

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A CURVA
DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO**

Cinara Xavier de Almeida
Engenheira Agrônoma

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
2008

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A CURVA
DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO**

Cinara Xavier de Almeida

Orientador: Prof. Dr. José Frederico Centurion

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
Abril de 2008

Almeida, Cinara Xavier de
A447f Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo
à penetração / Cinara Xavier de Almeida. – – Jaboticabal, 2008
xiii, 34 f.: il.; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2008
Orientador: José Frederico Centurion
Banca examinadora: Itamar Andrioli, Elias Nascentes Borges
Bibliografia

1. Densidade do solo. 2. Conteúdo de água. 3. granulometria. I.
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.425

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da
Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

CINARA XAVIER DE ALMEIDA – Nasceu no dia 29 de janeiro do ano de 1982, em Monte Carmelo, MG. Coursou todo o ensino médio na Escola Estadual Professor Vicente Lopes Perez, no período de 1997 a 1999. Em julho de 2000, ingressou no curso de Graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, e em julho de 2005, obteve o título de Engenheira Agrônoma. No período de outubro a dezembro de 2005, foi bolsista pelo convênio EMBRAPACafé/FUNAPE, como pesquisadora. Iniciou em março de 2006 o curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal, SP, onde foi bolsista FAPESP. No dia 28 de abril de 2008, submeteu-se à banca para a defesa da dissertação e obteve o título de Mestre em Agronomia.

*“O amor jamais passará.
As profecias desaparecerão,
as línguas cessarão,
a ciência também desaparecerá.
Pois o nosso conhecimento é limitado,
limitada é também a nossa profecia.
Mas quando vier a perfeição,
desaparecerá o que é limitado.”*

1Cor 13,8-10

À minha amada família,
Lindolfo, Neusa, Cristiane, Iran, Iran Filho e Amanda
e ao Ricardo
por todo amor, carinho, apoio e incentivo

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Deus, agradeço pelo dom supremo que é a vida.

Ao Professor Dr. José Frederico Centurion, pela compreensão, incentivo, empenho pessoal, orientação, e sobretudo amizade, que tanto contribuíram para a minha formação profissional.

Ao Professor Dr. José Carlos Barbosa, pelo apoio para a realização deste trabalho, orientação técnica, e amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos coordenadores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, os professores William Natale e Manoel Evaristo Ferreira, pela atenção nos momentos que precisei.

À todos os professores da Pós-graduação que contribuíram para a minha formação profissional.

Ao amigo e colega Onã da Silva Freddi pelos ensinamentos e esforços não medidos durante o convívio.

À Fabiana, minha irmã de coração, pelos momentos juntas, por todo carinho, companheirismo e, sobretudo amizade.

Aos colegas de pós-graduação e amigos, Adolfo, Adriane, Amauri, Andréia, Anelisa, Cristian, Érica, Fernanda, Ivana, Márcio, Milaine, Patrícia, Ricardo Aratani, Tatiana, Tiago e a todos os outros pela amizade durante essa caminhada.

Às bolsistas de iniciação científica Fabrícia e Fernanda, pela troca de experiências e também pela prazerosa convivência.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos, Célia Regina Muniz, Maria Inês Bueno, Martha dos Santos, Cláudia Cirilo, Luis Souza, Hoster Pereira, Orivaldo Rosa, Orivaldo Gomes, Dejair Silva, Ademir Silva e Anderson Silva, pela prontidão nos momentos que precisei e pela amizade.

Às funcionárias da seção de Pós-Graduação e aos funcionários da Biblioteca da FCAV, pelo atendimento e auxílio.

Enfim, à todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADA!!!

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
SUMMARY	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Resistência do solo à penetração e o desenvolvimento de plantas	3
2.2. Influência dos atributos do solo na resistência do solo à penetração	4
2.3. Curvas de resistência do solo à penetração	5
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
5. CONCLUSÕES	26
6. REFERÊNCIAS	27

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Foto ilustrativa das colunas de PVC (a), do medidor eletrônico do conteúdo de água, Profile Probe PR2 acoplado ao Moisture Meter HH2 (b) e do penetrômetro de impacto (c)	12
Figura 2. Características do penetrômetro de impacto utilizado (adaptado de STOLF, 1991)	13
Figura 3. Curvas de retenção de água dos solos: Neossolo Quartzarênico (RQ), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho Acriférico (LVwf), nas diferentes densidades (D1 e D2)	16
Figura 4. Curvas de resistência dos solos à penetração: Neossolo Quartzarênico (○), Argissolo Vermelho-Amarelo (□), Latossolo Vermelho Distrófico (Δ) e Latossolo Vermelho Acriférico (◇), nas diferentes densidades (○ D1 e ◆ D2)	18
Figura 5. Curvas de resistência dos solos à penetração: Neossolo Quartzarênico (●), Argissolo Vermelho-Amarelo (□), Latossolo Vermelho Distrófico (Δ) e Latossolo Vermelho Acriférico (◆), nas diferentes densidades	21

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Atributos físicos e químicos dos solos	11
Tabela 2. Valores médios de densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo, nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, nas diferentes densidades	15
Tabela 3. Parâmetros da equação da curva de retenção de água ajustada para os solos em diferentes densidades	16
Tabela 4. Média, desvio-padrão, valores (mínimo e máximo) e coeficiente de variação (CV) das variáveis analisadas para o Neossolo Quartzarênico (RQ), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e para o Latossolo Vermelho Acriférico (LVwf) em diferentes densidades	22
Tabela 5. Resultados da análise de regressão não linear da resistência do solo à penetração em função do conteúdo de água, com base gravimétrica, para o Neossolo Quartzarênico e para o Argissolo Vermelho-Amarelo nas diferentes densidades	24

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A CURVA DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

RESUMO – A estimativa da curva de resistência do solo à penetração (CRP), a partir de variáveis de fácil obtenção, como o conteúdo de água (U_g), representa uma medida muito útil não só para a quantificação do estado de compactação, mas também para facilitar a interpretação da resistência do solo à penetração (RP), obtida em diferentes condições de campo. O objetivo foi estimar a CRP em solos de diferentes granulometrias e densidades, a partir de dados obtidos com o penetrômetro de impacto. O experimento foi realizado em laboratório, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP), Jaboticabal, SP. Foram utilizadas quatro classes de solos: Neossolo Quartzarênico, Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho Distrófico e Latossolo Vermelho Acriférico, os quais foram amostrados na camada de 0-0,20 m. Colunas de PVC foram preenchidas de forma a se obter diferentes condições de densidade: solo não compactado e compactado. O U_g , inicialmente elevado até o ponto de saturação, foi monitorado diariamente através de um medidor eletrônico composto pelo Profile Probe PR2 acoplado ao Moisture Meter HH2. A RP foi mensurada através de um penetrômetro de impacto adaptado para vaso. Os pares de dados entre a RP e o U_g foram ajustados e as CRP submetidas ao teste de significância. A relação entre a RP e o U_g foi descrita pelo modelo exponencial decrescente, representado pela seguinte equação:

$$RP = a + be^{-\frac{U_g}{c}}$$

em que: RP representa a resistência do solo à penetração (MPa); U_g o conteúdo gravimétrico de água (kg kg^{-1}) e a , b e c são os parâmetros da equação. Foram obtidos coeficientes de determinação que variaram de 0,57 a 0,96.

Palavras-Chave: densidade do solo, conteúdo de água, granulometria

PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR THE SOIL RESISTANCE TO PENETRATION CURVE

SUMMARY – The estimate of soil resistance to penetration curve (RPC) from easy attainment variables, like the water content (W_c), represents a very useful measure not only in the evaluation of soil compaction, but also to simplify the interpretation of the soil resistance to penetration (SR) obtained in different field conditions. The objective was to estimate the RPC in soils of different textures and bulk densities, from data obtained with the impact penetrometer. The experiment was carried out in Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP), Jaboticabal, SP, and four classes of soil were used: Entissol, Alfissol, Oxisol medium texture and clayey Oxisol, which were collected at 0-0.20 m soil depth. The PVC columns filled in manner to obtain a condition of non compacted and compacted soil. The W_c , initially elevated to the saturation point, was daily monitored through an electronic measurer composed by Profile Probe (PR2) connected to a Moisture Meter HH2. The SR was measured by an impact penetrometer adapted to the vase. The pairs of data between SR and W_c were adjusted and the RPC submitted to the significance test. The equation that best described the relationship between the SR and W_c was the exponentially decreasing, as follows:

$$SR = a + be^{-\frac{W_c}{c}}$$

where SR is the soil resistance to penetration (MPa), W_c soil water content (kg kg^{-1}) and a , b and c are the parameters of the equation. There was a significant relation between soil resistance to penetration and water content and the equations fit the data with coefficients of determination ranging from 0.57 to 0.96.

