Getulio Coutinho Figueiredo
Engenheiro Agrônomo

Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo

Orientador:
Prof. Dr. **ALVARO PIRES DA SILVA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

**Piracicaba
2010**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Figueiredo, Getulio Coutinho

Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo / Getulio Coutinho Figueiredo . - -
Piracicaba, 2010.

163 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.

1. Compactação do solo 2. Compressibilidade dos solos 3. Física do solo 4. Resistência
dos solos 5. Solo - Qualidade I. Título

CDD 631.43
F475a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Getulio Coutinho Figueiredo
Engenheiro Agrônomo

Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo

Orientador:
Prof. Dr. **ALVARO PIRES DA SILVA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

**Piracicaba
2010**

A Deus

Aos meus pais Getúlio e Iza (*in memoriam*), pelo carinho, apoio e incentivo.

Aos meus irmãos Geilson e Geíza, pela presença em minha vida.

Aos amigos Waldir e Jeanny, por tudo, sempre solícitos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Aos docentes desta Instituição, em especial ao Dr. Alvaro Pires da Silva, ao Dr. Paulo Leonel Libardi e ao Dr. Sergio Oliveira Moraes.

Aos docentes, os Drs. Cássio A. Tormena (UEM), Neyde F. B. Giarola (UEPG), Tairone P. Leão (UnB), Silvia del C. Imhoff (Universidad Nacional del Litoral), Raphael B. A. Fernandes (UFV), Vilson A. Klein (UPF), Brivaldo G. de Almeida (UFRPE) e ao pesquisador Dr. Guilherme K. Donagemma (EMBRAPA).

Aos discentes Jaedson C. A. Mota, Alexsandro dos S. Brito, Pablo J. Ghiberto, Fernando J. Garbuio, Raul S. Toma, Raphael M. Beirigo, Rodrigo C. da Silva, João C. Medeiros, Renata S. Momoli, Cintia M. Lopes, Tatiana F. Ritti e Aline R. de Carvalho...

Às Instituições financiadoras CAPES e CNPq.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Qualidade do solo e seus indicadores	17
2.2 Algumas propriedades físicas indicadoras da qualidade do solo	18
2.3 Compressão do solo e indicadores da qualidade física	28
2.4 Amostragem de solos	33
Referências	34
3 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRO-MECÂNICO DE COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE ESTRUTURAL DE SOLOS	47
Resumo	47
Abstract	47
3.1 Introdução	48
3.2 Material e Métodos	50
3.2.1 Local, equipamentos e amostragem de solo	50
3.2.2 Determinação das propriedades físicas do solo	52
3.2.3 Análises estatísticas	54
3.3 Resultados e Discussão	56
3.3.1 Aspectos construtivos do amostrador elétrico	56
3.3.2 Protocolo para utilização do amostrador elétrico de solos	57
3.3.3 Experimentação com amostradores de solo	58
3.4 Conclusões	77
Referências	77
4 DESENVOLVIMENTO DE UM PENETRÔMETRO AUTOMATIZADO: INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO NAS DETERMINAÇÕES DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E DE RESISTÊNCIA TÊNSIL DE AGREGADOS	83
Resumo	83

Abstract	83
4.1 Introdução	84
4.2 Material e Métodos	87
4.2.1 Resistência do solo à penetração	87
4.2.2 Resistência tênsil de agregados	88
4.2.3 Análises estatísticas	91
4.2.3.1 Curva de resistência do solo à penetração	91
4.2.3.2 Resistência tênsil de agregados	91
4.2.3.3 Outras análises estatísticas	91
4.3 Resultados e Discussão	93
4.3.1 Aspectos construtivos do equipamento proposto	93
4.3.2 Experimentos para validação do equipamento proposto	98
4.4 Conclusões	109
Referências	110
5 DESENVOLVIMENTO DE UM CONSOLIDÔMETRO PNEUMÁTICO: MODELAGEM DA COMPACTAÇÃO, RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E RESISTÊNCIA TÊNSIL DE AGREGADOS	117
Resumo	117
Abstract	117
5.1 Introdução	118
5.2 Material e Métodos	120
5.2.1 Detalhes construtivos do consolidômetro pneumático	120
5.2.2 Curvas de compressão do solo	123
5.2.3 Resistência mecânica do solo	126
5.2.4 Análises estatísticas	129
5.3 Resultados e Discussão	129
5.4 Conclusões	138
Referências	138
6 PERMEABILIDADE DO SOLO AO AR: AVANÇOS METODOLÓGICOS E MELHORIAS INSTRUMENTAIS DE UM PERMEÂMETRO	145
Resumo	145

Abstract	145
6.1 Introdução	146
6.2 Material e Métodos	147
6.2.1 Equipamento para medição da permeabilidade do solo ao ar.....	147
6.2.2 Determinação da permeabilidade do solo ao ar com o permeâmetro proposto.....	149
6.3 Resultados e Discussão	152
6.4 Conclusões	159
Referências	160

RESUMO

Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo

Os ecossistemas naturais e agropecuários dependem fundamentalmente do solo como recurso básico para sua funcionalidade. Neste contexto, a qualidade do solo tem tido uma crescente importância global. Os objetivos deste estudo consistiram em propor modificações metodológicas e/ou instrumentais visando determinações mais acuradas dos indicadores da qualidade física do solo mediante o desenvolvimento de (i) um sistema eletro-mecânico que permite a obtenção de amostras indeformadas de solos sem aplicação de golpes; (ii) um penetrômetro estático automatizado, de baixo custo e portátil, para medidas de resistência à penetração (RP) e resistência tênsil (RT) sob regime de velocidade constante de $1,55 \text{ mm s}^{-1}$; (iii) um consolidômetro, de baixo custo e de maior portabilidade, para determinações da curva de compressão do solo, da RP e da RT utilizando propulsão pneumática e (iv) melhorias instrumentais em um permeâmetro de carga constante de ar pela redução de oscilações durante a medição do gradiente de pressão bem como a otimização da seleção de diferentes níveis de vazão mássica de ar. Os resultados obtidos mostraram que (i) o sistema eletro-mecânico garantiu a preservação da estrutura do solo em amostras coletadas comparado com a amostragem por golpes, principalmente no solo mais argiloso; (ii) a RP e a RT puderam ser determinadas com elevada acurácia à velocidade constante de $1,55 \text{ mm s}^{-1}$; (iii) a curva de compressão do solo foi sensível às diferenças entre os tratamentos (linha e entrelinha da cultura) e a utilização de propulsão pneumática não influenciou os resultados da RP e da RT e (iv) a instrumentação utilizada no permeâmetro de carga constante de ar permitiu realizar determinações da permeabilidade do solo ao ar tanto em campo quanto em laboratório com rapidez e elevada acurácia.

