

Nº 41, out/2000, p.1-13

PENETRÔMETRO COMBINADO COM SENSOR DE UMIDADE POR TDR PARA ESTUDO DA COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

Carlos Manoel Pedro Vaz¹
Jan W. Hopmans²
Luis Henrique Basso³

1. Introdução

A resistência mecânica dos solos é um parâmetro importante que afeta o crescimento das plantas devido à restrição que causa ao desenvolvimento das raízes, ao fluxo de água e ao transporte e armazenamento de água e de nutrientes.

O modo mais comum de se medir a resistência do solo é através do uso de penetrômetros, os quais caracterizam a força necessária para inserir um cone de um tamanho padrão no interior do solo (Bradford, 1986). Cientistas do solo têm relacionado variações da resistência à penetração (RP), causada por cultivo, tráfego ou regiões naturalmente adensadas, ao crescimento das raízes, produtividade e propriedades físicas do solo. Por exemplo, correlações entre RP e crescimento de raízes, água e absorção de nutrientes foram apresentadas por Stelluti et al. (1998) e penetrômetros de cone usados para identificar regiões adensadas ou camadas compactadas por Henderson, 1989 e previsão de algumas propriedades dos solos por Ayers e Bowen, 1987.

A resistência mecânica medida por penetrômetros possui uma dependência bastante complexa com os parâmetros dos solos, mas a densidade global (ρ) e a umidade (θ) parecem ser os fatores mais importantes que afetam a RP dos solos. Muitos trabalhos têm sido conduzidos para se entender a influência de ρ e θ na RP em laboratório (Taylor e Gardner, 1963; Mirreh e Ketcheson, 1972; Ayers e Perumpal, 1982; Ayers e Bowen, 1987; Ohu et al. 1988) e campo (Simmons e Cassel, 1989; Vasquez et al. 1991, Busscher et al. 1997). Em ambos estudos, de laboratório e campo, relações empíricas e teóricas foram obtidas. Dentre os diversos modelos propostos para testar essas relações, Busscher et al. (1997) sugeriu algumas equações de potência e exponenciais como sendo as mais adequadas.

¹Físico, PhD, EMBRAPA/CNPDIA, Caixa Postal 741, CEP 13560-970, São Carlos-SP

²Engenheiro Agônomo, PhD, Universidade da Califórnia, Davis, CA, 95616, EUA

³Engenheiro Agônomo, PhD, EMBRAPA/CPATSA, Caixa Postal 23, CEP 56300-000, Petrolina-PE

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.2

Entretanto, a maioria desses estudos carecem de dados representativos e precisos, pois a RP é uma propriedade do solo altamente variável, determinada localmente em medidas de pequena escala. Portanto, dificuldades em relacionar a RP com outros parâmetros do solo podem ser atribuídas principalmente à variabilidade espacial, visto que as técnicas disponíveis não possibilitam a determinação dos diferentes atributos dos solos (RP, ρ , θ , matéria orgânica, textura e outros) num mesmo ponto.

Visando minimizar essas dificuldades, foram desenvolvidos equipamentos de penetrometria combinados com sensores de umidade para a determinação simultânea da resistência à penetração e umidade ao longo do perfil dos solos (Young et al. 1998; Adams et al. 1998; Newman & Hummel, 1999; Vaz et al. 1999; Vaz & Hopmans, 2000). Dessa forma, dados de RP obtidos em diferentes condições de umidade podem ser normalizados para uma umidade padrão, possibilitando assim comparações entre resultados, abrindo novas possibilidades de aplicações do penetrômetro em estudos e avaliações da compactação dos solos.

Dentre os diversos tipos de técnicas e sensores de umidade utilizados, a sonda espiral de TDR (reflectometria no domínio do tempo) introduzido por Vaz & Hopmans (2000) parece ser especialmente adequada devido às vantagens do TDR sobre as demais técnicas de medida da umidade dos solos (Topp et al. 1980). Aplicando o equipamento de penetrometria combinado com sensor de umidade por TDR em um solo siltoso da Califórnia, EUA (solo Yolo), Vaz & Hopmans (2000) obtiveram correlações experimentais entre a RP, ρ e θ , possibilitando, assim, a utilização do referido instrumento também para a estimativa da densidade dos solos, além das medidas de RP pelo penetrômetro e θ pelo TDR.

2. Procedimento

2.1. Descrição do equipamento

O instrumento desenvolvido é composto de um penetrômetro de impacto (Figura 1) com uma sonda de TDR tipo espiral acoplado na haste do penetrômetro, acima do cone padrão (ASAE, 1994).