Keywords – soil bulk density, soil water content, soil texture

1. INTRODUÇÃO

Dentre as funções do solo, uma das mais importantes, é prover ao sistema radicular das plantas um ambiente adequado ao seu desenvolvimento. O ambiente propício é aquele que oferece às raízes, água, nutrientes e oxigênio (trocas gasosas) em quantidades necessárias para que as plantas expressem o seu máximo potencial produtivo. No entanto, nem sempre estas condições são encontradas no campo. Ao contrário, muitas vezes o desenvolvimento radicular encontra-se restrito, devido à impedância mecânica ocasionada pela compactação do solo.

A compactação do solo é fortemente correlacionada com a resistência do solo à penetração, que é mensurada através da penetrometria. Esse método apresenta algumas vantagens por ser rápido, fácil e possuir boa correlação com o desenvolvimento radicular das plantas; como limitação, destaca-se a forte relação de dependência entre a resistência do solo à penetração e o seu conteúdo de água. Ou seja, com a diminuição do conteúdo de água, há um incremento na resistência do solo à penetração. Assim, pode ocorrer uma interpretação errônea dos resultados, havendo na maioria das vezes, uma superestimativa dos valores de resistência do solo à penetração. Além disso, diferenças na resistência do solo à penetração, ocasionadas por diferentes usos e manejos do solo, podem não ser detectadas devido ao efeito do conteúdo de água.

A estimativa dos dados de resistência do solo à penetração, obtidos em diversas condições de campo e sistemas de manejo, em um mesmo conteúdo de água, pode ajudar a reduzir problemas de interpretação de resultados. Nesse sentido, pesquisadores têm buscado desenvolver funções de pedotransferência que traduzam essa relação.

Assim, modelos matemáticos que representem a dependência da resistência do solo à penetração e seu conteúdo de água ajudam a entender a relação entre essas duas variáveis e favorecem o entendimento das propriedades mecânicas do solo que

governam a compactação, contribuindo, portanto, para a identificação das condições físicas do solo limitantes à produtividade das culturas, e também como ferramenta para a padronização da resistência do solo à penetração quando obtida em diferentes condições de água no solo.

Logo, o objetivo foi obter funções de pedotransferência que possam explicar a relação entre a resistência do solo à penetração e o seu conteúdo de água, a partir de dados obtidos com o penetrômetro de impacto, em solos de diferentes granulometrias e densidades do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Resistência do solo à penetração e o desenvolvimento de plantas

O processo de compactação do solo oriunda-se de processos pedogenéticos, o qual é denominado adensamento (CAMARGO, 1983), ou da atividade agrícola, devido ao manejo inadequado do solo. Nesse caso, é dado pela alteração da estrutura do solo, que promove uma reorganização das partículas e dos agregados, de modo a diminuir o espaço poroso (DIAS JÚNIOR, 2000; REZENDE, 2000; STONE et al., 2002; RICHART et al., 2005). Esta diminuição na porosidade acarreta na elevação da densidade do solo, influenciando diretamente a produtividade das culturas, uma vez que prejudica a dinâmica do ar, da água e dos nutrientes, a temperatura do meio, os microorganismos e o desenvolvimento radicular das plantas (CAMARGO, 1983; REZENDE, 2000).

A compactação do solo é diretamente relacionada à resistência do solo à penetração, que por sua vez, está intimamente ligada ao desenvolvimento radicular das plantas (BENGOUGH et al., 2001; SILVA et al. 1994), pois, conforme CAMARGO (1983), o alongamento radicular só é possível quando a pressão de crescimento das raízes for maior do que a resistência oferecida pelo solo.

Muitos pesquisadores consideram que os valores de resistência do solo à penetração acima de 2,00 MPa são restritivos ao desenvolvimento radicular com reflexos na produtividade das culturas (TAYLOR et al., 1966; SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; NEIRO et al., 2003). No entanto, há resultados que mostram que esse valor é variável.

Dessa forma, TORMENA et al. (2004), quantificando algumas propriedades físicas em um Latossolo Vermelho eutroférico, verificaram que valores de resistência do solo à penetração dessa ordem não foram restritivos à cultura da soja. Segundo BEUTLER et al. (2006), o valor de resistência do solo à penetração a partir do qual

ocorreram reduções de produtividade, variou entre as cultivares de soja de 2,24 a 2,97 MPa, para um Latossolo Vermelho textura média.

Contudo, FOLONI et al. (2003) afirmam que o sistema radicular das plantas de milho não é capaz de romper uma camada compactada de solo se esse apresentar resistência do solo à penetração de 1,40 MPa. Além disso, ROSOLEM et al. (1999) constataram que a resistência do solo à penetração de 1,30 MPa reduz o crescimento das raízes seminais do milho à metade. Porém, FREDDI et al. (2006) observaram que valores variando de 0,90 a 2,00 MPa não diminuíram a produtividade do milho. Ainda FREDDI et al. (2007) verificaram que valores de resistência à penetração variando entre 1,03 e 5,69 MPa provocaram alterações na morfologia do sistema radicular do milho, reduzindo a produtividade da cultura em 2,58 Mg ha⁻¹. Porém, não foram impeditivos ao seu enraizamento.

A dificuldade em determinar os valores críticos de resistência do solo à penetração ao desenvolvimento das plantas, deve ser atribuída, em grande parte, à variação dessa medida com os atributos do solo.

2.2. Influência dos atributos do solo na resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração, mensurada através da penetrometria (BENGOUGH & MULLINS, 1990; TORMENA & ROLOFF, 1996), é a relação entre a força exercida para a penetração no solo de uma haste provida de um cone metálico numa extremidade, e a sua área basal, que é constante e conhecida. Esse método apresenta algumas vantagens por ser rápido, fácil e possuir boa correlação com o desenvolvimento radicular das plantas (BENGOUGH et al., 2001). Como limitação, destaca-se a relação de dependência entre a resistência do solo à penetração e outros atributos do solo, como o conteúdo de água e a densidade (BAILEY et al., 1986; CUNHA et al., 2002).

ABREU et al. (2004) e AGGARWAL et al (2006) concluíram que a resistência do solo à penetração é mais sensível à mudanças no seu conteúdo de água, do que na sua densidade. Com a diminuição do conteúdo de água, há um incremento na resistência do solo à penetração (FREDDI et al., 2006; HOLLAND, 2006; LIMA et al, 2006), o que faz com que haja uma interpretação errônea dos resultados, havendo na maioria das vezes, uma superestimação dos valores de resistência do solo à penetração (BUSSCHER et al., 1997).

BAILEY et al. (1986) relatam que a resistência do solo à penetração obtida em diferentes condições de densidade e/ou conteúdo de água é difícil de ser comparada. Além disso, conforme BUSSCHER (1990), diferenças na resistência do solo à penetração, ocasionadas por diferentes tratamentos, podem não ser detectadas devido ao efeito do conteúdo de água. Devido a isso, segundo LAPEN et al. (2004) a resistência do solo à penetração pode variar grandemente ao longo do ciclo das culturas. Desse modo, FREDDI et al. (2007) verificaram em um Latossolo Vermelho Distrófico textura média, que devido às precipitações pluviais diárias, o conteúdo de água no solo chegou próximo ao ponto de murcha permanente, durante o ciclo da cultura do milho, o que levou os valores de resistência do solo à penetração a 5,69 MPa, ocasionando assim, alterações no crescimento e na morfologia do sistema radicular das plantas.

2.3. Curvas de resistência do solo à penetração

A correção dos dados de resistência do solo à penetração para um mesmo conteúdo de água pode ajudar a reduzir problemas de interpretação de resultados obtidos em diversas condições de campo e sistemas de manejo (BUSSCHER et al., 1997). Nesse sentido, pesquisadores têm buscado desenvolver funções de pedotransferência que traduzam essa relação.

