

MÉTODO ALTERNATIVO DE AVALIAÇÃO DA PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO POR MEIO DE UM PENETRÔMETRO⁽¹⁾

M. S. DIAS JUNIOR⁽²⁾, A. R. SILVA⁽³⁾, S. FONSECA⁽⁴⁾ & F. P. LEITE⁽⁵⁾

RESUMO

A curva de compressão do solo tem sido freqüentemente utilizada em estudos de compactação do solo. Essa curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou o índice de vazios. A pressão de preconsolidação divide essa curva em uma região de deformações recuperáveis e em uma de deformações não-recuperáveis. Por esse motivo, a pressão de preconsolidação tem sido usada como uma estimativa da capacidade de suporte de carga dos solos parcialmente saturados. A pressão de preconsolidação é obtida em laboratório por meio do ensaio de compressão uniaxial, o qual requer aparelhos sofisticados para a sua realização. Além do tempo gasto na realização do ensaio, há necessidade de usar um método gráfico ou de planilhas para a sua determinação. Uma maneira alternativa que visa minimizar este problema seria a calibração da pressão de preconsolidação com outras medidas de fácil e rápida obtenção. O objetivo deste trabalho foi propor um método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. Para isso, foram determinadas as pressões de preconsolidação e as resistências à penetração, no laboratório, na camada superficial de um Argissolo Amarelo (PA) e de um Plintossolo (FX) localizados na região de Aracruz, ES. Testes de campo foram efetuados em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) localizado em Belo Oriente, MG. Os valores dos coeficientes de determinação foram significativos e variaram de 0,88 a 0,99. As equações que relacionam a pressão de preconsolidação (σ_p) com a resistência à penetração (RP) foram da forma: $\sigma_p = a + b$ (RP). Pela equação, as pressões de preconsolidação serão estimadas em função da resistência à penetração e poderão ser utilizadas na identificação da compactação do solo e como uma ferramenta auxiliar de decisão sobre a realização ou não de determinada operação mecanizada.

Termos de indexação: compactação do solo, resistência à penetração, pressão de preconsolidação, modelagem.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em outubro de 2000 e aprovado em agosto de 2004.

⁽²⁾ Professor Adjunto do Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras. Caixa Postal 37, CEP 372000-000 Lavras (MG). Bolsista do CNPq. E-mail: msouzadj@ufla.br

⁽³⁾ Aluno de Iniciação Científica. Bolsista do CNPq.

⁽⁴⁾ Engenheiro Florestal, Aracruz Celulose S.A. Caixa Postal 331011, CEP 29197-000 Aracruz (ES). E-mail: sf@aracruz.com.br

⁽⁵⁾ Engenheiro-Agrônomo, Celulose Nipo-Brasileira S.A. Caixa Postal 100, CEP 35160-970 Ipatinga (MG). E-mail: fernandoleite@cenibra.com.br

SUMMARY: *ALTERNATIVE METHOD FOR THE EVALUATION OF THE PRECONSOLIDATION PRESSURE THROUGH A PENETROMETER*

Soil compression curves are frequently used in compaction studies. These curves describe the relationship between the logarithm of applied pressure and the soil bulk density or void ratio. The preconsolidation pressure divides the soil compression curves into a region of recoverable and a region of unrecoverable deformations. Consequently, the preconsolidation pressure has been used as an estimate of soil load support capacity of partially saturated soils. The preconsolidation pressure is laboratory-obtained through the uniaxial compression test which requires sophisticated equipment. Besides the time spent on the test realization, it is necessary to use a graphic method or spreadsheet procedure for its determination. An alternative way to minimize this problem would be the calibration of the preconsolidation pressure by other ways of easy and fast achievement. Thus, the objective of this study was to propose an alternative evaluation method of the preconsolidation pressure by a penetrometer. For this purpose, the preconsolidation pressures and penetration resistance in the superficial layer of a Yellow Argisol (PA) and Plinthosol (FX) from Aracruz (ES), Brazil, were determined in the laboratory. Field tests were carried out with an Oxisol (LV) located in Belo Oriente (MG). The coefficients of determination were significant and varied from 0.88 to 0.99. The equations that relate the preconsolidation pressure (σ_p) with the penetration resistance (RP) were of the form: $\sigma_p = a + b (RP)$. This equation permits the estimation of the preconsolidation pressure as a function of the penetrometer resistance, which may be used in the identification of the soil compaction and as a tool to come to a decision about realizing a particular mechanized operation or not.