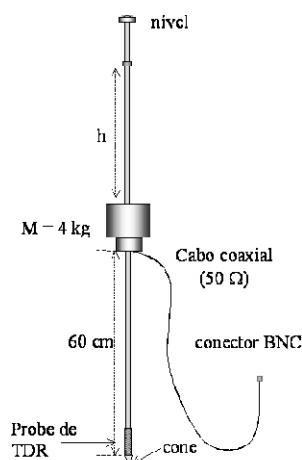


Figura 1. Esquema do penetrômetro de impacto combinado com sonda espiral de TDR para medida simultânea da resistência à penetração e umidade do solo.

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.3

A configuração básica da sonda espiral de TDR (guia de onda) é constituída de 2 fios de cobre com espessura de 0.8 milímetros e 30 centímetros de comprimento, enrolados paralelamente ao redor de um cilindro de PVC que reveste a haste de aço do penetrômetro. Os dois fios são conectados na extremidade a um cabo coaxial de 50Ω , que é guiado pelo interior da haste do penetrômetro (Figura 2) e conectado a um testador de cabos Tektronix 1502C, para a determinação da constante dielétrica, a qual é proporcional à umidade do solo.

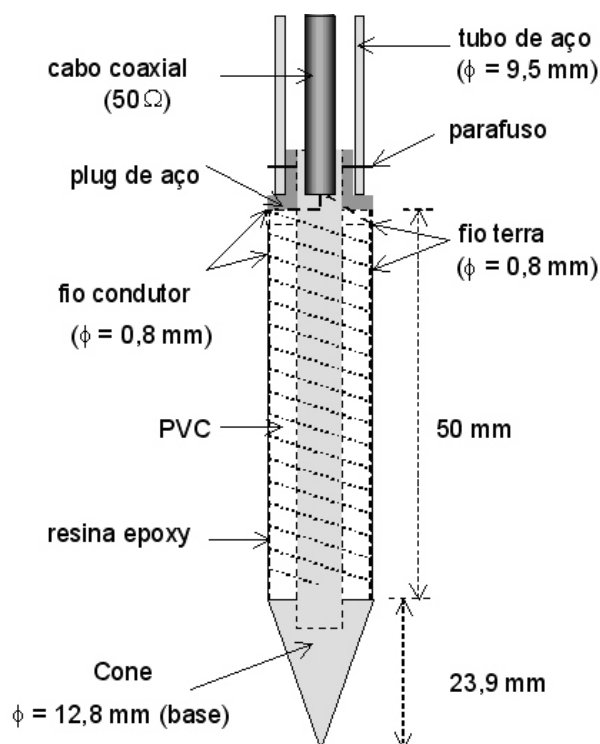


Figura 2. Esquema detalhado da sonda de TDR acoplada ao penetrômetro da Figura 1.

2.2. Medidas em laboratório

Foram realizados testes com três solos, em laboratório, para avaliação do desempenho do sensor de umidade do solo e entendimento do comportamento da constante dielétrica do sensor em função da umidade dos solos. Os solos constam de uma areia de textura grossa (SRI supreme sand-30, Silica Resources Inc. Marysville, CA) e os solos Yolo (Eching et al. 1994) e Columbia (Liu et al. 1998), ambos da Califórnia, EUA. Foram preparadas amostras de cada um dos solos contendo teores de umidades crescentes e deixadas por um dia para homogeneização da umidade. O penetrômetro com a sonda foi então introduzido no interior das amostras, pressionando-o na superfície do solo e feitas 3 determinações das constantes dielétricas pelo TDR para cada amostra. Foram feitas também medidas da constante dielétrica de todas as amostras com uma sonda convencional de TDR na configuração de duas hastas paralelas e comprimento de 5 cm, para comparação com as medidas feitas com a sonda espiral. Os resultados foram avaliados através de modelos de base física conhecidos como "mixing model" (Dobson et al., 1985).

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.4

2.3. Medidas em campo

Para a avaliação do efeito da umidade e densidade dos solos na resistência à penetração foram realizados experimentos em campo, constando de uma calibração e um experimento onde a resistência à penetração foi determinada em duas condições distintas de umidade (Figura 3), uma seca, após um longo período sem chuvas e outra úmida, após uma irrigação de 50 milímetros.