Palavras-chave: Indicadores da qualidade do solo; Extrator de amostras indeformadas de solo; Compactação do solo; Resistência do solo à penetração; Resistência tênsil de agregados; Pressão de preconsolidação; Índice de compressão

ABSTRACT

Methodological and instrumental advances in soil physics

Natural and agricultural ecosystems rely fundamentally on soil as a basic resource for their functionality. In this context, soil quality has had a growing global importance. The objectives of this study were based on proposing methodological and/or instrumental modifications aiming to obtain more accurate determinations of soil physical quality indicators by developing: (i) an electro-mechanical system that allows the extraction of undisturbed soil samples without mechanical impact (no-hammering); (ii) a low cost and portable static automatic penetrometer, for measuring soil penetration resistance (PR) and tensile strength (TS) at a constant speed of 1.55 mm s^{-1} ; (iii) a low cost and portable consolidometer, for determination of soil compression curve, PR and TS using pneumatic propulsion and (iv) instrumental improvements to a constant head air permeameter by reducing the oscillation during measuring the pressure head gradient and the optimization of the selection of different levels of air mass flow. The results showed that (i) the electro-mechanical system ensured the preservation of soil structure in undisturbed samples in comparison to samples extracted by hammering procedures, especially in clayey soil; (ii) PR and TS could be determined with high accuracy at the constant speed of 1.55 mm s^{-1} ; (iii) the soil compression curve was sensitive to differences between treatments (crop row and inter-row) and the use of pneumatic propulsion did not influence the results of PR and TS, and (iv) the instrumentation used in the constant head air permeameter allowed determination of soil air permeability either on the field or in the laboratory with high speed and accuracy.

Keywords: Indicators of soil quality; Extractor undisturbed samples of soil; Soil compaction; Soil resistance to penetration; Tensile strength of aggregates; Preconsolidation pressure; Compression index

1 INTRODUÇÃO

A compactação é um dos processos que mais afeta a estrutura do solo. Este processo ocorre em um sistema tridimensional, induzido por estresses mecânicos comumente originados do tráfego de máquinas e da ação de implementos agrícolas e/ou do pisoteio de animais, podendo ocasionar deterioração da qualidade física do solo e limitar o potencial de produção agrícola. Os indicadores da qualidade do solo são ferramentas recorrentes para a avaliação da sustentabilidade do uso da terra e das práticas de manejo. Para tanto, várias propriedades têm sido utilizadas para quantificar e descrever as alterações ocorridas nos processos físicos, químicos e biológicos do ecossistema em função de sua exploração agrícola. Muitos dos estudos relacionados à Física, Conservação e Manejo do Solo têm obtido resultados pouco conclusivos ou contraditórios, em parte, devido à utilização de metodologias ineficientes para avaliar a qualidade do solo. Frequentemente, tais metodologias envolvem determinações de propriedades físicas em amostras indeformadas, que são submetidas a diferentes ensaios laboratoriais visando a quantificação de indicadores da qualidade do solo. Neste contexto, pode-se elaborar como hipótese que a melhoria da amostragem de solos bem como das técnicas laboratoriais relacionadas à determinação das propriedades físicas em amostras indeformadas permite obter resultados mais confiáveis sobre o estado da qualidade estrutural do solo.

Dessa forma, o objetivo geral deste estudo foi propor modificações metodológicas e/ou instrumentais relacionadas à Física do Solo visando determinações mais acuradas de indicadores da qualidade do solo bem como uma maior inclusão de algumas propriedades físicas em rotinas laboratoriais.

Os objetivos específicos, que corresponderam aos diferentes capítulos, foram:

- a) Desenvolver um sistema eletro-mecânico que permite a extração de amostras de solos sem aplicação de golpes e avaliá-lo a partir da determinação de algumas propriedades físicas indicadoras da qualidade do solo;
- b) Desenvolver um penetrômetro estático automatizado, de baixo custo e portátil, e avaliá-lo a partir de determinações de resistência à penetração (RP) em laboratório; ajustar os dados de RP, obtidos com velocidade constante de $1,55 \text{ mm s}^{-1}$, por meio de equações não-lineares em função do teor de água e da densidade do solo e verificar a

similaridade dos coeficientes ajustados com aqueles obtidos em outros trabalhos; avaliar a viabilidade deste equipamento em medir a resistência tênsil de agregados (RT) utilizando uma velocidade constante de compressão igual a $1,55 \text{ mm s}^{-1}$ em relação àquela de $0,03 \text{ mm s}^{-1}$ (referência);

c) Desenvolver e avaliar a funcionalidade de um consolidômetro pneumático, de baixo custo, para determinações da curva de compressão do solo; avaliar o potencial de utilização da propulsão pneumática em determinações de RP e de RT;

d) Construir um permeâmetro de carga constante de ar com alta portabilidade e útil para determinações da permeabilidade do solo ao ar, tanto no campo quanto em laboratório, a partir da implementação de instrumentos dedicados à redução de oscilações durante as medições do gradiente de pressão bem como a otimização da seleção de diferentes níveis de vazão mássica de ar, visando tornar mais simples a sua operação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Qualidade do solo e seus indicadores

Os ecossistemas naturais e agropecuários dependem fundamentalmente do solo como recurso básico para sua funcionalidade. O solo é um recurso naturalmente finito e não renovável, visto que alguns de seus componentes requerem longos períodos de tempo para serem gerados, os quais excedem, em muito, o tempo de várias gerações humanas. Essa é uma das razões que tornam a qualidade do solo um tema de interesse global e com crescente importância (WILSON; MALISZEWSKA-KORDYBACH, 2000). De acordo com a Soil Science Society of America (SSSA, 1995), a qualidade do solo consiste na capacidade de um determinado solo funcionar, em um ecossistema natural ou manejado, para prover a produtividade animal ou vegetal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar, e prover a habitação e a saúde humana. Em áreas intensamente cultivadas, a qualidade do solo é fortemente relacionada aos danos ambientais originados pela degradação da estrutura do solo, como a erosão, a desertificação e a susceptibilidade à compactação (DEXTER, 2002).