Index terms: Soil compaction, penetration resistance, preconsolidation pressure, modeling.

INTRODUÇÃO

Recentes pesquisas na área de compactação do solo têm dado ênfase ao desenvolvimento de modelos matemáticos para a previsão da compactação dos solos (Dias Junior, 1994; Dias Junior & Pierce, 1996; Kondo & Dias Junior, 1999, Gysi, 2001; Canillas & Salokhe, 2002; Defosse & Richard, 2002). Um dos enfoques dessa modelagem tem considerado a pressão de preconsolidação do solo como sendo a propriedade que expressa a capacidade de suporte de carga dos solos parcialmente saturados (Kondo & Dias Junior, 1999; Dias Junior et al., 1999).

A pressão de preconsolidação é obtida em laboratório por meio das curvas de compressão do solo (Vargas, 1977; Holtz & Kovacs, 1981, Kondo & Dias Junior, 1999), as quais são obtidas pelo ensaio de compressão uniaxial, o qual requer equipamentos sofisticados para a sua realização. Além do tempo gasto nesses ensaios, há necessidade de adotar métodos, tais como os propostos por Casagrande (1936), Burmister (1951), Schmertmann (1955), Sällfors (1975), Anderson & Lukas (1981), Culley & Larson (1987), José et al. (1989), Lebert & Horn (1991), Dias Junior & Pierce (1995), para a sua determinação.

Apesar de estar o método para a determinação da pressão de preconsolidação difundido (Vargas, 1977; Holtz & Kovacs, 1981; Bowles, 1986), são

necessários outros métodos alternativos que possam ser utilizados no campo. Uma alternativa para a sua determinação seria a calibração de seus valores com outras medidas de fácil e rápida obtenção no campo.

O objetivo deste trabalho foi propor um método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo, foram utilizados um Argissolo Amarelo (PA) e um Plintossolo (FX), localizados em áreas experimentais da região de Aracruz, ES. Para realizar os ensaios de compressão uniaxial, foram coletadas aleatoriamente na área sob eucalipto 27 amostras indeformadas na profundidade de 0–0,03 m (superfície do horizonte A) e de 0,35–0,38 m (topo do horizonte B), totalizando 54 amostras para cada classe de solo. Estas amostras foram usadas no ensaio de compressão uniaxial (Bowles, 1986; Dias Junior, 1994, Kondo & Dias Junior, 1999). No restante destas amostras, determinaram-se a textura (Day, 1986) e matéria orgânica (Raij & Quaggio, 1983) (Quadro 1). A área em estudo já havia sido plantada por dois ciclos, e as amostragens aconteceram ao final do terceiro ciclo, sendo a idade do povoamento de nove anos.

Para obter os modelos $\sigma_p = f(U)$, os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em amostras com diferentes umidades, as quais foram, inicialmente, saturadas e, a seguir, secas ao ar no laboratório até se obter a umidade variando de 0,05 a 0,35 kg kg^{-1} . Obtidas essas umidades, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, usando-se um consolidômetro da marca Boart Longyear. As pressões aplicadas a cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa. Cada pressão foi aplicada até que 90 % da deformação máxima fosse alcançada (Taylor, 1948), quando, então, foi aplicada uma nova pressão. Após o ensaio, as σ_p foram obtidas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995), usando as curvas de compressão do solo. A seguir, as σ_p foram plotadas em função das umidades.

Próximo ao local de coleta das primeiras amostras, em ambos os solos e profundidades, foram coletadas mais 12 amostras indeformadas, nas quais se procedeu, em laboratório, à determinação da resistência à penetração (RP) em função da umidade. Nestas determinações, utilizou-se um penetrômetro de bolso da marca SOILTEST Inc., modelo CL-700, com capacidade de leitura até 500 kPa.