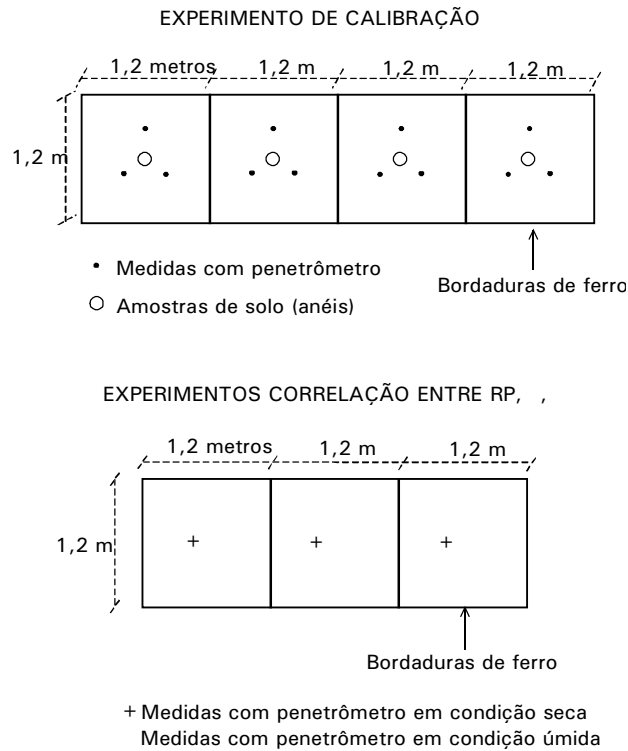


Figura 3. Esquema do experimento de campo para teste do penetrômetro com sondas de TDR.

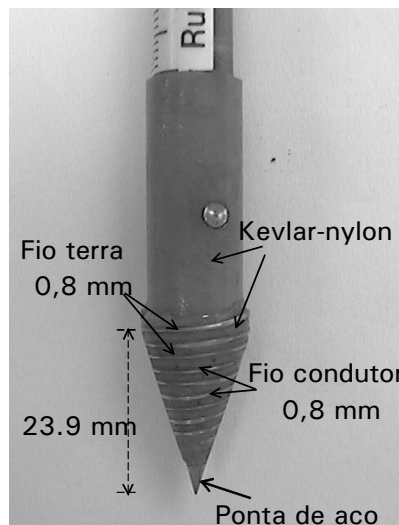


Figura 4. Sonda espiral de TDR com os fios (guias de onda) enrolados no cone do penetrômetro

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.5

Além da sonda mostrada na Figura 2, foi desenvolvida também uma outra sonda espiral (Figura 4) onde os fios foram enrolados no próprio cone, feito de Kevlar-nylon (plástico duro), ao invés de na haste do penetrômetro. A vantagem desse tipo de configuração é o melhor contato solo-sonda durante a penetração no solo. Nesta sonda foram utilizados fios de aço de 0.5 milímetros de espessura e 15 centímetros de comprimento, enrolados em cerca de 2 centímetros de cone. A extremidade final do cone foi feita de aço para aumentar a resistência e durabilidade do mesmo. As duas sondas foram avaliadas no mesmo experimento de campo para a comparação dos seus desempenhos.

2.4. Modelo para interpolação dos dados das curvas de calibração

Usando a abordagem de "mixing model" descrita por Nissen et al. (1998), a constante dielétrica medida por uma sonda espiral de TDR ($\epsilon_{\text{espiral}}$) pode ser relacionada à constante dielétrica do solo determinada por uma sonda convencional (ϵ_{solo}).

$$\epsilon_{\text{espiral}} = \left[w\epsilon_{\text{sonda}}^n + (1-w)\epsilon_{\text{solo}}^n \right]^{1/n} \quad [1]$$

Na equação [1], w é um fator de ponderação, n equivale a um fator de geometria da sonda e ϵ_{sonda} pode ser considerado com sendo igual à constante dielétrica do PVC, na qual os fios em espiral são enrolados. A constante dielétrica do solo (ϵ_{solo}), determinada pela sonda convencional pode ser escrita em termos das características do solo (Dobson et al., 1985):

$$\epsilon_{\text{solo}} = \left[(1-\varphi)\epsilon_s^\alpha + (\varphi-\theta)\epsilon_a^\alpha + \theta\epsilon_w^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad [2]$$

onde $(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$ e $(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$ representam a porosidade e a umidade volumétrica, respectivamente, e ϵ_s , ϵ_a e ϵ_w são as constantes dielétricas das partículas do solo, do ar e água, respectivamente ($\epsilon_s=3,9$; $\epsilon_a=1,0$; and $\epsilon_w=80$) e o expoente depende da estrutura espacial do meio e sua orientação com respeito ao campo dielétrico aplicado e pode variar entre -1 e $+1$ (Roth et al. 1990).

Substituindo a equação [2] na [1] pode-se expressar a constante dielétrica medida pela sonda espiral ($\epsilon_{\text{espiral}}$) como (Vaz e Hopmans, 2000):

$$\epsilon_{\text{espiral}} = \left\{ \left(w\epsilon_{\text{sonda}}^n + (1-w) \left[(1-\varphi)\epsilon_s^\alpha + (\varphi-\theta)\epsilon_a^\alpha + \theta\epsilon_w^\alpha \right]^{1/\alpha} \right)^{1/n} \right\}^{1/n} \quad [3]$$

Esta equação é utilizada para interpolar os dados da curva de calibração obtidos para a sonda espiral de TDR.