Uma das primeiras curvas propostas foi a de AYERS & PERUMPRAL (1982) que indicaram o seguinte modelo para correlacionar a resistência do solo à penetração, a densidade e o conteúdo de água:

$$RP = \frac{aDs^b}{c + (Ug - d)^2} \quad (1)$$

em que: RP é a resistência do solo à penetração (MPa); Ds representa a densidade do solo (Mg m^{-3}); Ug é o conteúdo de água (kg kg^{-1}) e a , b e c são os parâmetros da equação.

No ajuste dessa equação foram utilizados solos de diferentes granulometrias simuladas artificialmente (0 a 1000 g kg^{-1} de argila) e com diferentes densidades. Foram obtidos elevados coeficientes de determinação que variaram entre 94 a 98% ($0,94 \geq R^2 \leq 0,98$).

BUSSCHER (1990) avaliando a capacidade de dez diferentes funções em descrever a resistência do solo à penetração, identificou uma equação não linear que se ajustou aos dados, obtendo elevados coeficientes de determinação (R^2). Corresponde a uma equação clássica, muito utilizada na estimativa da resistência à penetração dos solos do Brasil (TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2000; BEUTLER et al., 2004; KLEIN & CÂMARA, 2007; LIMA et al., 2007). Essa equação é determinada a partir do conteúdo de água e da densidade do solo:

$$RP = aDs^b Ug^c \quad (2)$$

Já TO e KAY (2005) descreveram a variação da resistência do solo à penetração em função do potencial de água no solo:

$$RP = ah^b - ch \quad (3)$$

em que: h representa o potencial de água no solo em MPa e a , b e c correspondem aos parâmetros da equação ajustados em função do conteúdo de argila, matéria orgânica e densidade do solo. Esses pesquisadores obtiveram um R^2 igual a 0,47 quando a equação 3 foi ajustada para solos de várias classes texturais. Entretanto, o valor do R^2 aumentou a partir do ajuste de dados obtidos em solos de classes texturais semelhantes, num trabalho desenvolvido em laboratório, a partir de amostras indeformadas coletadas em campo. Todavia, conforme LIMA et al. (2006), a forma de obtenção dos dados (campo ou laboratório) não influencia a curva de resistência do solo à penetração.

Recentemente, DEXTER et al. (2007) propuseram uma equação fundamentada na estruturação do solo:

$$RP = a + b\left(\frac{1}{S}\right) + c\sigma \quad (4)$$

em que: S é um índice de qualidade física do solo, proposto por DEXTER (2004a, b, c) e σ é dado pelo estresse efetivo (TO e KAY, 2005; WHALLEY et al., 2005). Para solos que apresentem valores do índice S próximos ou inferiores a 0,02, ou seja, solos degradados, as plantas podem ter o seu desenvolvimento radicular paralisado, provavelmente devido à impedância mecânica (DEXTER, 2004 a, b, c). Esse fato levou à premissa de que a resistência do solo à penetração poderia ser estimada a partir desse parâmetro (DEXTER et al., 2007).

Segundo DEXTER et al. (2007), a expressão $1/S$ reflete exatamente o grau de compactação do solo. Esses pesquisadores relatam ainda que a resistência do solo à penetração predita pela equação 4 pode ser amplamente aplicada às comparações de

diferentes solos, pois o efeito do conteúdo de argila, matéria orgânica e outros fatores, já estão inclusos nos termos S e σ .

A equação 4 faz uma predição da resistência do solo à penetração, indiretamente a partir do conteúdo de água, pois seus dois termos, S e σ , são determinados por atributos hídricos do solo:

$$S = -n(Ug_{sat} - Ug_{res}) \left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-(1+m)} \quad (5)$$

em que: n e m são os parâmetros da equação da curva de retenção de água no solo, ajustada segundo GENUCHTEN (1980); Ug_{sat} e Ug_{res} são o conteúdo de água na saturação e residual (kg kg^{-1}), respectivamente.

$$\sigma = \chi h \quad (6)$$

em que: χ é o grau de saturação ($\chi = Ug - Ug_{res} / Ug_{sat} - Ug_{res}$) e h é a tensão de água no solo, calculada a partir de:

$$h(\chi) = \frac{1}{\alpha} \left(\chi^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

em que: α é parâmetro da curva de retenção de água no solo, ajustada conforme GENUCHTEN (1980).

BUSSCHER et al. (1997) verificaram que as três equações apresentadas a seguir, foram eficientes em prever a resistência do solo à penetração, para solos desenvolvidos sob influência de clima temperado:

$$RP = aUg^b \quad (8)$$

$$RP = a(1 - Ug)^b \quad (9)$$

$$RP = ae^{bUg} \quad (10)$$

em que: e representa a base dos logaritmos naturais.

Há muitos trabalhos em que a estimativa da resistência do solo à penetração é obtida a partir de outros atributos do solo. No entanto, são poucos os trabalhos que se propõem a estudar o efeito isolado do conteúdo de água na resistência do solo à penetração, e, mais escassos ainda são trabalhos desenvolvidos a partir de dados obtidos em solos desenvolvidos sob condições de clima tropical, como os do Brasil.

ROSOLEM et al. (1999) traçou a relação da resistência do solo a penetração em função do potencial de água no solo a partir da seguinte equação:

$$RP = a + \frac{b}{h} \quad (11)$$

Foram obtidos coeficientes de determinação iguais a 99% ($R^2 = 0,99$) a partir de amostras de solo com diferentes granulometrias preparadas artificialmente (220 a 480 g kq^{-1} de argila).

Contudo, LIMA et al. (2006) descrevendo essa relação em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico de textura franco-arenosa, no município de Piracicaba,

obtiveram R^2 de 0,71 e 0,66 para a resistência do solo à penetração avaliada em laboratório e em campo, respectivamente, a partir do ajuste de equações do tipo:

$$RP = aUg^{-b} \quad (12)$$

Trabalhos que se propõem a estudar a curva de resistência do solo à penetração são relevantes, pois favorecem o entendimento das propriedades mecânicas do solo que influenciam a compactação, contribuindo para a identificação das condições físicas do solo limitantes à produtividade das culturas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em laboratório, no Departamento de Solos e Adubos, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP), Jaboticabal, SP. As classes de solos utilizadas foram: Neossolo Quartzarênico (RQ), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho Acriférico (LVwf), conforme EMBRAPA (2006).

Os solos foram amostrados na camada de 0-0,20 m (horizonte Ap) e a composição granulométrica desses foi determinada pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986) e o conteúdo de matéria orgânica foi quantificado de acordo com RAIJ et al. (1987). Os óxidos de Fe e Al foram extraídos por ataque sulfúrico (CAMARGO et al., 1986). Os resultados desses atributos estão contidos na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos dos solos

Solo	AMG	AG	AM	AF	AMF	AT	Silte	Argila	MO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
	-----g kg ⁻¹ -----								-----dag kg ⁻¹ -----		
RQ	0	23	233	477	117	855	33	117	0,5	1,2	3,5
PVA	0	110	310	290	143	853	57	90	1,8	1,2	2,5
LVd	0	43	220	320	63	646	47	307	1,4	5,3	9,5
LVwf	0	10	37	97	40	184	61	755	4,0	24,4	22,3

*AMG: areia muito grossa (2,0-1,0 mm); AG: areia grossa (1,0-0,5 mm); AM: areia média (0,50-0,25 mm); AF: areia fina (0,250-0,105 mm); AMF: areia muito fina (<0,105 mm); AT: areia total; MO: matéria orgânica do solo.

Colunas de PVC, com dimensões de 0,25 m de diâmetro e 0,60 m de altura, foram preenchidas com amostras do horizonte Ap de cada solo (seco ao ar e passado em peneira de 4 mm), de modo a obter diferentes densidades: solo não compactado (D1) e compactado (D2). Para a D1, as colunas foram apenas preenchidas com os solos, sem compactação. A partir dos resultados das densidades desses solos, um valor 20% maior de densidade foi estimado, a partir do qual foi determinada uma massa (kg) a fim de se proceder a compactação do solo para a D2. Então, para que o solo se

acomodasse dentro do volume predeterminado, esse foi colocado aos poucos dentro das colunas, batendo-se algumas vezes sobre lençol de borracha de 5 mm de espessura; repetindo-se esta operação, até o nivelamento do solo com o traço do aferimento do volume.