Os indicadores da qualidade do solo são ferramentas úteis na avaliação da sustentabilidade do uso da terra e das práticas de manejo (SHUKLA; LAL; EBINGERB, 2006). De modo geral, Stenberg (1999) e Schoenholtz, van Miegroet e Burger (2000) sugerem que os indicadores de qualidade do solo devem: (i) integrar as propriedades e os processos físicos, químicos e biológicos do solo; (ii) incorporar a variabilidade desses atributos; (iii) ser sensíveis às variações em longo prazo, induzidas pelo clima e manejo, e resistentes às flutuações em curto prazo provocadas por alterações sazonais; (iv) ser mensuráveis precisamente em ampla variedade de classes e condições de solos; (v) ser simples de mensurar e possuir baixo custo e (vi) ser adaptáveis a diversos ecossistemas. Ainda, Singer e Ewing (2000) sugerem que os indicadores da qualidade física do solo devem relacionar as propriedades que influenciam a produção das culturas, como a proporção na qual a matriz do solo resiste à deformação e a capacidade do solo em fornecer aeração e quantidade de água adequadamente ao sistema radicular.

2.2 Algumas propriedades físicas indicadoras da qualidade do solo

Densidade e porosidade do solo

A compactação é um dos processos que mais afeta a estrutura do solo. Este processo ocorre em um sistema tridimensional, induzido por estresses mecânicos comumente originados do tráfego de máquinas e da ação de implementos agrícolas (FLOWERS; LAL, 1998) e/ou do pisoteio de animais (BHARATI et al., 2002). Como resultado, a compactação ocasiona decréscimo de volume do solo principalmente devido à exclusão dos poros de maior diâmetro (DEXTER, 2004; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006). Dessa forma, ocorrem aumentos de densidade do solo devido à redução do espaço poroso, com modificações na forma e na distribuição de tamanho dos poros (FLOWERS; LAL, 1998; PAGLIAI et al., 2003) bem como de sua orientação e continuidade (MOLDRUP et al., 2001). Estas mudanças causam deterioração da qualidade física do solo e limitam o potencial produtivo de solos agrícolas (KIRKEGAARD et al., 1995; BEUTLER et al., 2006).

A densidade do solo (D_s) é definida como o quociente da massa de sólidos por seu volume (BLAKE; HARTGE, 1986) e se enquadra em vários dos requisitos sugeridos por Stemberg (1999) e Schoenholtz, van Miegroet e Burger (2000), ou seja, esta propriedade é facilmente mensurada e sensível a variações quanto ao uso e manejo, sendo útil para quantificar as mudanças nas funções do solo em um ecossistema (DORAN; JONAS, 1996). Geralmente, sob elevados valores de D_s , os solos apresentam perda de sua estrutura (POULSEN; BLENDSTRUP; SCHJØNNING, 2008). A D_s “ideal” e seus limites críticos variam sensivelmente entre solos com composições granulométricas e mineralógicas distintas e mesmo naqueles com composição similar, mas originados de processos pedogenéticos diferenciados (HAKANSSON; VOORHEESS, 1998). Jones (1983) avaliou os valores de D_s no qual o crescimento radicular não sofre restrições (limite inferior) ou é severamente afetado (limite superior). Em solos com conteúdo de argila mais silte entre 10 e 90 %, o limite inferior foi de 1,2 a 1,6 Mg m^{-3} e o limite superior foi de 1,4 a 1,8 Mg m^{-3} , respectivamente. Estes resultados mostram que a D_s influencia indiretamente o crescimento de plantas (LETEY, 1985). Portanto, sua interpretação deve considerar outras propriedades físicas para avaliar o

efeito das práticas de manejo na qualidade do solo, como a porosidade na qual a troca de gases se torna limitante ao crescimento de raízes (VOMOCIL; FLOCKER, 1966; GRABLE; SIEMER, 1968). Por outro lado, a quantidade de nutrientes para as plantas, o monitoramento do estoque de carbono bem como o nível de poluentes são alguns exemplos relevantes de determinações que dependem fundamentalmente da densidade do solo.

A porosidade do solo é uma propriedade física facilmente alterada pela compactação e apresenta relação inversamente proporcional à Ds. Os efeitos deletérios da compactação resultam em decréscimos significativos principalmente do volume dos macroporos bem como do aumento da microporosidade (PAGLIAI et al., 2003; DEXTER, 2004; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006). Neste caso, a microporosidade pode favorecer a retenção de água no solo (OLIVEIRA et al., 2004), mas por outro lado, poder ocorrer redução do movimento de ar e água (CAVENAGE et al., 1999) e aumento da resistência do solo à penetração de raízes (VEPRASKAS, 1984). A macroporosidade, situada nos espaços interagregados, influencia diretamente a capacidade de infiltração, drenagem e aeração do solo (HILLEL, 1998) e apresenta estreita relação com o sistema radicular (HATANO et al., 1988). Valores de macroporosidade $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ têm sido considerados críticos para o crescimento de plantas (VOMOCIL; FLOCKER, 1966).

Permeabilidade do solo ao ar

A permeabilidade do solo ao ar (k_a) é definida como a capacidade de transmissão de gases através de poros interconectados em resposta a um gradiente de pressão (KIRKHAM, 1946). Os fluidos ar e água ocupam simultaneamente diferentes porções do sistema poroso, o que influencia a magnitude do movimento de gases no solo. Dessa forma, valores máximos da k_a são obtidos em solos completamente secos, decrescendo até zero à medida que o teor de água se aproxima da saturação devido à restrições ao movimento de ar nos poros preenchidos com líquido, sendo que a maior redução da k_a ocorre quando os macroporos, seus principais condutores, tornam-se bloqueados (BALL; SCHJØNNING, 2002).