3. Validação

3.1. Calibração em laboratório

A correlação entre a constante dielétrica medida com a sonda espiral e a medida com a convencional é apresentada na Figura 5. Ajustando os dados à equação [1] obtem-se $n = 0.494$, $w = 0.655$ e $\epsilon_{\text{sonda}} = 2.703$. O valor obtido para w indica uma grande influência do material da sonda na medida da constante dielétrica com a sonda espiral. O valor de ϵ_{sonda} obtido é bastante próximo à valores tabelados para PVC e epoxy (Weast, 1982). Nissen et al. (1998) encontrou para uma sonda espiral com geometria diferente da usada aqui, valores de w e n igual a 0.52 e -0.13 , respectivamente. Essas diferenças são atribuídas às distintas

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.6

características geométricas e de construção de cada sonda.

As curvas de calibração da sonda espiral de TDR para os 3 solos são apresentadas na Figura 6. Os dados foram interpolados usando a equação [3], resultando em valores de $\alpha = 0.57$, 0.54 e 0.20 para os solos Columbia, Yolo e areia, respectivamente.

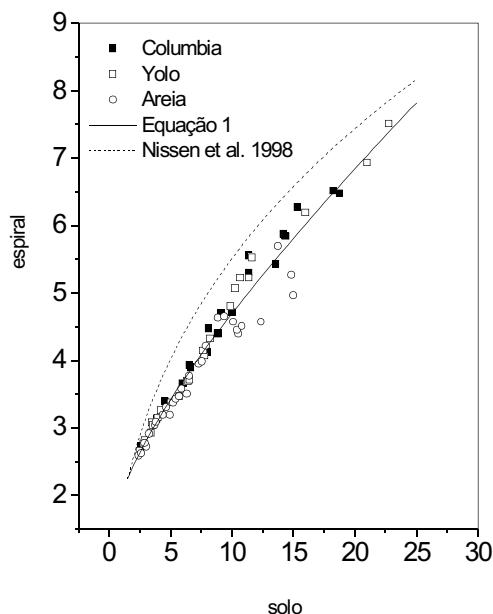


Figura 5. Correlação entre as constantes dielétricas do solo medidas com a sonda espiral e convencional.

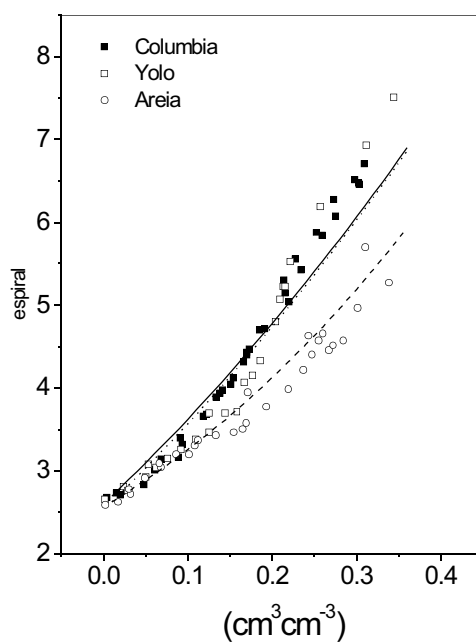


Figura 6. Constante dielétrica do solo, medida com a sonda espiral ao longo da haste do penetrômetro, em função da umidade para os 3 solos estudados.

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.7

A curva de calibração obtida em laboratório para o solo Yolo foi testada em campo. Foram realizadas medidas da resistência à penetração e da umidade ao longo do perfil, usando a equação de calibração obtida na Figura 6. A Figura 7 mostra um exemplo da resistência à penetração e umidade medidas no campo, onde observa-se um perfil detalhado para o solo Yolo. Para se verificar a validade da curva de calibração obtida em laboratório para uso em campo, foram coletadas amostras de solo em anéis, a cada 5 cm de profundidade, até 60 cm e os valores da umidade medidos gravimetricamente foram comparados com os medidos pela sonda espiral de TDR. A Figura 8 mostra a boa correlação obtida entre os 2 métodos, com $r^2 = 0.987$.

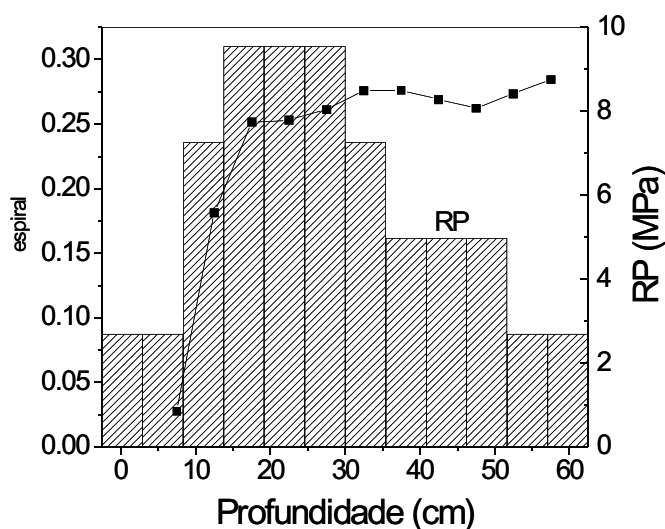


Figura 7. Perfil de resistência à penetração e umidade medidas com o penetrômetro combinado com a sonda espiral de TDR para o solo Yolo.