O conteúdo de água no solo, inicialmente elevado até a saturação, foi avaliado diariamente nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, através de um medidor eletrônico composto pelo Profile Probe PR2 acoplado ao Moisture Meter HH2 (Figura 1) e convertido à base gravimétrica (U_g) através da densidade do solo.

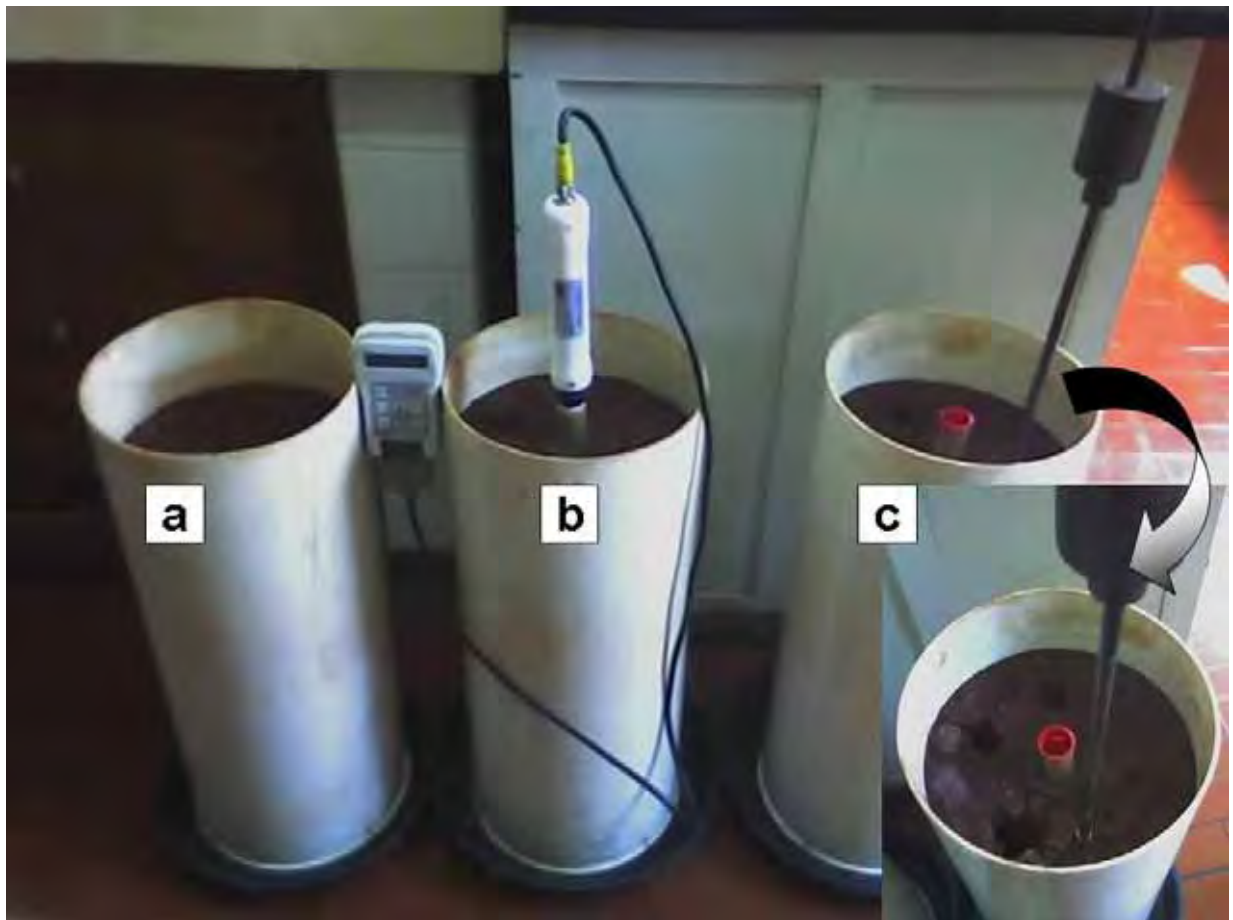


Figura 1. Foto ilustrativa das colunas de PVC (a), do medidor eletrônico do conteúdo de água, Profile Probe PR2 acoplado ao Moisture Meter HH2 (b) e do penetrômetro de impacto (c).

Foram realizadas leituras da resistência do solo à penetração (RP) em diferentes conteúdos de água. A RP foi quantificada também nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, através de um penetrômetro de impacto (STOLF, 1991), adaptado para vaso, que apresenta as seguintes características: área da base com 1,25 cm²; altura de queda variando de 0,05 a 0,40 m (conforme necessário); massa do êmbolo, ou seja, massa que provoca o impacto igual a 1,02 kg e massa dos demais componentes do penetrômetro sem o êmbolo de 0,57 kg, conforme representado na Figura 2.

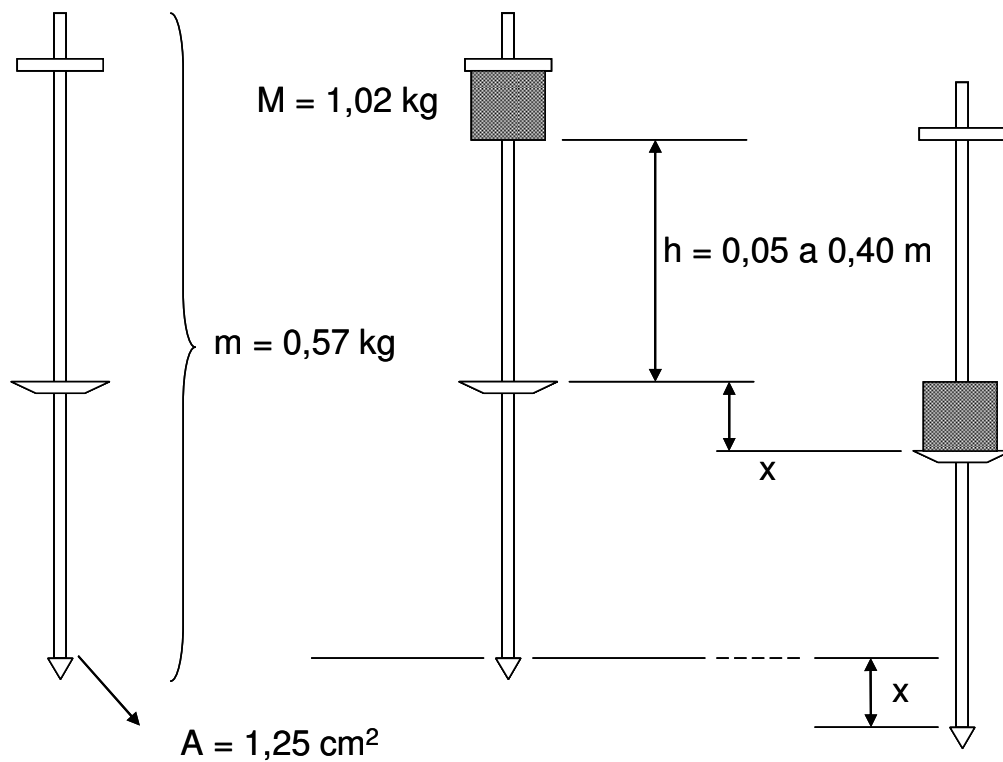


Figura 2. Características do penetrômetro de impacto utilizado (adaptado de STOLF, 1991).

A transformação dos valores da penetração da haste do aparelho no solo (impactos/cm) em RP (MPa) foi feita segundo STOLF (1991):

$$RP \text{ (kgf cm}^{-2}\text{)} = \frac{(Mg + mg) + \frac{M}{M + m} * Mg * h/x}{A} \quad (13)$$

em que: RP é a resistência do solo à penetração em kgf cm^{-2} ($\text{kgf cm}^{-2} * 0,098 = \text{MPa}$); M é a massa que provoca o impacto (kg); m corresponde à massa dos demais componentes do penetrômetro excluía a de impacto (kg); $M+m$ é a massa total do aparelho (kg); g equivale a aceleração da gravidade; Mg e mg são os pesos das massas consideradas; h é a altura de queda da massa que provoca o impacto (cm); x corresponde a penetração ocasionada por ação do impacto (impacto/cm), e A a área da base do cone (cm^2) (Figura 2).