As curvas de regressão entre σ_p e U e entre RP e U foram ajustadas, utilizando-se o software Sigma Plot 4.0 (Jandel Scientific), enquanto a comparação das regressões foi feita segundo procedimento descrito por Snedecor & Cochran (1989).

Para avaliar a aplicação da equação $\sigma_p = f(RP)$ na identificação da compactação do solo, as pressões de preconsolidação de um Latossolo Vermelho-Amarelo, na profundidade de 0,10–0,125 m, foram obtidas pela equação $\sigma_p = 10^{(2,71-1,26 U)}$, $R^2 = 0,92^{**}$, e as resistências à penetração pela equação $RP = 10^{(3,13-2,43 U)}$, $R^2 = 0,88^{**}$, para mesmos valores de umidade, o que permitiu a obtenção da equação $\sigma_p = 99,39 + 0,39 RP$, $R^2 = 0,99^{**}$, conforme Dias Junior (2002). No campo, foram tomadas aleatoriamente seis determinações da resistência à penetração, em seis locais onde não houve tráfego de máquinas e em seis linhas de tráfego. Com a média das seis repetições, estimou-se a pressão de

preconsolidação por meio da equação $\sigma_p = 99,39 + 0,39 RP$ a qual foi utilizada para identificar a compactação do solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras 1 e 2 apresentam os modelos de sustentabilidade da estrutura para o PA e para o FX, respectivamente, para as profundidades de 0–0,03 e de 0,35–0,38 m. Estes modelos foram usados para obter as pressões de preconsolidação que foram plotadas em função da resistência à penetração obtida com o penetrômetro (Figura 5).

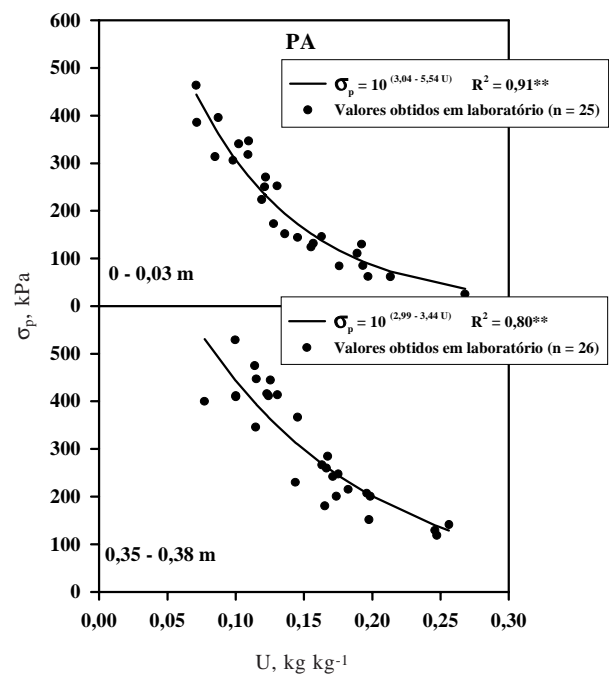


Figura 1. Modelos de sustentabilidade da estrutura para o PA, nas profundidades de 0–0,03 e de 0,35–0,38 m.

Quadro 1. Análises de caracterização física e de matéria orgânica (MO) de um Argissolo Amarelo (PA) e de um Plintossolo (FX), localizados em áreas experimentais da região de Aracruz, ES

Classe de solo	Profundidade	Argila	Silte	Areia	MO
	m				
PA ⁽¹⁾	0–0,03	190 ⁽³⁾	87	723	14,0
PA	0,35–0,38	240	111	649	5,5
FX	0–0,03	130	75	795	31,2
FX	0,35–0,38	200	99	701	9,8

⁽¹⁾ PA = Argissolo Amarelo, FX = Plintossolo. ⁽³⁾ Média de três repetições.