Estudos sobre a emissão de gases relacionados ao efeito estufa mostram o potencial de utilização da k_a como indicadora das taxas de oxidação do metano na superfície do solo (BALL et al., 1997). Além disso, vários autores têm considerado a k_a como um importante parâmetro na remediação de solos contaminados mediante sua utilização em modelos que estimam a capacidade de extração de vapor de compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis presentes no meio poroso (POULSEN et al., 1998; FAHRAN; HOLSEN; BUDIMAN, 2001). A estrutura e as propriedades hidráulicas do solo estão intimamente relacionadas com a k_a (REEVE, 1953; FISH; KOPPI, 1994; MOLDRUP et al., 2001; HAMAMOTO et al., 2009). A k_a é bastante sensível às mudanças na geometria do espaço poroso, isto é, distribuição de tamanho, quantidade, continuidade, tortuosidade e morfologia de poros (ROSEBERG; McCOY, 1990), em resposta aos sistemas de uso e manejo e às propriedades intrínsecas das diferentes classes de solo (ROSEBERG; McCOY, 1992; MOLDRUP et al., 2001; CAVALIERI et al., 2009) de modo que esta propriedade física é uma importante indicadora da qualidade estrutural do solo.

A k_a é fortemente relacionada com a condutividade hidráulica do solo (COREY, 1957). As medições de k_a , sob diferentes potenciais mátricos (ψ), têm sido utilizadas para estimar com elevada acurácia a condutividade hidráulica saturada do solo (k_{sat}) (LOLL et al., 1999; IVERSEN et al., 2001; CHIEF; FERRÉ; NIJSSEN, 2008). Loll et al. (1999) determinaram a k_a e a k_{sat} em 1614 amostras indeformadas (100 cm^3) de nove tipos de solos. As medidas de k_a foram realizadas sob condições de teor de água equivalente ao ψ de -10 kPa e permitiram obter a seguinte equação: $\log(k_{sat}) [\text{m d}^{-1}] = 1,27\log(k_a) [\text{m}^2] + 14,11$, com R^2 igual a 0,75. Iversen et al. (2001) também obtiveram uma correlação satisfatória entre k_a e k_{sat} para três tipos de solos. Os autores mediram a k_a em 171 amostras indeformadas de solo de 100 cm^3 e com teor de água equivalente ao ψ de -5 kPa, sendo a k_a e a k_{sat} relacionadas conforme a equação: $\log(k_{sat}) [\text{m d}^{-1}] = 1,29\log(k_a) [\text{m}^2] + 14,55$, com R^2 igual a 0,77. Estes resultados têm relevante importância principalmente quando é necessário analisar uma grande quantidade de amostras visto que a k_a é mais fácil e rápida de ser medida, além de provocar menos distúrbios na estrutura do solo em relação às determinações da condutividade hidráulica (MOLDRUP et al., 2003).

Conforme a Lei de Darcy, a aplicação de um fluxo de ar laminar, sob condições isotérmicas e em regime estacionário, permite estimar a permeabilidade do solo ao ar [L²] pela expressão:

$$q = -\frac{k_a}{\eta} \left(\frac{dP}{dz} + \rho g \right),$$

sendo, (q) a densidade de fluxo de ar [L/T], (P) a pressão de ar [M/LT²], (z) a distância [L] na direção do movimento de ar no sistema poroso, (η) a viscosidade do ar [M/LT], (ρ) a densidade do ar [M/L³] e (g) a aceleração da gravidade [L/T²].

A densidade de fluxo pode ser expressa como a vazão de ar por área perpendicular ao movimento do fluido. Dessa forma, conhecendo-se as dimensões da amostra de solo, a k_a pode ser facilmente obtida pela utilização de instrumentos capazes de fornecer uma determinada vazão de ar que atravessa uma coluna de solo bem como medir o respectivo gradiente de pressão gerado (BALL; HARRIS; BURFORD, 1981; CHIEF; FERRÉ; NIJSSEN, 2006, 2008). Atualmente, o desenvolvimento de permeâmetros com alto grau tecnológico se deve à facilidade de aquisição no mercado de instrumentos com elevada acurácia, como controladores e/ou medidores de vazão mássica de ar e de manômetros de pressão diferencial. Isto permite que a k_a seja mais amplamente difundida como ferramenta para avaliação da qualidade física do solo.

Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RP) é avaliada com penetrômetros e fornece indicações rápidas do grau de compactação, sendo útil na avaliação dos efeitos do sistema de manejo do solo sobre o ambiente radicular (BENGHOUGH; MULLINS, 1990; TORMENA; ROLOFF, 1996; DEXTER; CZYZ; GATE, 2007). Os penetrômetros medem a força necessária para penetrar no solo um cone padronizado, localizado na extremidade de uma haste metálica (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE, 1999), e podem ser classificados como: (i) dinâmicos, nos quais a introdução do cone no solo ocorre pela aplicação de impactos ocasionados por uma massa conhecida (SCHMID, 1966; STOLF, 1991) e (ii) estáticos, no qual o cone é introduzido no solo mediante acionamento manual, por mecanismos hidráulicos ou

eletro-mecânicos (BRADFORD, 1986; LOWERY; MORRISON, 2002). Os penetrômetros estáticos podem apresentar velocidade constante de penetração, o que melhora a acurácia dos dados (HERRICK; JONES, 2002) devido à redução de erros sistemáticos e, conseqüentemente, da variabilidade das medidas de RP.

Existem diferentes tipos de penetrômetros, especialmente em relação ao grau de aperfeiçoamento tecnológico (BRADFORD, 1986; PERUMPRAL, 1987; LOWERY; MORRISON, 2002; REINERT; COLLARES; REICHERT, 2007). Entretanto, na elaboração de novos penetrômetros devem ser atendidas algumas especificações relativas ao tipo de cone e velocidade de penetração, como àquelas sugeridas pela Sociedade Americana de Engenharia Agrícola (ASAE, 1999). Penetrômetros portáteis, de acionamento manual, têm sido amplamente utilizados para medir a RP. Um aspecto associado à utilização desses aparelhos é a influência do operador na aquisição de dados. Isto decorre principalmente pela dificuldade em manter uma taxa constante de penetração do cone no solo (HERRICK; JONES, 2002), o que pode ocasionar interpretações incorretas da RP (LOWERY; MORRISON, 2002). A obtenção de velocidade constante de penetração e o armazenamento eletrônico de dados permitem eliminar a influência do operador nas determinações da RP. Para tanto, Tormena, Silva e Libardi (1998) descrevem um penetrômetro composto por um atuador linear, acionado por um motor de passo controlado por um sistema eletrônico de regulação de posição e velocidade de deslocamento de uma célula de carga. A célula de carga permite medir a força necessária à penetração do cone, cujos dados são armazenados em um microcomputador. Entretanto, principalmente pelo elevado custo e devido à existência de poucos equipamentos nacionais disponíveis, a utilização de penetrômetros com estas características construtivas tem sido pouco difundida (REINERT; COLLARES; REICHERT, 2007).

