores de pressão de precompactação e da parte retilínea da Ccom com a grande vantagem de retirar o efeito do operador (identificação visual do PMC) na determinação da pressão de precompactação pelo método de Casagrande.

OBSERVAÇÃO: A geração deste *software* tem objetivo didático, porém pode ser usado em rotinas de laboratórios e é de domínio público. Cópia pode ser obtida diretamente em http://w3.ufsm.br/fisica_e_genese ou solicitada por mensagem eletrônica para dalvan@ccr.ufsm.br

Literatura Citada

- ABNT. Ensaio de adensamento unidimensional - NBR 12007. Rio de Janeiro, ABNT, 1990. 13p.
- Assouline, S.;Tavares-Filho, J. & Tessier, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 61:390-398, 1997.
- Assouline, S. Modeling soil compaction under uniaxial compression. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 66:1784-1787, 2002.
- Bailey, A.C. & Vanden Berg, G.E. Yielding by compaction and shear in unsaturated soils. *Tran. ASAE*, 11:307-311, 1967.
- Bailey, A.C.;Johnson, C.E. & Schafer, R.L. A model for agricultural soil compaction. *J. Agric. Eng. Res.*, 33:257-262, 1986.
- Fritton, D.D. An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 65:678-684, 2001.
- Granville, W.A.;Smith, P.F. & Longley, W.R. Elementos de cálculo diferencial e integral. Rio de Janeiro, Ed. Científica, 1961. 702p.
- Hillel, D. Soil dynamics: stress, strain, and strength. New York, Academic Press, 1998. 771 p.
- Holtz, R.D. & Kolvacs, W.D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice Hall, 1981. 733p.
- van Genuchten, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 41:892-898, 1980.