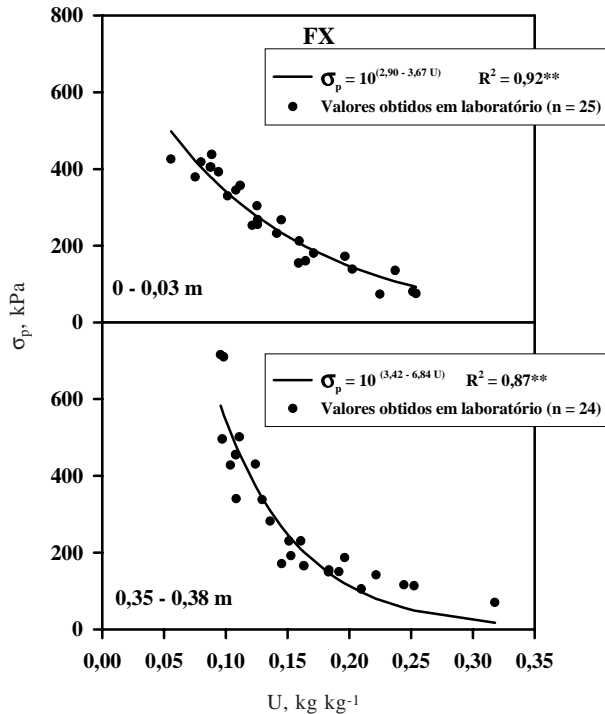


Figura 2. Modelos de sustentabilidade da estrutura para o FX, nas profundidades de 0-0,03 e de 0,35-0,38 m.

Os coeficientes de determinação das equações foram todos significativos e variaram de 0,80 a 0,87 (Figura 3). As equações para as profundidades de 0-0,03 e 0,35-0,38 m, em ambos os solos, foram estatisticamente diferentes, quando comparadas entre si, utilizando-se o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989). O mesmo ocorreu quando se compararam as equações para a profundidade de 0,35-0,38 m para as duas classes de solo. Entretanto, as equações para a profundidade de 0-0,03 m do PA e do FX não foram estatisticamente diferentes, o que resultou na obtenção de uma única regressão para esta condição (Figura 4). Estas equações foram usadas para a obtenção da resistência à penetração que foram plotadas versus a pressão de preconsolidação (Figura 5).

A figura 5 apresenta as pressões de preconsolidação obtidas das equações apresentadas nas figuras 1 e 2 plotadas em função da resistência à penetração obtida das equações apresentadas na figura 4.

As equações que relacionam a pressão de preconsolidação (σ_p) com a resistência à penetração (RP) foram da forma: $\sigma_p = a + b (RP)$ (Figura 5), concordando com os resultados obtidos por Dias Junior (1994). Estas equações foram todas estatisticamente diferentes pelo procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989). Portanto, o PA e o FX nas profundidades estudadas apresentaram equações distintas para estimar a pressão de preconsolidação em função da resistência à penetração.

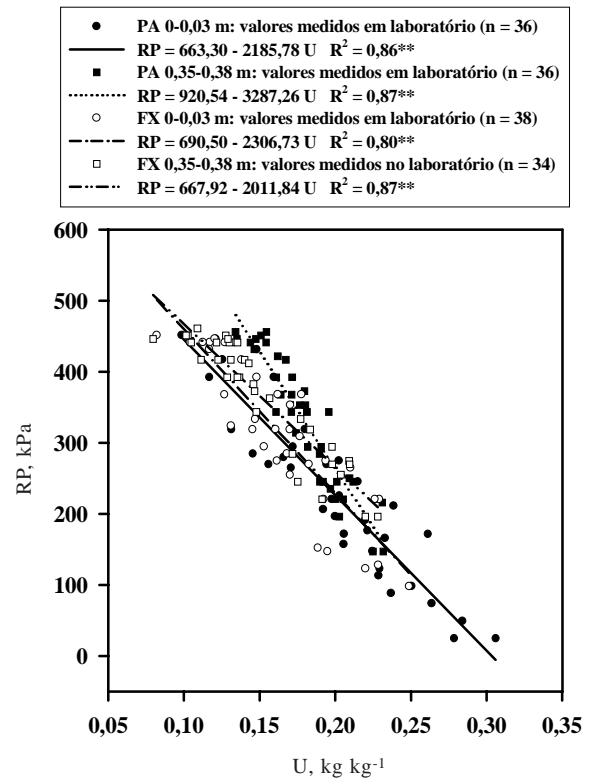


Figura 3. Resistência à penetração obtida com o penetrômetro no laboratório em função da umidade para o PA e para o FX, nas profundidades de 0-0,03 e de 0,35-0,38 m.