A magnitude da RP depende de alguns aspectos como o diâmetro basal, o comprimento e o ângulo do cone, além de propriedades físicas relativas à densidade do solo, resistência ao cisalhamento, teor de água, teor de argila entre outras (BRADFORD, 1986; LOWERY; MORRISON, 2002). A relação da RP com o teor de água e a densidade do solo (BUSSCHER, 1990) é uma das principais limitações para sua determinação no campo visto que, geralmente, estas propriedades físicas devem

ser conhecidas na ocasião da amostragem. Por outro lado, sob condições experimentais em laboratório, essa limitação é mais facilmente contornada mediante a construção da curva de resistência à penetração, CRP. A CRP inclui o efeito de diferentes fatores relacionados à degradação física do solo e possibilita estabelecer valores críticos do teor de água e da densidade do solo nos quais a RP limita o crescimento de plantas (IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000). Para tanto, comumente têm sido utilizados penetrômetros estáticos, os quais devem possuir taxa de deslocamento do cone constante e menor que $8,3 \text{ mm s}^{-1}$ (LOWERY; MORRISON, 2002). No mercado atual, há uma ampla variedade de dispositivos eletrônicos para medição de força (células de carga), de distância (sensores resistivos, ultrasônicos e a laser etc.) além da disponibilidade de tecnologia para montagem de módulos eletrônicos para controlar atuadores eletro-mecânicos, adquirir e armazenar dados, sendo de fácil comunicação com microcomputadores. Isso reflete em possibilidades de desenvolvimento de novos penetrômetros com custos mais acessíveis além de possibilitar a obtenção de dados com elevada acurácia.

Os efeitos deletérios da compactação, como aumentos de densidade do solo, podem criar ambientes desfavoráveis ao crescimento radicular. As plantas são capazes de identificar esta condição de estresse, pois, em casos críticos, há envio de sinais de inibição à parte aérea para controle da expansão foliar (DAVIES; ZHANG, 1991; TARDIEU, 1994). Em solos compactados e sob secamento, os sinais de inibição ocorrem associados ao aumento da RP (PASSIOURA; GARDINER, 1990). Geralmente, valores de RP entre 2 e 3 MPa tem sido considerados limitantes ao crescimento de várias culturas anuais, como trigo, milho e algodão (TAYLOR; BURNETT, 1964; GUPTA; ALLMARAS, 1987; VEPRASKAS, 1994), exceto para algumas culturas cujas restrições ocorrem abaixo desse valor (BENGOUGH; MULLINS, 1990). Embora a RP dependa do teor de água e da densidade do solo (BUSSCHER, 1990), seus valores críticos são adequados como indicadores da qualidade do solo devido esta ser uma propriedade física que afeta diretamente o crescimento de plantas (LETEY, 1985) e, conseqüentemente, a produtividade das culturas (KIRKEGAARD et al., 1995; BEUTLER et al., 2006).

Resistência tênsil de agregados

A resistência tênsil de agregados (RT) também tem sido considerada um importante indicador da qualidade estrutural do solo. A RT corresponde à força por unidade de área necessária à ruptura de um determinado agregado (DEXTER; WATTS, 2000). Alguns dos fatores que a influenciam são: os ciclos de umedecimento e secamento (UTOMO; DEXTER, 1981; KAY; DEXTER, 1992), o teor de argila e a mineralogia (BARTOLI; BURTIN; GUÉRIF, 1992; IMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002), o teor de argila dispersa (SHANMUGANATHAN; OADES, 1982), a matéria orgânica do solo (CAUSARANO, 1993; PERFECT; KAY; SILVA, 1995; IMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002), os materiais ligantes e/ou cimentantes, como a sílica e aluminossilicatos pobremente cristalizados (KAY; DEXTER, 1992; KAY; ANGERS, 1999), a composição química e a concentração da solução do solo (RAHIMI; PAZIRA; TAJIK, 2000). Dessa forma, a RT constitui uma medida sensível aos efeitos dos sistemas de uso e manejo na estrutura do solo (WATTS; DEXTER, 1997; MUNKHOLM; SCHJØNNING, 2004; BLANCO-CANQUI et al., 2005; TORMENA; FIDALKI; ROSSI JUNIOR, 2008).

O aumento no teor de argila eleva a magnitude da RT e, conseqüentemente, diminui a friabilidade do solo (BARTOLI et al., 1992; GUÉRIF, 1990; KEMPER; ROSENAU; DEXTER, 1987). Provavelmente, isto se deve ao incremento do número de cargas elétricas, que favorece a formação de ligações entre as partículas minerais e/ou orgânicas. Os óxidos de ferro e de alumínio também atuam na agregação do solo (PINHEIRO-DICK; SCHWERTMANN, 1996; BARRAL; ARIAS; GUÉRIF, 1998; MUGGLER et al., 1999). Estes constituintes funcionam como agentes cimentantes entre as partículas minerais, participando no desenvolvimento da estrutura do solo ao elevar a resistência das regiões de fratura (KAY; ANGERS, 1999). Resumidamente, os mecanismos de atuação desses óxidos parecem ser de duas formas: (i) ocorre atração entre partículas de óxidos positivamente carregadas e partículas da matriz do solo negativamente carregadas (principalmente da fração argila), formando agregados; (ii) a união de partículas de diferentes tamanhos pode ocorrer devido ao recobrimento da superfície das partículas minerais por óxidos (KAY; ANGERS, 1999; MUGGLER et al., 1999). Nestes dois mecanismos, os óxidos podem alterar a carga superficial dos minerais e intensificar as ligações entre as partículas, resultando em aumento da RT.