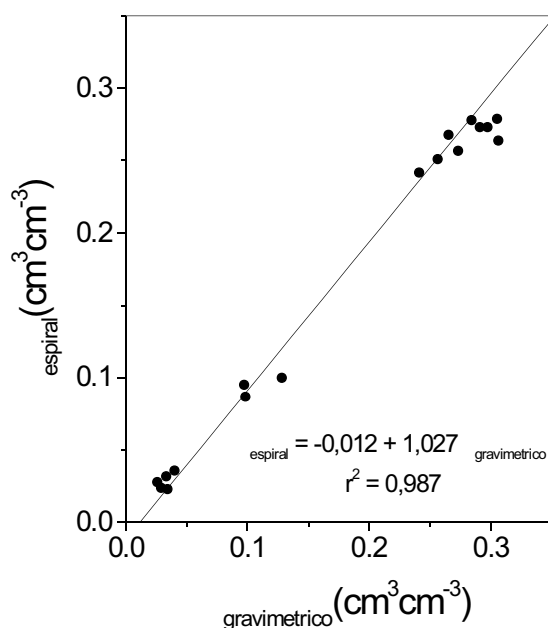


Figura 8. Valores de umidade medidos gravimetricamente e pela sonda espiral de TDR, em campo, para o solo Yolo.

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.8

3.2. Experimentos de campo: influência da umidade na resistência à penetração

A Figura 9 apresenta a curva de calibração obtida com as sondas na haste e no cone do penetrômetro, para o solo Yolo, em campo. Diferenças nas constantes dielétricas entre as duas sondas são atribuídas às diferentes geometrias e ao deslocamento ou compactação do solo próximo às sondas durante a penetração no perfil do solo. Os dados experimentais foram interpolados por equações polinomiais de terceiro grau (Figura 9), ao invés do modelo "mixing", para facilitar o trabalho de campo (Topp et al. 1980), uma vez que utilizou-se o software WinTDR98 (<http://psb.usu.edu/wintdr98/>) para a coleta e tratamento dos dados. Este software permite o cálculo da umidade do solo a partir da forma de onda fornecida pelo TDR através do uso de curvas de calibração do tipo polinomiais de terceiro grau.

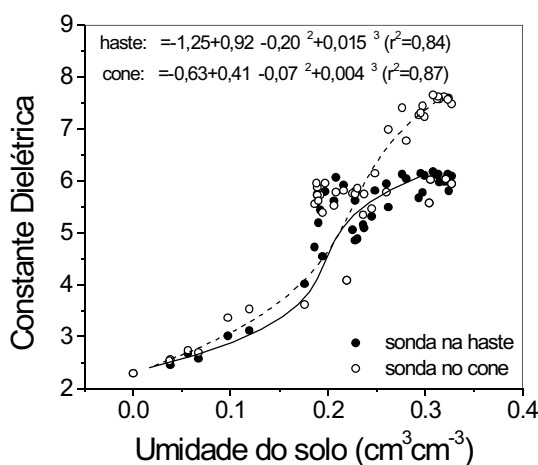


Figura 9. Curvas de calibração obtidas com as 2 sondas para o solo Yolo em campo.

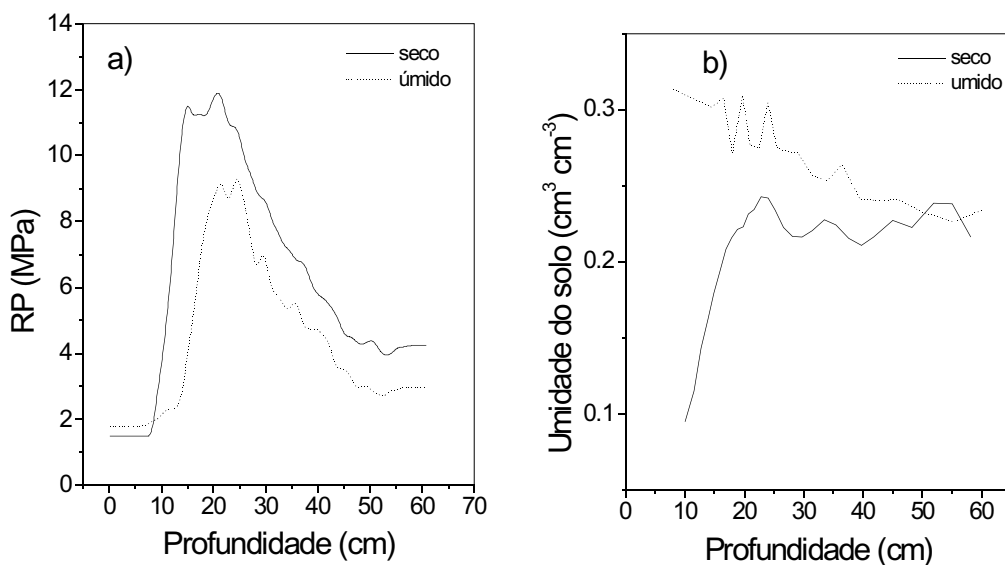


Figura 10. Perfis de resistencia à penetração (a) e umidade (b) obtidos com a sonda na haste do penetrômetro, para o solo Yolo, em campo.