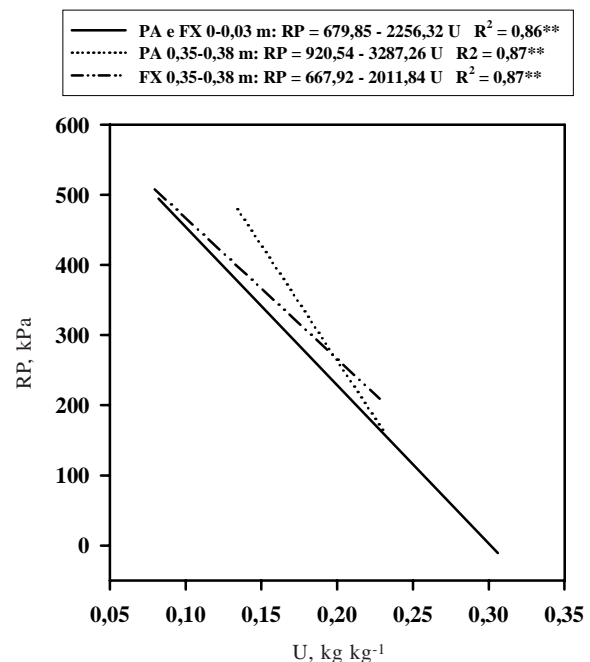


Figura 4. Resistência à penetração obtida com o penetrômetro no laboratório em função da umidade para o PA e para o FX, nas profundidades de 0-0,03 e de 0,35-0,38 m.

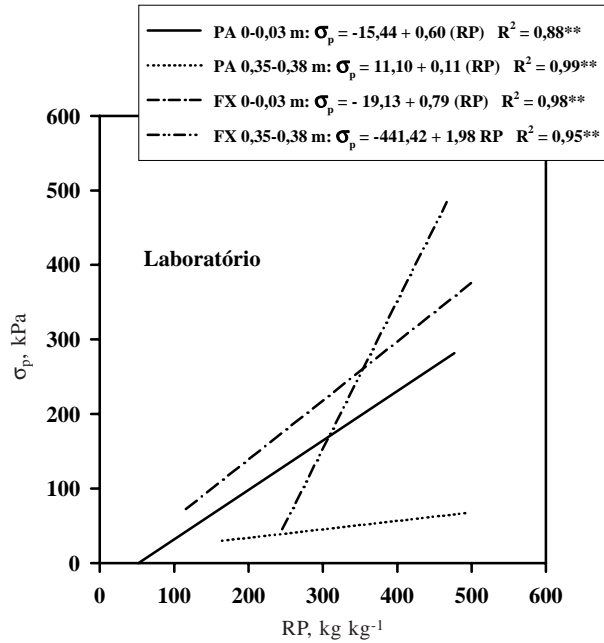


Figura 5. Pressão de preconsolidação em função da resistência à penetração para o PA e para o FX, nas profundidades de 0-0,03 e de 0,35-0,38 m.

Por ser a resistência à penetração uma medida de fácil determinação no campo, o uso destas equações representará não só uma simplificação do método, mas também uma economia de tempo na determinação da pressão de preconsolidação e, portanto, da capacidade de suporte de carga do solo no campo, a qual poderá ser usada como um critério auxiliar de decisão sobre o uso ou não das operações mecanizadas.