Entretanto, existem controvérsias sobre os efeitos dos óxidos de ferro, sendo considerada de pouca ou nenhuma influência na agregação do solo (DESPHANDE; GREENLAND; QUIRK, 1968; MUGGLER; PAPE; BUURMAN, 1997), ou que seu efeito se deve a sua interação com a matéria orgânica do solo e/ou teor de argila (GUÉRIF, 1990; BARTOLI et al., 1992).

A matéria orgânica pode agir como uma substância cimentante ou desagregante, sendo dependente de sua composição química e de outros materiais cimentantes no solo (GOLDBERG; KAPOOR; RHOADES, 1990). Além disso, a influência da matéria orgânica parece ser relacionada com a natureza das áreas de fratura, que depende da textura do solo, da qualidade da matéria orgânica e de sua distribuição espacial dentro dos agregados (KAY; ANGERS, 1999). Dessa forma, os incrementos na resistência tênsil de agregados relativamente maiores podem ser devido à matéria orgânica incorporada dentro de poros muito pequenos, entre as unidades do solo classificadas como “domínios argilosos” e/ou “clusters” (agrupamentos maiores), e contribuem para a estabilização de microagregados (DEXTER, 1988). Em contraste, Goldberg, Kapoor e Rhoades (1990) e Kemper, Rosenau e Dexter (1987) sugerem que se o tamanho dos ânions orgânicos é parecido com o tamanho do eixo das partículas de argila, sua adsorção específica pode contrabalançar as cargas elétricas positivas, conferindo excesso de cargas elétricas negativas às partículas e, conseqüentemente, induzir a dispersão das partículas de argila, diminuindo a resistência tênsil dos agregados.

Os fatores que influenciam na resistência tênsil de agregados e friabilidade do solo, como a argila, os óxidos de ferro e de alumínio e a matéria orgânica são dependentes da composição do solo, das condições climáticas e das práticas de manejo (MACKS et al., 1996; WATTS; DEXTER, 1997). Dessa forma, a redução ou o aumento excessivo da RT pode advir das atividades de preparo do solo. Essa redução excessiva parece ser causada pela diminuição e/ou destruição das ligações químicas entre as partículas (orgânica e/ou inorgânica), tornando o solo mecanicamente instável. Por outro lado, aumentos excessivos da RT têm sido associados ao incremento do teor de argila dispersa em água em solos fisicamente degradados, a qual se deposita nas fissuras existentes entre os agregados, cimentando-os (DEXTER; WATTS, 2000). Esses efeitos exercem impacto negativo na qualidade física do solo e, apesar de sua

relevância, há carência de informações sobre a influência da textura, mineralogia e teor de matéria orgânica na resistência dos agregados e friabilidade de solos no Brasil, sendo, em parte, corroborada pela ausência de laboratórios providos de equipamentos adequados à determinação da RT.

A quantificação da RT pode ser realizada mediante ensaios diretos e indiretos (DEXTER; WATTS, 2000). Os ensaios diretos (Figura 1) consistem na aplicação de forças de mesma direção e sentidos opostos em dois extremos de um agregado, separando-o em duas partes. Já nos ensaios indiretos (Figura 2), uma força compressiva é aplicada através do diâmetro polar do agregado por duas placas metálicas planas, sendo uma fixa e outra móvel. O deslocamento da placa móvel proporciona aumentos sucessivos do estresse interno do agregado. Teoricamente, o valor máximo desse estresse ocorre no plano vertical central do agregado. Assim, uma fissura aparece no centro do agregado, fragmentando-o em unidades de menor tamanho (e maior RT) no momento que o estresse aplicado supera a resistência tênsil dos agregados (forças de magnitudes iguais e sentidos opostos). A RT freqüentemente é determinada pelo método indireto utilizando-se dispositivos móveis com velocidade de deslocamento linear extremamente baixa, o que torna bastante laboriosa e demorada a sua determinação.

O incremento do estresse interno do agregado deve ocorrer de forma constante (DEXTER; KROESBERGEN, 1985; DEXTER; WATTS, 2000) nas determinações de RT. Para tanto, nos ensaios indiretos, deve-se manter constante a velocidade de deslocamento da placa móvel durante a compressão individual de agregados. Nesse contexto, Dexter e Kroesbergen (1985) recomendam que o incremento da força até a ruptura do agregado ocorra em um tempo de aproximadamente 100 s. Porém, isso é algo bastante incerto visto que a forma e as dimensões dos agregados não são idênticas para um determinado conjunto de amostras. Dexter e Watts (2000) afirmam que a taxa de incremento da força sobre o agregado pode influenciar os resultados de

Figura 1 - Detalhes do ensaio direto de resistência tênsil de um agregado de solo (H); (E e F) são as metades de um recipiente que envolve o agregado; (G) é um aglutinante composto de calcário, areia e água, denominado de "plaster de Paris"; (P) é a força de tração aplicada para dividir o agregado em duas partes (DEXTER; WATTS, 2000)

Figura 2 - Detalhes do ensaio indireto de resistência tênsil. (C) é a fissura formada entre os dois pontos de aplicação da força compressiva (P) na amostra; (Y) é o estresse tênsil gerado em função da força (P) que promove a ruptura da amostra (DEXTER; WATTS, 2000)

RT. Esses mesmos autores recomendam uma velocidade constante de compressão do agregado igual a $0,07 \text{ mm s}^{-1}$, sendo também sugerida a possibilidade de utilizar valores diferentes. Atualmente, muitos trabalhos são realizados com velocidade constante de compressão do agregado igual a $0,03 \text{ mm s}^{-1}$, conforme indicado por Imhoff, Silva e Dexter (2002). Portanto, pode-se observar que há uma grande carência em estudos mais detalhados sobre os efeitos da velocidade de compressão nas determinações da RT.