Foram coletadas ainda, amostras indeformadas por meio de cilindros de $53,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$, que foram saturadas e submetidas às tensões de 0,001; 0,006; 0,01; 0,033; 0,06; 0,1 e 0,3 MPa, em câmaras de Richards (KLUTE, 1986). Nessas amostras foi determinado o conteúdo de água retido em cada tensão (KLUTE, 1986), a densidade do solo, segundo BLAKE & HARTGE (1986), a microporosidade por secagem (tensão de 0,006 MPa), em câmaras de pressão de Richards com placa porosa (KLUTE, 1986), a porosidade total, conforme DANIELSON & SUTHERLAND (1986). A macroporosidade foi calculada como sendo a diferença entre a porosidade total e a microporosidade (Tabela 2).

As curvas de retenção de água foram ajustadas pelo modelo proposto por GENUCHTEN (1980), a partir do qual foi obtido o conteúdo de água retido na capacidade de campo (tensão de 0,006 MPa) e no ponto de murcha permanente (tensão de 1,5 MPa) (Figura 3 e Tabela 3):

$$Ug = \frac{(Ug_{sat} - Ug_{res})}{[1 + (\alpha h)^n]^m} + Ug_{res} \quad (14)$$

em que: Ug representa o conteúdo de água (kg kg^{-1}), Ug_{sat} e Ug_{res} são o conteúdo de água na saturação e residual (kg kg^{-1}), respectivamente, α , n e m são os parâmetros da equação e h é a tensão de água no solo (MPa).

Para o ajuste entre a RP e o Ug utilizou-se o software Microcal Origin 6.0. Dessa forma, obtiveram-se as curvas de resistência do solo à penetração (CRP) que foram então submetidas ao Teste F, utilizando-se para esse fim o aplicativo Statgraphics Plus 6.0.

Tabela 2. Valores médios de densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo, nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, nas diferentes densidades

Solos	Camadas					
	0-0,10 m		0,10-0,20 m		0,20-0,30 m	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
	Densidade do solo (Mg m^{-3})					
RQ	1,49	1,77	1,55	1,70	1,52	1,74
PVA	1,37	1,60	1,34	1,53	1,32	1,57
LVd	1,32	1,58	1,30	1,54	1,27	1,60
LVwf	1,13	1,29	1,12	1,33	1,10	1,32
	Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
RQ	0,40	0,36	0,39	0,38	0,42	0,37
PVA	0,50	0,41	0,48	0,46	0,48	0,45
LVd	0,49	0,44	0,52	0,47	0,52	0,45
LVwf	0,61	0,57	0,61	0,56	0,63	0,58
	Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
RQ	0,22	0,12	0,20	0,16	0,25	0,14
PVA	0,31	0,18	0,30	0,26	0,31	0,21
LVd	0,21	0,14	0,23	0,19	0,25	0,15
LVwf	0,13	0,09	0,13	0,06	0,17	0,08
	Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)					
RQ	0,18	0,24	0,19	0,22	0,17	0,23
PVA	0,19	0,23	0,18	0,21	0,17	0,23
LVd	0,28	0,30	0,29	0,28	0,27	0,31
LVwf	0,48	0,48	0,48	0,50	0,46	0,50

*D1: menor densidade do solo; D2: maior densidade do solo; RQ: Neossolo Quartzarênico; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; LVd: Latossolo Vermelho Distrófico e LVwf: Latossolo Vermelho Acriférrico.

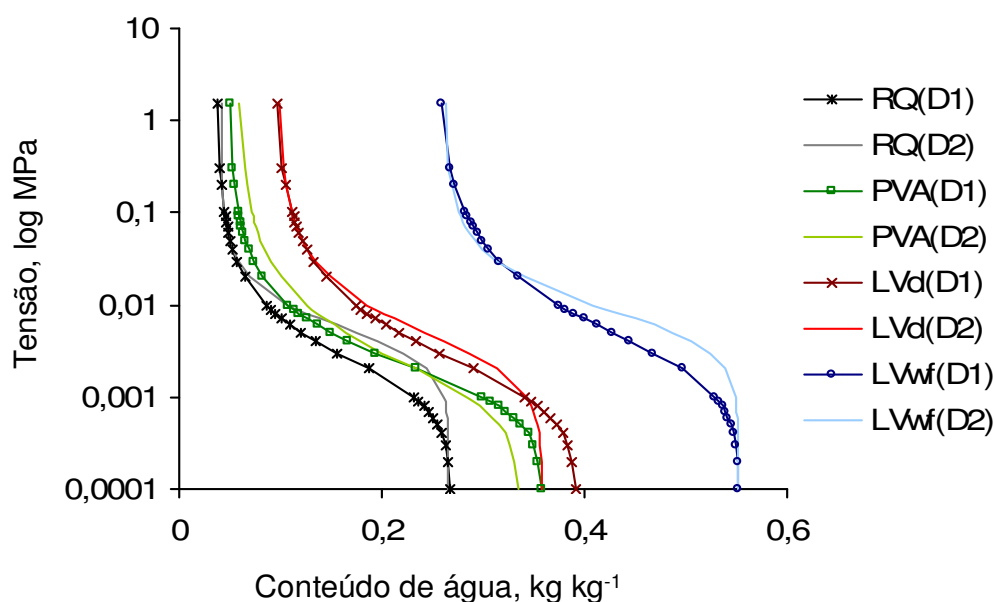


Figura 3. Curvas de retenção de água dos solos: Neossolo Quartzarênico (RQ), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho Acriférico (LVwf), nas diferentes densidades (D1 e D2).

Tabela 3. Parâmetros da equação da curva de retenção de água ajustada para os solos em diferentes densidades

Solo	Densidades dos solos	$U_{g_{sat}}$	$U_{g_{res}}$	A	n	m
RQ	D1	0,038	0,267	0,064	1,837	0,456
	D2	0,041	0,266	0,024	2,289	0,563
PVA	D1	0,050	0,359	0,076	1,823	0,451
	D2	0,057	0,336	0,079	1,667	0,400
LVd	D1	0,093	0,393	0,074	1,648	0,393
	D2	0,098	0,358	0,034	1,849	0,459
LVwf	D1	0,252	0,553	0,041	1,611	0,379
	D2	0,262	0,552	0,016	2,092	0,522

*RQ: Neossolo Quartzarênico; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; LVd: Latossolo Vermelho Distrófico e LVwf: Latossolo Vermelho Acriférico; D1: menor densidade do solo; D2: maior densidade do solo; $U_{g_{sat}}$ e $U_{g_{res}}$ são o conteúdo de água na saturação e residual (kg kg⁻¹), respectivamente; α , n e m são os parâmetros da equação da curva de retenção de água, ajustada segundo GENUCHTEN (1980).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 estão representadas as regressões não lineares entre a resistência do solo à penetração (RP) e o conteúdo gravimétrico de água no solo (Ug). A RP foi significativamente relacionada com o Ug para todos os solos, nas diferentes densidades ($p < 0,0001$). Houve diminuição exponencial da RP com incremento no Ug, como também demonstrado por ROSOLEM et al. (1999), IMHOFF et al. (2000), FREDDI et al. (2006), HOLLAND (2006) e LIMA et al. (2006). Segundo LARSON et al. (1980), esse fato ocorre porque a água atua como “lubrificante” entre as partículas de solo diminuindo a força de coesão entre as mesmas. Esse processo é favorecido pelo aumento do Ug, ou seja, quanto maior for o Ug, menor será a resistência oferecida pelo solo à penetração das raízes e conforme CAMARGO (1983), o alongamento radicular só é possível quando a pressão de crescimento das raízes for maior do que a RP oferecida pelo solo.

A relação entre a resistência do solo à penetração e o conteúdo de água foi descrita pelo modelo exponencial decrescente, representado pela seguinte equação:

$$RP = a + be^{-\frac{Ug}{c}} \quad (15)$$

em que: *RP* representa a resistência do solo à penetração (MPa); *Ug* o conteúdo gravimétrico de água no solo (kg kg^{-1}), e *a*, *b* e *c* são os parâmetros da equação.