Para avaliar a aplicação da equação $\sigma_p = f(RP)$ na identificação da compactação do solo, as pressões de preconsolidação de um Latossolo Vermelho-Amarelo, na profundidade de 0,10-0,125 m foram estimadas por meio da equação $\sigma_p = 99,39 + 0,39 RP$, $R^2 = 0,99^{**}$, conforme Dias Junior (2002). Considerando que, na agricultura, a aplicação de pressões maiores do que a maior pressão suportada pelo solo deve ser evitada, para que não ocorra a compactação adicional do solo (Gupta et al., 1989; Lebert & Horn, 1991; Imhoff et al., 2001), e por constituir a pressão de preconsolidação um indicativo da máxima pressão aplicada ao solo no passado (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior, 1994), a figura 6 foi dividida em três regiões com vistas em identificar a compactação do solo por meio da pressão de preconsolidação estimada, conforme descrito anteriormente. Nesta figura, três regiões foram consideradas: (a) uma região onde as pressões de preconsolidação são maiores do que as pressões de preconsolidação estimadas com a equação do intervalo de confiança a 95 %, considerada como sendo a região onde ocorre a compactação; (b) uma

região onde as pressões de preconsolidação são menores do que as pressões de preconsolidação estimadas com a equação do intervalo de confiança a 95 % e maiores do que as pressões estimadas com a equação $\sigma_p = 10^{(2,71-1,26 U)}$, sendo considerada a região onde há tendência em ocorrer a compactação do solo, e (c) uma região onde as pressões de preconsolidação são menores do que a pressão de preconsolidação estimada com a equação $\sigma_p = 10^{(2,71-1,26 U)}$, sendo considerada como a região onde não ocorre a compactação do solo.

Os valores das pressões de preconsolidação estimadas por meio da equação $\sigma_p = 99,39 + 0,39 RP$ foram plotados na figura 6, obtendo-se a figura 7. Nesta figura, observa-se que as pressões de preconsolidação determinadas na linha de tráfego ocorreram na região de compactação do solo,

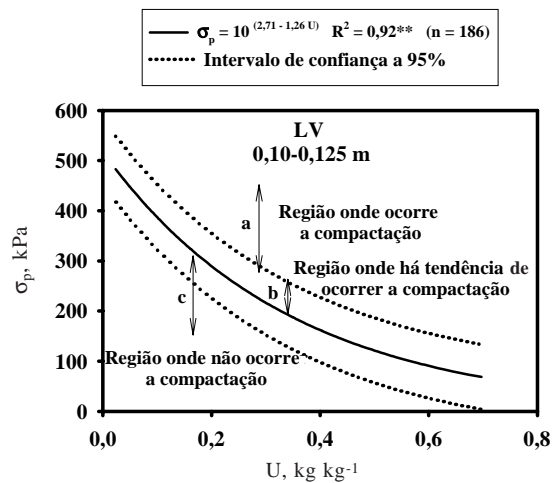


Figura 6. Modelos de sustentabilidade da estrutura para o LV, na profundidade de 0,10-0,125 m, com os critérios utilizados na identificação da compactação do solo.

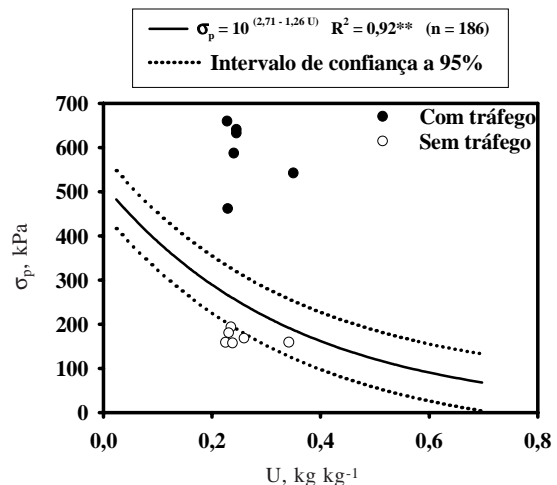


Figura 7. Modelos de sustentabilidade da estrutura para o LV, na profundidade de 0,10-0,125 m.

enquanto as pressões de preconsolidação determinadas em locais onde não houve tráfego situaram-se na região em que não ocorre compactação do solo, demonstrando que as pressões de preconsolidação estimadas por meio da resistência à penetração podem ser usadas como um critério auxiliar na identificação da compactação do solo.