2.3 Compressão do solo e indicadores da qualidade física

Compressão do solo

A compressão é um processo relacionado à redução no volume e à deformação do solo em resposta à aplicação de forças externas de origem antropogênica (GUPTA; ALLMARAS, 1987; KOOLEN, 1994). Este processo recebe diferentes denominações em função do teor de água no solo. Em solos saturados este processo é referido como consolidação, enquanto que em solos não saturados é denominado de compactação (GUPTA; ALLMARAS, 1987; HORN; LEBERT, 1994). Durante o processo de consolidação, a água é expulsa dos poros da matriz do solo (BRADFORD; GUPTA, 1986) e, durante a compactação, o ar é excluído do sistema poroso (HAKANSSON; VOORHEES, 1998). A resistência do solo à redução de volume quando submetido a uma força externa se refere à compressibilidade (BRADFORD; GUPTA, 1986; GUPTA; ALLMARAS, 1987; HORN; LEBERT, 1994), que depende de fatores externos e internos. Os fatores externos são caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência da força aplicada (HORN, 1988; LEBERT; HORN, 1991) enquanto que os fatores internos se referem à história de tensão, teor de água, teor de matéria orgânica, textura, estrutura, densidade do solo inicial dentre outros (HORN, 1988; McBRIDE, 1989; IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004).

A textura do solo é uma das propriedades físicas que mais influencia a compressibilidade (LARSON; GUPTA; USECHE, 1980; HORN, 1988; McBRIDE, 1989; SMITH et al., 1997; IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004). Quando o estresse é aplicado, o rearranjo das partículas depende da distribuição de tamanho destas e, conseqüentemente, determina o grau de compactação do solo (SOANE, 1986; HORN; LEBERT, 1994). Ainda, o funcionamento compressivo está relacionado com o teor e a mineralogia da argila (LARSON; GUPTA; USECHE, 1980; FAURE, 1981; HORN, 1988; McBRIDE; WATSON, 1990). Solos com maiores teores de argila tendem a apresentar profundidade de transmissão da compactação mais pronunciada (HORN, 1988). Entretanto, incrementos no teor de argila, principalmente de alta atividade, parecem aliviar os efeitos da compactação por diminuir sua persistência, provavelmente devido

aos processos de contração e expansão do solo (HAKANSSON; VOORHEES; RILEY, 1988).

A matéria orgânica também tem importante influência na resposta dos solos à compactação (LARSON; GUPTA; USECHE, 1980; McBRIDE, 1989; McBRIDE; WATSON, 1990; SOANE, 1990). Soane (1990) sugere alguns mecanismos relacionados à menor susceptibilidade dos solos à compactação. O autor afirma que a matéria orgânica aumenta a coesão do solo devido à sua ação cimentante nas partículas e nos agregados. Ainda, durante a aplicação de determinado estresse, devido à maior elasticidade da matéria orgânica, as partículas orgânicas e minerais são deslocadas sem que suas ligações se rompam totalmente. Portanto, ao cessar o estresse, o solo tende a aumentar seu volume. O incremento do teor de carbono orgânico resulta em aumento do número de ligações entre as partículas do solo e promove o aumento de sua resistência à deformação. Ademais, a elevada capacidade de retenção de íons da matéria orgânica reduz o efeito lubrificante da água e, conseqüentemente, aumenta a força de fricção entre as partículas minerais, resultando em menor susceptibilidade do solo à compactação. Assim, pode-se concluir que o aumento do teor de carbono orgânico ocasiona diminuição da faixa de teor de água na qual as propriedades plásticas do solo são mais pronunciadas (McBRIDE; BOBER, 1989).

Por outro lado, os efeitos da matéria orgânica na compressibilidade do solo dependem do teor de água no momento da aplicação do estresse (SOANE, 1990). Para uma mesma condição, a compressibilidade é diretamente proporcional ao teor de água (LARSON; GUPTA, 1980). Entretanto, existem controvérsias concernentes ao efeito do teor de água na susceptibilidade do solo à compactação. Larson, Gupta e Useche (1980) e O'Sullivan (1992) afirmam que a quantidade de deformação do solo não depende de seu teor de água, o que contrasta com os resultados obtidos por Silva, Reinert e Reichert (2000) e Sánchez-Girón, Andreu e Hernanz (2001). Estas diferenças na susceptibilidade à compactação podem estar relacionadas ao modo no qual os decréscimos no teor de água promovem incrementos do número de contatos entre as partículas, cuja magnitude dependente da textura e da mineralogia do solo (McNABB; BOERSMA, 1996). Minerais cristalinos de argila retêm mais fracamente a água do que

aqueles não-cristalinos e, sob condições mais secas, isso tende a aumentar o número de contatos entre as partículas (McNABB; BOERSMA, 1996) e a resistência do solo à deformação (MITCHELL, 1976). Ademais, os efeitos do teor de água na compressibilidade podem ser mascarados pela densidade do solo inicial (McNABB; BOERSMA, 1996). A deformação do solo ocorre quando suas partículas, individualizadas ou agrupadas, são capazes de se mover umas sobre as outras. Este movimento é limitado pelas forças de fricção e pelas ligações entre as partículas sólidas. Em solos mais densos, há menos espaço poroso disponível à movimentação de partículas e maior força de fricção entre estas, o que atenua seu deslocamento e rearranjo e resulta em menor deformação do solo (PAZ; GUÉRIF, 2000).

Dentre outros fatores, o comportamento compressivo do solo depende das propriedades físicas, da força aplicada (estresse) e do sistema de manejo (HOLTZ; KOVACS, 1981). Neste contexto, alguns indicadores relacionados ao comportamento compressivo do solo, como a pressão de preconsolidação (σ_p) e o índice de compressão (IC), permitem avaliar o momento mais adequado para a execução das operações mecanizadas no campo visando reduzir os problemas de degradação de solos agrícolas (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; SILVA; REINERT; REICHERT, 2000; DIAS JUNIOR et al., 2005). Estes indicadores são obtidos da curva de compressão, estabelecida pela relação entre o logaritmo da pressão vertical aplicada e a densidade do solo (ou índice de vazios) (HOLTZ; KOVACS, 1981). Para tanto, é necessário utilizar um equipamento específico, denominado consolidômetro. No Brasil, poucos equipamentos têm sido produzidos e os modelos importados, automatizados ou não, possuem elevado custo, o que limita a ampla utilização do IC e da σ_p bem como sua relação com os indicadores da qualidade física de solos agrícolas.