Considerando o coeficiente de determinação das regressões ($R^2 \geq 79$), verifica-se que a RP pode ser estimada a partir do Ug, a partir da equação 15. FIDALSKI & TORMENA (2007) e LIMA et al. (2007) obtiveram para o ajuste dos dados de RP em função dos valores de densidade do solo e Ug, coeficientes de determinação iguais a 0,87 e 0,83 para um Argissolo Vermelho Distrófico latossólico e para um Argissolo Vermelho Distrófico arênico, respectivamente. Ainda LIMA et al. (2006), estudando um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura franco-arenosa, obtiveram para essa relação,

ou seja, para a curva de resistência do solo à penetração (CRP), $R^2 = 0,71$, com a RP mensurada em laboratório (penetrômetro eletrônico) e $R^2 = 0,66$ quando a RP foi determinada a campo, com o auxílio de um penetrômetro estático, evidenciando que a maneira de obtenção da RP (campo ou laboratório) não influenciou a CRP.

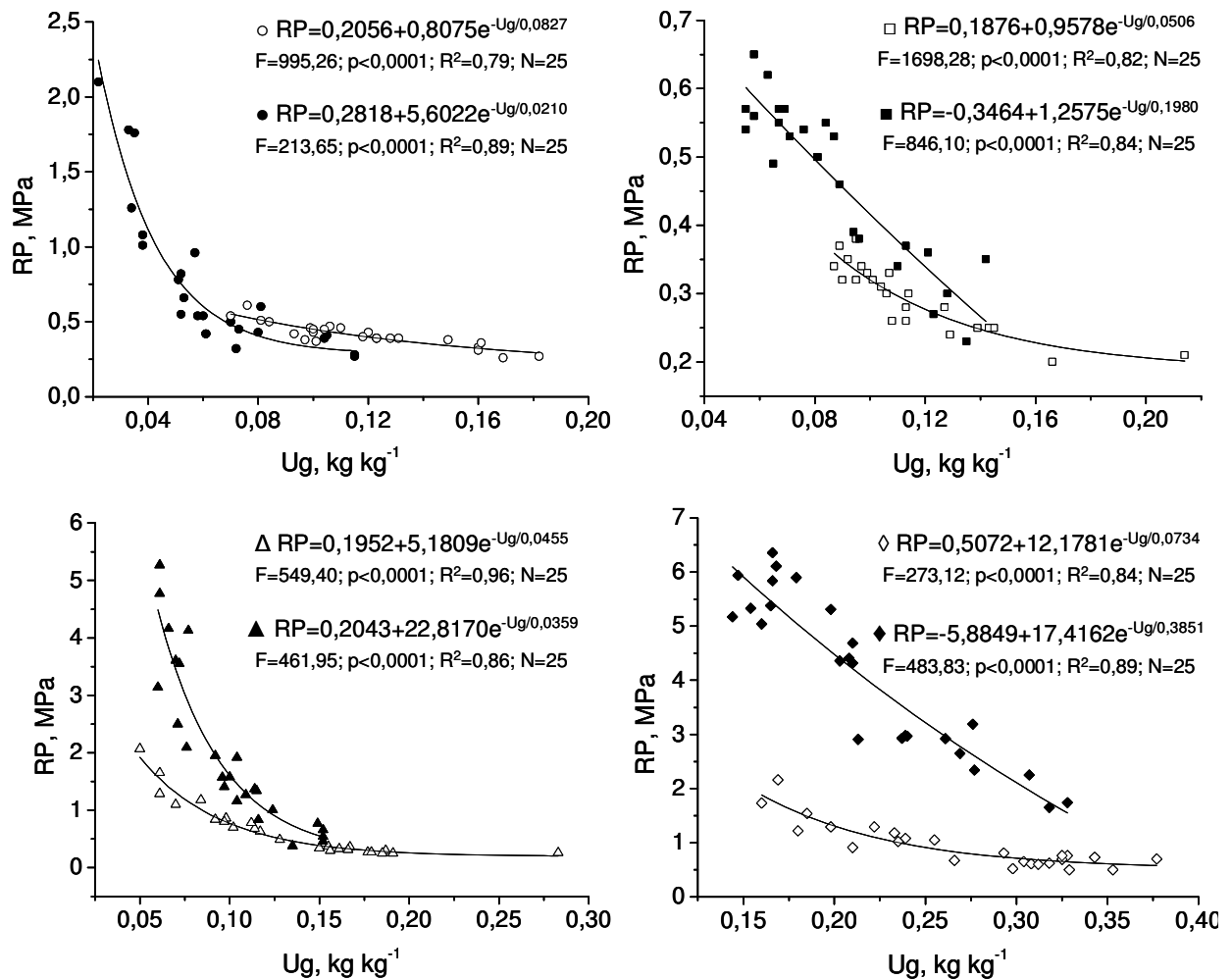


Figura 4. Curvas de resistência dos solos à penetração: Neossolo Quartzarênico (○), Argissolo Vermelho-Amarelo (□), Latossolo Vermelho Distrófico (△) e Latossolo Vermelho Acriférico (◇), nas diferentes densidades (○ D1 e ◆ D2).

O parâmetro a desse modelo representa a assíntota horizontal da curva (em que $RP=a$). É o menor valor de RP que se mantém constante a partir de um determinado U_g . Para todos os solos, nas diferentes densidades, esse valor se dá em valores do U_g a partir da capacidade de campo (tensão $\leq 0,006$ MPa). Esse processo ocorre devido às forças de coesão e adesão que atuam nos solos. A coesão se dá pela atração entre os componentes do solo. A adesão, por sua vez, é resultante da tensão superficial, dependendo, portanto, da presença de água, sendo inversamente relacionada com o diâmetro capilar, atingindo o máximo de expressão quando o menisco apresenta o máximo de curvatura. Assim, a adesão é mínima ou praticamente inexistente quando o solo está seco. Neste momento, apenas as forças de coesão estão atuando. Conforme vai aumentando o U_g , a coesão desaparece e há um aumento gradual da adesão, até que um menisco de maior curvatura se forme. A partir desse ponto, acréscimos no U_g diminuem progressivamente a tensão superficial, ou seja, a adesão chega a ser praticamente inexistente no solo saturado (OLIVEIRA, 2001). Isso explica em grande parte, o comportamento da RP junto à assíntota horizontal da CRP. Dessa forma, muitos pesquisadores têm realizado as medidas de RP com o U_g estando próximo à capacidade de campo (ARSHAD et al., 1996; BEUTLER et al., 2002; FREDDI et al., 2006), pois segundo ARSHAD et al. (1996) e SILVA et al. (1994) nessa situação é obtida boa correlação desse atributo com o crescimento radicular das plantas.

De acordo com a definição do modelo ajustado, a expressão $\frac{-b}{c}$ determina a inclinação da curva nos menores valores de U_g . Logo, verifica-se que, quanto maior é o conteúdo de argila no solo, maior é o parâmetro B da equação (Figura 4), ou seja, maior é a influência do U_g na RP . Assim sendo, de maneira decrescente, os solos se distribuíram da seguinte maneira em relação à influência que a redução do U_g exerce na RP : $LVwf > LVd > PVA > RQ$. Esse fato pode ser explicado pela mineralogia desses solos, ou seja, o $LVwf$ é rico em óxidos de ferro e alumínio, os quais são responsáveis pela sua microagregação e estruturação (maior porosidade total, Tabela 2), conferindo a essa classe de solos características diferenciadas quanto à retenção de água (Figura 3), o que reflete diretamente na ampla variação da RP . Nesse sentido,

ROSOLEM et al. (1999) observaram que essa variação, ou seja, da RP com o Ug, foi maior nos solos com mais de 400 g kg^{-1} de argila. Em todos os solos, esse segmento da curva (porção exponencial) se expressa a partir da capacidade de campo, a tensões maiores que $0,006 \text{ MPa}$, conforme observado também por ROSOLEM et al. (1999). Dessa forma, presume-se que quanto maior for o valor de B (maior conteúdo de argila no solo), menor será o intervalo do Ug, sem que haja valores de RP restritivos ao desenvolvimento radicular das plantas, ou seja, para um adequado crescimento radicular, o Ug deverá ser mantido próximo à capacidade de campo. Assim, KLEIN & CÂMARA (2007) observaram que, antes mesmo que o solo se apresente impeditivo às plantas por deficiência hídrica (ponto de murcha permanente), o desenvolvimento radicular já encontra restrições devido à impedância do solo ocasionada pela diminuição no Ug, em um Latossolo Vermelho Distrófico muito argiloso (610 g kg^{-1} de argila).