CONCLUSÃO

As pressões de preconsolidação podem ser determinadas em função da resistência à penetração do solo.

LITERATURA CITADA

- ANDERSON, T.C. & LUKAS, R.G. Preconsolidation pressure predicted using Su/p' ratio. In: YONG, R.N. & TOWNSEND, F.C., eds. Laboratory shear strength of soil. SYMPOSIUM OF THE ASTM. 1981. p.502-515. (Spec. Tech. Pub., 740)
- BOWLES, J.E. Engineering properties of soils and their measurements. 3.ed. Auckland: McGraw-Hill, 1986. 218p.
- BURMISTER, D. The application of controlled test methods in consolidation testing. In: Fifty-four annual meeting of the ASTM. SYMPOSIUM ON CONSOLIDATION TESTING OF SOILS. 1951. p.83-98. (Spec. Tech. Pub., 126)
- CANILLAS, E.C. & SALOKHE, V.M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. Soil Till. Res., 65:221-230, 2002.
- CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: CONFERENCE ON SOIL MECH. AND FOUND. ENG., PROC. of the ICSMFE. Cambridge, 1936. Cambridge, 1936, v.3. p.60-64.
- CULLEY, J.L.B. & LARSON, W.E. Susceptibility to compression of a clay loam Haplaquoll. Soil Sci. Soc. Am. J., 51:562-567, 1987.
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle size analysis. In: KLUTE, C.A., ed. Methods of soil analysis. Part 1, physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, American Society Agronomy, 1986. p.545-567. (Agron. Monogr., 9)
- DEFOSSEZ, P. & RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. Soil Till. Res., 67:41-64, 2002.
- DIAS JUNIOR, M.S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114p. (Tese de Doutorado)
- DIAS JUNIOR, M.S. Avaliação de impactos de sistemas de colheita nas características físicas dos solos. Relatório Técnico do Projeto de Pesquisa das Regiões de Atuação da Cenibra. Período 1999 a 2002. Lavras, 2002. p.113.
- DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M.; FONSECA, S.; SILVA, A.R. & FERREIRA, D.F. Avaliação da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz – ES. R. Árvore, 23:371-380, 1999.
- DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. Soil Techn., 8:139-151, 1995.
- DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. Bras. Ci. Solo, 20:175-182, 1996.
- GUPTA, S.C.; HADAS, A. & SCHAFER, R.L. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B. & GUPTA, S.C., eds. Mechanics and related process in structured agricultural soils. The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1989. p.137-152. (NATO Applied Sciences 172)
- GYSI, M. Compaction of an Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: Field data and a critical state soil mechanics model approach. Soil Till. Res., 61:133-142, 2001.
- HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733p.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação de pressões para o crescimento das plantas. R. Bras. Ci. Solo, 25:11-18, 2001.
- JOSE, B.T.; SRIDHARAN, A. & ABRAHAM, B.M. Log-log method for determination of preconsolidation pressure. Geot. Tes. J., 12:230-237, 1989.
- KONDO, M.K. & DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. R. Bras. Ci. Solo, 23:211-218, 1999.
- LEBERT, M. & HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. Soil & Till. Res., 19:274-286, 1991.
- RAIJ, B. van. & GUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agrônomo, 1983. 16 p. (Circular, 63)
- SÄLLFORS, G. Preconsolidation pressure of soft high plastic clays. Gothenburg, Department of Geotechnical Engineering, 1975. (Tese de Doutorado)
- SCHMERTMANN, J.H. The undisturbed consolidation behavior of clay. Trans. Soc. Civ. Eng., 120:1201-1233, 1955.
- SNEDECOR, G.W. & COCHARAN, W.G. Statistical methods. 8.ed. Ames, Iowa State University Press, 1989. 503p.
- TAYLOR, D.W. Fundamentals of soil mechanics. New York, John Wiley & Sons, 1948. 700p.
- VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.