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.9

Os perfis de resistência à penetração e umidade determinados para as condições úmidas e secas para as 2 sondas são apresentados nas Figuras 10 e 11. Os dados apresentados referem-se a média das medidas realizadas nas 3 parcelas (Figura 3). Observa-se um decréscimo da resistência à penetração depois da irrigação, consequência do aumento da umidade no perfil.

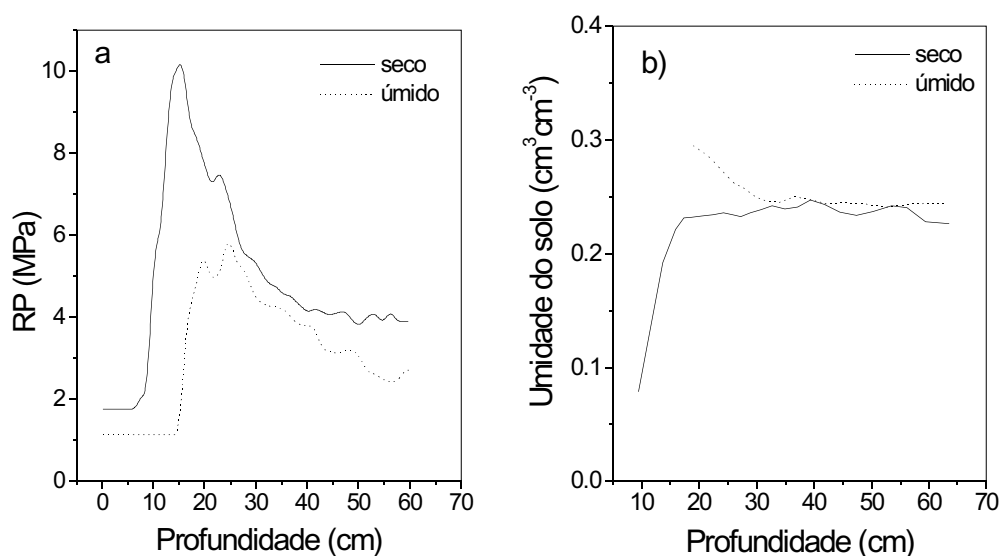


Figura 11. Perfis de resistencia à penetração (a) e umidade (b) obtidos com a sonda no cone do penetrômetro, para o solo Yolo, em campo.

O perfil de densidade do solo, determinado à partir das amostras coletadas no experimento para calibração das sondas é apresentado na Figura 12.

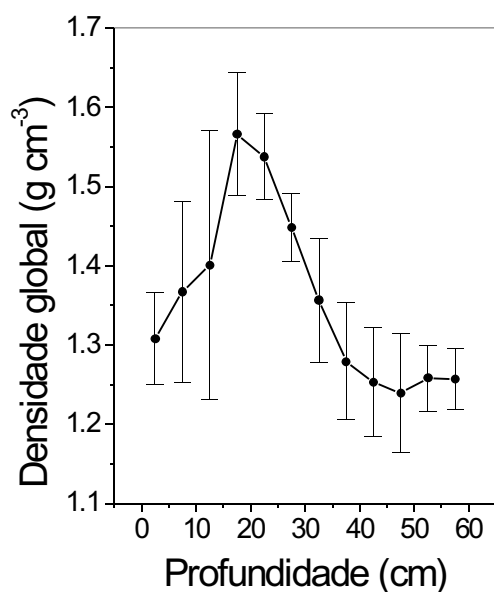


Figura 12. Perfil de densidade medido no experimento de calibração (média das 4 parcelas). Barras simbolizam o desvio padrão obtido em cada camada.

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.10

Os dados de resistência à penetração (RP), umidade (θ) e densidade (ρ) dos solos foram interpolados por uma equação única, utilizando-se o modelo combinado exponencial-potência sugerido por Upadhyaya et al (1982), obtendo-se:

$$\text{Sonda na haste: } RP = 193,2 / 2.65^{4,1} \exp -3 \quad [4]$$

$$\text{Sonda no cone: } RP = 170,1 / 2.65^{3,2} \exp -6 \quad [5]$$

Os dados de resistência à penetração medidos e estimados em função da umidade e da densidade são apresentados nas Figuras 13 e 14 para as duas sondas. Observa-se que a equação utilizada, sugerida por Upadhyaya et al. (1982) possibilitou a representação dos dados experimentais de forma bastante satisfatória.