Realizando-se novos ajustes para cada solo, nas diferentes densidades, verifica-se que esse comportamento se mantém, ou seja, o maior valor do parâmetro B foi apresentado igualmente, na equação ajustada para o LVwf ($B=20,9$) (Figura 5), o qual possui maior conteúdo de argila e matéria orgânica dentre os demais solos (Tabela 1). Contudo, os novos modelos ajustados para o LVd e para o LVwf, nas diferentes densidades, explicaram apenas 62 e 57% ($R^2=0,62$ e $0,57$) da variação da RP, respectivamente. BUSSCHER et al. (1997) também não alcançaram ajustes satisfatórios quando a CRP foi traçada a partir de dados obtidos em diferentes sistemas de manejo do solo. Segundo esses pesquisadores, a correção dos dados de RP pode carecer de várias equações, baseadas em cada tratamento (diferentes condições de densidade), pois apenas uma simples equação pode não ajustar aos dados de todos os tratamentos.

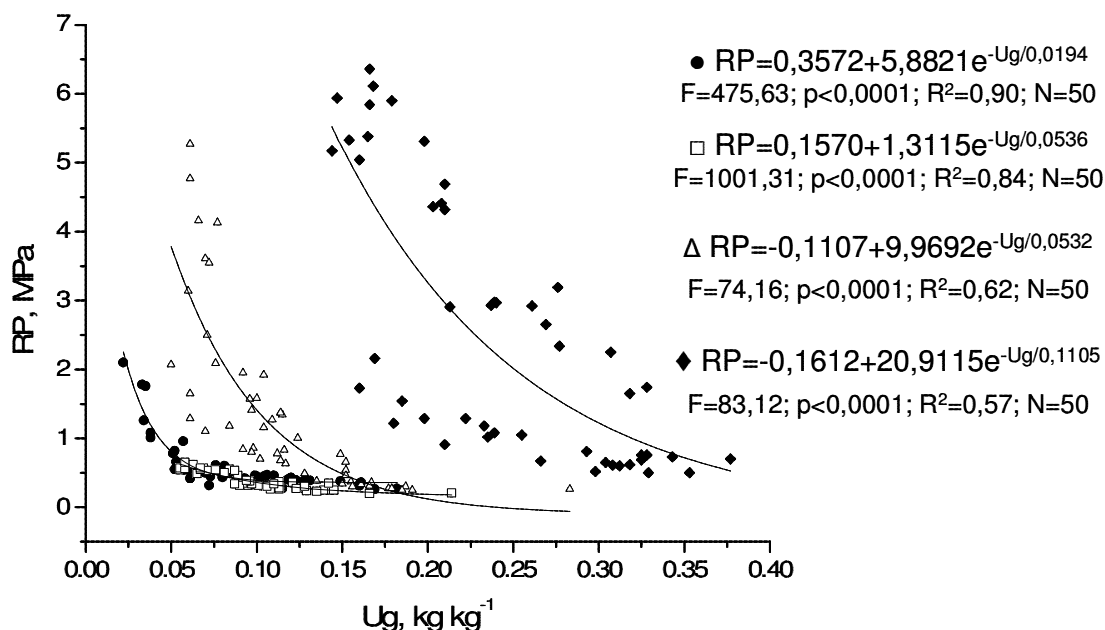


Figura 5. Curvas de resistência dos solos à penetração: Neossolo Quartzarênico (●), Argissolo Vermelho-Amarelo (□), Latossolo Vermelho Distrófico (△) e Latossolo Vermelho Acriférico (◆), nas diferentes densidades.

A Tabela 4 traz a análise descritiva dos dados de RP e Ug para todos os solos, nas diferentes densidades. Os altos coeficientes de variação representam a amplitude de variação do Ug e a influência desse atributo nos valores de RP. Também FREDDI et al. (2006) e LIMA et al. (2006) obtiveram elevados coeficientes de variação ao traçar essa relação, salientando a importância da padronização do Ug na determinação e interpretação da RP.

Os solos de textura arenosa apresentaram valores máximos observados de RP de 2,10 MPa para o RQ e 0,65 MPa para o PVA, mesmo estando os solos em condições de baixo Ug e maiores densidades (Tabela 4). Verifica-se que há uma pequena faixa de RP, o que pode ser atribuído às características físico-hídricas desses solos, como a retenção de água (Figura 3), conteúdo de matéria orgânica (Tabela 1), e também à estruturação dos mesmos (Tabela 2). E, de acordo com SILVA (1999), os solos com pequena variação no tamanho das partículas constituintes, são menos susceptíveis ao processo de compactação, quando comparados àqueles onde há uma grande variação nos tamanhos das partículas, devido ao fato das partículas de

tamanhos diferentes se arranjam e preenchem os poros do solo, quando submetidas a uma pressão. SOUZA et al. (2005) encontraram em um Neossolo Quartzarênico sob cerrado, RP igual a 0,50 MPa, quando o mesmo apresentava Ug igual a 0,09 kg kg⁻¹. SILVA et al. (2005) também obtiveram valores baixos de RP, para um Argissolo Vermelho textura média, que variaram de 0,22 a 0,75 MPa, em conteúdos de água de 0,22 a 0,17 kg kg⁻¹, em diferentes sistemas de manejo e profundidades analisadas. O maior valor de RP encontrado por ABREU et al. (2004), em um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco-arenosa foi de 1,60 MPa, no tratamento sob cultivo mínimo, com Ug de 0,13 kg kg⁻¹. Contudo, esses autores afirmam que a RP é mais sensível em detectar a compactação do que a densidade ou a porosidade do solo.

Tabela 4. Média, desvio-padrão, valores (mínimo e máximo) e coeficiente de variação (CV) das variáveis analisadas para o Neossolo Quartzarênico (RQ), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e para o Latossolo Vermelho Acriférico (LVwf) em diferentes densidades

Solos	Densidades dos solos	Variável	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	CV
							%
RQ	D1	Ug	0,12	0,03	0,07	0,18	26,13
		RP	0,41	0,08	0,26	0,61	19,31
	D2	Ug	0,06	0,03	0,02	0,12	23,97
		RP	0,75	0,50	0,27	2,10	16,01
PVA	D1	Ug	0,12	0,03	0,09	0,21	40,64
		RP	0,29	0,05	0,20	0,38	71,97
	D2	Ug	0,09	0,03	0,06	0,14	23,38
		RP	0,47	0,12	0,23	0,65	44,26
LVd	D1	Ug	0,13	0,05	0,05	0,28	42,06
		RP	0,67	0,48	0,25	2,07	66,19
	D2	Ug	0,10	0,03	0,06	0,15	29,33
		RP	2,06	1,44	0,38	5,27	24,61
LVwf	D1	Ug	0,27	0,06	0,16	0,38	30,10
		RP	0,94	0,42	0,50	2,16	69,90
	D2	Ug	0,22	0,06	0,14	0,33	25,59
		RP	4,11	1,50	1,65	6,36	36,43

*D1: menor densidade do solo; D2: maior densidade do solo; Ug: conteúdo de água (kg kg⁻¹); RP: resistência do solo à penetração (MPa).

Todavia, tanto o LVd quanto o LVwf apresentaram valores maiores de RP, em maior densidade e em Ug mais baixos, comparado aos solos mais arenosos (Tabela 4). Para o LVd, o maior valor de RP foi de 5,27 MPa; para o LVwf esse valor foi de 6,36 MPa. O LVd possui mineralogia caulinítica que confere a esse solo aspecto maciço e coeso (BEUTLER & CENTURION, 2003) e o LVwf é rico em óxidos de ferro e alumínio, responsáveis pela sua microagregação e estruturação, o que os diferenciam dos solos de textura arenosa.

TORMENA et al. (1998) constataram que valores de RP restritivos ao crescimento das plantas (> 2 MPa) podem ser encontrados sob baixos valores de densidade do solo, tendo como fator preponderante o Ug, num Latossolo Vermelho, muito argiloso (800 g kg^{-1} de argila), sob sistema de semeadura direta. Valores em torno de 4,0 e 2,0 MPa de RP foram encontrados por TORMENA et al. (2002) em um Latossolo Vermelho, textura média, relativamente seco, com conteúdos de água de 0,15 e $0,14 \text{ kg kg}^{-1}$, sob semeadura direta e sob cultivo convencional, respectivamente. No entanto, nesse mesmo solo, só que na capacidade de campo ($0,17 \text{ kg kg}^{-1}$), houve diminuição da RP para 2,3 MPa no sistema de semeadura direta e para 1,0 MPa aproximadamente, no preparo convencional. Esses pesquisadores concluíram que no solo sob condições mais úmidas, os valores de RP podem ser considerados não impeditivos para o preparo convencional, e pouco impeditivos para o plantio direto, e que, com o secamento do solo, os valores podem atingir níveis altamente impeditivos, especialmente sob o sistema de semeadura direta.

Estudando classe de solo semelhante, ARAÚJO et al. (2004), também constataram que a RP, quantificada sob mata nativa, somente atinge valores considerados críticos ao crescimento das raízes, em Ug muito baixos ($< 0,10 \text{ kg kg}^{-1}$), e em valores de densidade elevados (acima de $1,56 \text{ Mg m}^{-3}$). Esses pesquisadores verificaram que os valores de RP foram muito semelhantes tanto para o solo sob mata, quanto para o solo sob cultivo, mesmo que a menor densidade nesse sistema corresponda à maior densidade do solo sob mata, constatando a grande influência do Ug. Do mesmo modo, LIMA et al. (2007) constataram que, com o aumento do Ug,

valores maiores de densidade do solo são possíveis sem que seja superada a RP, crítica ao desenvolvimento radicular.

Observando as Figura 5, verifica-se que os solos de textura mais grosseira (RQ e PVA) apresentaram comportamentos semelhantes. Realizou-se então, um novo ajuste representativo dessas classes de solos, a partir do qual se obteve uma regressão com elevado coeficiente de determinação ($R^2=0,89$) (Tabela 5).

Tabela 5. Resultados da análise de regressão não linear da resistência do solo à penetração em função do conteúdo de água, com base gravimétrica, para o Neossolo Quartzarênico e para o Argissolo Vermelho-Amarelo nas diferentes densidades

Parâmetro	Valor estimado	Erro-padrão	R^2	Probabilidade
<i>a</i>	0,3161	0,0165	0,89	<0,0001
<i>b</i>	5,5209	0,5305		
<i>c</i>	0,0207	0,0012		

Todavia, o modelo não se ajustou aos dados quando foram agrupadas as quatro classes de solos ($R^2<0,19$). TO & KAY (2005) obtiveram um R^2 igual a 0,47 com o ajuste dos dados realizado a partir de solos de várias classes texturais. Entretanto, o valor do R^2 aumentou a partir do ajuste de dados obtidos em solos de classes texturais semelhantes, num trabalho desenvolvido em laboratório a partir de amostras indeformadas coletadas em campo. Esta diferenciação, conforme o teor de argila, também foi observada por ROSOLEM et al. (1999).

Os resultados comprovam a grande influência do Ug na determinação da RP. Por esse motivo e também por falta de métodos adequados, muitos pesquisadores preconizam que a determinação da RP deve ser realizada com o Ug estando próximo à capacidade de campo, visto que a partir desse ponto (tensão $\leq 0,006$ MPa) essa relação de dependência é menor. A correção dos valores de RP obtidos em diferentes Ug pode reduzir ou eliminar o efeito desse atributo na determinação e interpretação dos resultados obtidos.

Nesse sentido, a CRP representa uma ferramenta viável, pois o Ug é um atributo de fácil mensuração e de grande acessibilidade; e, os resultados deste estudo indicaram que a RP pode ser estimada a partir desse atributo. Portanto, esta é uma alternativa muito útil, que pode ser utilizada para contornar as dificuldades, o que permitirá o monitoramento das condições qualitativas do solo durante o ciclo das culturas, assegurando a produtividade das mesmas.

Desse modo, funções de pedotransferência podem ser utilizadas para a correção dos valores de RP obtidos em diferentes Ug, o que possibilita a padronização desse atributo e a sua correta interpretação.

Pesquisas complementares serão necessárias para a validação das funções de pedotransferência elaboradas, a fim de que essas venham a ser testadas em campo.

5. CONCLUSÕES

Quanto maior o conteúdo de argila, maior foi a influência que o conteúdo de água exerceu na resistência do solo à penetração.

A relação entre a resistência do solo à penetração e o conteúdo de água foi descrita pelo modelo exponencial decrescente, representado pela equação:

$$RP = a + be^{-\frac{Ug}{c}}$$

em que: RP representa a resistência do solo à penetração (MPa), Ug o conteúdo gravimétrico de água (kg kg^{-1}) e a , b e c são os parâmetros da equação.

As equações ajustaram-se aos dados com coeficientes de determinação variando entre 0,57 a 0,96.

A correção dos dados de resistência do solo à penetração pode carecer de várias equações baseadas em diferentes condições de granulometria e densidade.

6. REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p. 519-531, 2004.

AGGARWAL, P.; CHOUDHARY, K. K.; SINGH, A. K.; CHAKRABORTY, D. Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management. **Geoderma**, Amsterdam, v.136, p.353-363, 2006.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.337-345, 2004.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.) **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141 (SSSA Special publication 49).

AYERS, P. D.; PERUMPRAL, J. V. Moisture and density effect on cone index. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v.25, p.1169-1172, 1982.

BAILEY, A. C.; JOHNSON, C. E.; SCHAFER, R. L. A model for agricultural soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.33, p.257-262, 1986.

BENGOUGH, A. G.; CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: DEKKEE, M. 2 ed. **Soil and environment analysis: physical methods**, 2001. p.377-403.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, London, v.41, p.341-358, 1990.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 849-856, 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; SILVA, A. P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.787-794, 2006.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois latossolos. **Irriga**, Botucatu, v.9, p.181-192, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, p.191-199, 2002.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. part 1, p.377-382.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flatipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v.33, p.519-523, 1990.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.43, p.205-217, 1997.

CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 44p.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).

CUNHA, J. P. A. R.; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, p.1-4, 2002.

DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part 1, p.443-461.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.201-214, 2004a.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.215-226, 2004b.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.227-239, 2004c.

DEXTER, A. R.; CZYŻ, E. A.; GATE, O. P. A method for prediction of soil penetration resistance. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.93, p.412-419, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306p.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, p.1316-1322, 2007.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, p.947-953, 2003.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G. J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia agrícola**, Jaboticabal, v.26, p.113-121, 2006.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.627-636, 2007.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part. 1. p.383-411.

GENUCHTEN, M. T. A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-897, 1980.

HOLLAND, J. E. **Changes in soil physical properties under raised bed cropping**. 2007. 274f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Universidade de Melbourne, Melbourne, 2007.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, p.1493-1500, 2000.

KLEIN, V. A.; CÂMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.221-227, 2007.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part. 1, p.635-662.

LAPEN, Q. R.; TOPP, G. C.; EDWARDS, M. E.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Combination cone penetration resistance/water content instrumentation to evaluate cone penetration-water content relationships in tillage research. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.79, p.51-62, 2004.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.450-457, 1980.

LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho Distrófico arênico. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, p.1166-1169, 2007.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.217-223, 2006.

NEIRO, E. S.; MATA, J. D. V.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A.; PINTRO, J. C.; COSTA, J. M. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho distroférico, com rotação e sucessão de culturas, sob plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.25, p.19-25, 2003.

OLIVEIRA, J.B. **Pedologia aplicada**. Jaboticabal, Funep, 2001. 414p.

PASSIOURA, J. B. Soil condiction and plant growth. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.25, p.311-318, 2002.

RAIJ, B.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, p.821-828, 1999.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, p.1775-1781. 1994.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; MIELNICZUK, C. B. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, p.544-552, 2005.

SILVA, M. L. L. **Modelagem matemática na estimativa da densidade de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa, pelo índice de cone**. 1999. 161f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, p.1135-1139, 2005.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.229-235, 1991.

TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength root penetration for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.102, p.18-22, 1966.

TO, J.; KAY, B. D. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. **Geoderma**, Amsterdam, v.126, p.261-276, 2005.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.59, p.795-801, 2002.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.1023-1031, 2004.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.333-339, 1996.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.573-581, 1998.

WHALLEY, W. R.; LEEDS-HARRISON, P. B.; CLARK, L. J.; GOWING, D. J. G. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.84, p.18-27, 2005.