Utilizando-se o penetrômetro com sonda espiral de TDR para a medida simultânea da resistência à penetração e umidade e as equações de regressão [4], para a sonda na haste e para a sonda no cone [5], é possível se estimar a densidade dos solos e também normalizar valores de resistência à penetração medidos em diversas condições de umidade, para um valor padrão de umidade, como por exemplo a capacidade de campo.

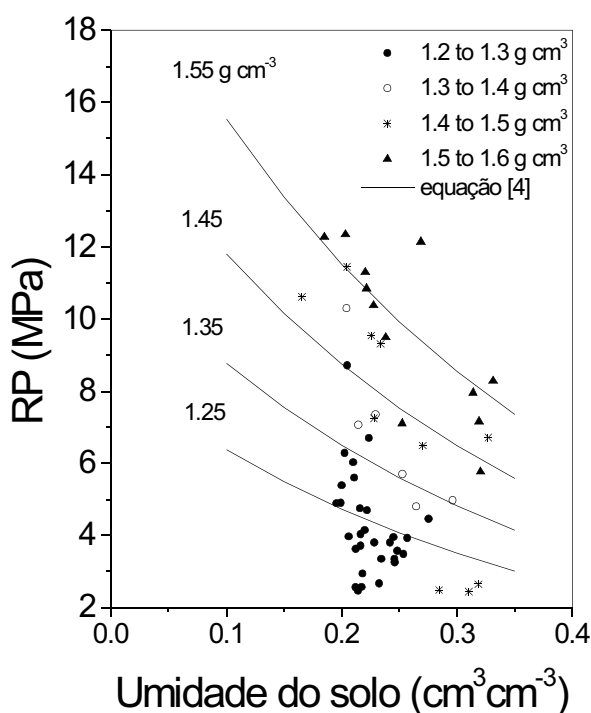


Figura 13. Resistência à penetração medida e estimada pela equação [4] em função da umidade e densidade do solo Yolo para a sonda na haste do penetrômetro.

Uma vez que o instrumento apresentado determina RP e θ pode-se utilizar as Eq. [4] e [5] para a estimativa da densidade global. A Figura 15 apresenta os resultados estimados pela Eq. [5] e medidos no experimento de calibração. Observa-se uma excelente correlação entre dados medidos e estimados, com coeficiente de atenuação de 0,98.

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.11

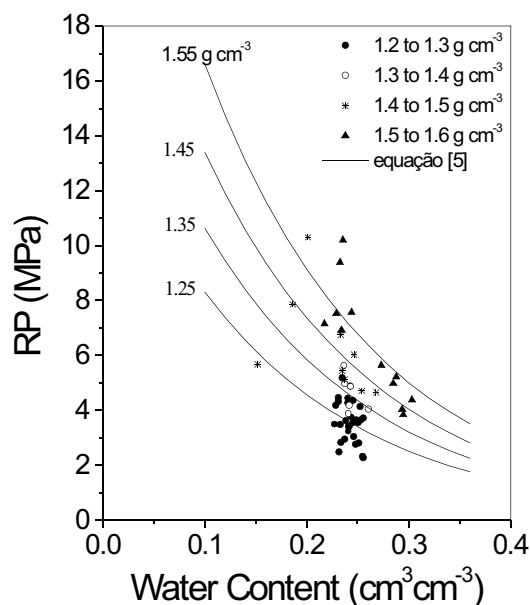


Figura 14. Resistência à penetração medida e estimada pela equação [5] em função da umidade e densidade do solo Yolo para a sonda no cone do penetrômetro.

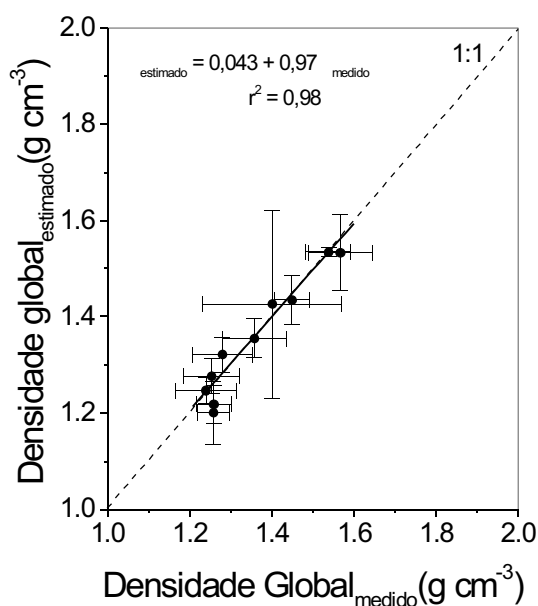


Figura 15. Comparação entre valores da densidade global medidos e estimados pela Eq. [5], utilizando os dados de RP e medidos pelo penetrômetro combinado com sonda espiral de TDR.

Os resultados apresentados mostram o enorme potencial do equipamento para estudos de compactação dos solos. Como continuidade deste trabalho pretende-se aplicar o equipamento e metodologia desenvolvidos, em outras condições e tipos de solos, possibilitando o entendimento do efeito de outros parâmetros como a textura, matéria orgânica e outros, na resistência à penetração.

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.12

Referências Bibliográficas

- ASAE Standards engineering practices data (Soil cone penetrometer, S313.2). 1994. St. Joseph, ASAE.
- Ayers, P.D. and J.V. Perumpral. 1982. Moisture and density effects on cone index. ASAE Trans., 25(5):1169-1172.
- Ayers, P.D., H.D. Bowen. 1987. Predicting soil density using cone penetration resistance and moisture profile. ASAE Trans., 30: 1331-1336.
- Bradford, J.M. 1986. Penetrability. IN:Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Second Edition. (Ed. A. Klute). Monograph Number 9. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin USA.
- Busscher, W.J., P.J. Bauer, C.R. Camp, R.E. Sojka. 1997. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. Soil Till. Res., 43:205-217.
- Dobson, M.C., F.T. Ulaby, M.T. Hallikainen, M.A. El-Rayes. 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil: II Dielectric mixing models. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing GE-23:35-46.
- Eching, S.O., J.W. Hopmans and O. Wendroth. 1994. Unsaturated hydraulic conductivity from transient multistep outflow and soil water pressure data. Soil Sci. Soc. Amer. J. 58:687-695.
- Henderson, C., A. Levett, D. Lisle. 1988. The effects of soil water content and bulk density on the compactibility of some western Australian sandy soils. Aust. J. Soil Res., 26:391-400.
- Liu, Y.P., J.W. Hopmans, M.E. Grismer and J.Y. Chen. 1998. Direct estimation of air-oil and oil-water capillary pressure and permeability relations from multi-step outflow experiments. Contaminant Hydrology 32:223-245.
- Mirreh, H.F., J.W. Ketcheson. 1972. Influence of bulk density and matric pressure to soil resistance to penetration. Can. J. Soil Sci. 52:477-483.
- Nissen, H.H., P. Moldrup, K. Henriksen. 1998. High-resolution time domain reflectometry coil probe for measuring soil water content. Soil Sci. Soc. Am. J., 62:1203-1211.
- Ohu, J.O, G.S.V. Raghavan, E. McKyes. 1988. Cone index prediction of compacted soils. ASAE Trans., 31(2):306-310.
- Roth, K., R. Schulin, H. Fluehler, W. Attinger. 1990. Calibration of TDR for water content measurement using a composite dielectric approach. Water Resour. Res. 26:2267-2273.
- Simmons, F.W. and D.K. Cassel. 1989. Cone index and soil physical properties relationships on sloping paleudult complex. Soil Sci. 147:40-46.
- Stelluti, M., M. Maiorana, D. DeGiorgio. 1998. Multivariate approach to evaluate the penetrometer resistance in different tillage systems. Soil & Tillage Research, 46:145-151.
- Taylor, H.M. and H.R Gardner. 1963. Penetration of cotton seedling taproot as influenced by bulk density, moisture content, and strength of the soil. Soil Sci. 96:153-156.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan. 1980. Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res., 16:574-582.

CT/41, CNPDIA, out/2000, p.13

- Upadhyaya, S.K., L.J. Kemble, N.E. Collins. 1982. Cone index prediction equations for Delaware soils. ASAE Paper, 82:1452-1456.
- Vaz, C.M.P., J.W. Hopmans. 2000. Simultaneous Measurement of soil strength and water content with a combined penetrometer-moisture probe. Soil Sci. Soc. Am. J. 65(1). (*in press*).
- Vazquez, L., D.L. Myhre, E.A. Hanlon, R.N. Gallaher. 1991. Soil penetrometer resistance and bulk density relationships after long-term no tillage. Commun. Soil Plant Anal., 22:2101-2117.
- Weast, R.C. 1982. Handbook of physics and chemistry. 63th ed. CRC Press.
- Adams, B.A.; B.D. Young and G.C. Topp. 1998. Simultaneous measurement of soil resistance and water content. ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting, Baltimore, Maryland, Oct. 18-22. p. 181.
- Young, G.D., B.A. Adams, and G.C. Topp. 1998. A portable cone index and water content penetrometer. ASA Abstracts, pp. 180.
- Newman, S.C. and J.W. Hummel. 1999. Soil penetration resistance with moisture correction. ASAE/CSAE Meeting, paper n. 993028, Toronto, July 18-21.
- Vaz, C.M.P., J.W. Hopmans and P.S.P. Herrmann. 1999. Development of time domain reflectometry probes for combined use with a cone penetrometer. III Workshop on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, Athens, Georgia, Apr. 11-13.