Freqüentemente, a σ_p tem sido utilizada para estabelecer condições adequadas ao crescimento de plantas devido a sua relação com a resistência do solo à penetração, RP, (CULLEY; LARSON, 1987; MOSADDEGHI et al., 2003; SUZUKI et al., 2008). Funções de pedotransferência também têm sido utilizadas para estimar mais rapidamente a σ_p a partir de determinações da RP (MOSADDEGHI et al., 2003; SUZUKI et al., 2008), da resistência tênsil de agregados (MOSADDEGHI et al., 2003), da textura e do teor de água no solo (HORN; FLEIGE, 2003; IMHOFF; SILVA;

FALLOW, 2004), da densidade do solo (McBRIDE; JOOSSE, 1996; IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004; SUZUKI et al., 2008), da matéria orgânica (McBRIDE; JOOSSE, 1996) dentre outros. Além disso, considerando a curva de compressão é possível determinar o volume total de poros em função da densidade do solo. Isto permite identificar os níveis de pressões aplicadas que podem reduzir a macroporosidade do solo a $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (OLIVEIRA et al., 2003), considerada crítica ao crescimento radicular (VOMOCIL; FLOCKER, 1966).

Pressão de preconsolidação e índice de compressão

A trafegabilidade de máquinas e implementos, sob diferentes combinações de peso e área de contato do rodado, depende da capacidade de suporte de carga e da susceptibilidade do solo à compactação (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; MOSADDEGHI et al., 2003). Uma metodologia bastante utilizada para a determinação da σ_p e do IC é a de Casagrande (1936). Para tanto, a partir da curva de compressão do solo (Figura 3), estima-se o ponto de máxima curvatura e, em seguida, traça-se uma reta paralela ao eixo das abscissas (Figura 3-a) e uma reta tangente (Figura 3-b). A abscissa referente à intersecção da bissetriz do ângulo formado entre essas duas retas (Figura 3-c) com o prolongamento da linha de compressão virgem (Figura 3-d) representa a σ_p (CASAGRANDE, 1936; TAYLOR, 1958).

Para solos que não experimentaram pressões prévias ou ciclos de umedecimento e secagem, a curva de compressão apresenta forma linear (LARSON; GUPTA; USECHE, 1980; CULLEY; LARSON, 1987; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996). Por outro lado, para solos submetidos à aplicação de cargas externas, a curva de compressão apresenta uma parte não-linear e outra linear (STONE; LARSON, 1980; LEBERT; HORN, 1991), conforme mostrado na Figura 3. A σ_p representa o ponto que divide a curva de compressão em duas regiões: uma de deformações elásticas, pequenas e recuperáveis (linha de compressão secundária) e outra de deformações plásticas e não recuperáveis (linha de compressão virgem) (Figura 3). Vários autores consideram que a linha de compressão secundária indica a magnitude das pressões pretéritas impostas ao solo (BAILEY; JOHNSON; SCHAFER, 1986; VEENHOF;

Figura 3 - Curva de compressão do solo e estimativa da σ_p segundo o método de Casagrande (1936): (a) linha horizontal no ponto de máxima curvatura, (b) tangente no ponto de máxima curvatura, (c) bisetriz do ângulo formado entre as linhas (a) e (b), (d) linha de compressão virgem, σ_p pressão de preconsolidação

McBRIDE, 1996; IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004; TANG et al., 2009). Em outras palavras, esta parte da curva de compressão reflete a história do manejo do solo, sendo a σ_p um indicador da máxima pressão já imposta ao solo bem como de sua capacidade de suporte de carga. Portanto, a aplicação de pressões maiores que a σ_p deve ser evitada durante as atividades de cultivo bem como do tráfego de máquinas para impedir que haja compactação adicional do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995; DIAS JUNIOR et al., 2005).

Os primeiros estudos sobre a linha de compressão virgem foram desenvolvidos por Larson, Gupta e Useche (1980). Os autores criaram um modelo linear que permitia estimar a densidade do solo em resposta a uma determinada pressão aplicada. O coeficiente angular da equação foi chamado de índice de compressão (Figura 3). Esse índice reflete a taxa de variação da densidade do solo (ou índice de vazios) em resposta ao estresse aplicado e, portanto, é considerado um indicador da susceptibilidade do solo à compactação. Gupta e Allmaras (1987) afirmam que solos com valores mais elevados de índice de compressão apresentam mais facilmente mudanças na relação ar-água-matriz quando submetidos a estresses, embora isso necessariamente não reflita em condições impeditivas ao crescimento das plantas.

2.4 Amostragem de solos

A avaliação da qualidade do solo pode ser inferida em campo. Entretanto, amostras de solo têm sido largamente utilizadas na determinação de indicadores da qualidade do solo *ex situ*, em especial considerando suas propriedades físicas. Conseqüentemente, são necessárias amostras indeformadas, as quais apresentem estrutura similar àquela *in situ* para que as medidas realizadas em laboratório gerem dados confiáveis (TSCHEBOTARIOFF, 1973). Para tanto, são utilizados equipamentos de amostragem, como aquele sugerido por Uhland (1949), o qual permite que anéis volumétricos de paredes relativamente finas sejam individualmente introduzidos no solo para a obtenção de amostras indeformadas. La Rochelle et al. (1981) indicam algumas das causas mais comuns de distúrbios decorrentes da amostragem:

- a) Alterações da estrutura do solo na área antes da amostragem devido ao preparo inadequado do local;
- b) Distorção mecânica da amostra durante a introdução do anel volumétrico no solo;
- c) Distorção mecânica da amostra relacionada aos efeitos deletérios da sucção durante a retirada do anel volumétrico e;
- d) Alterações no estado de tensão original da amostra.

Os equipamentos para coleta de amostras indeformadas de solos geralmente funcionam mediante a aplicação de golpes, como aquele proposto por Uhland (1949). Devido a isto, comumente podem ocorrer alterações no espaço poroso das amostras capazes de modificar substancialmente seu comportamento físico-hídrico (McINTYRE, 1974; CHONG; KHAN; GREEN, 1982; ROGERS; CARTER, 1987) e/ou mecânico (TEIXEIRA; MAGALHÃES; BRAUNBECK, 2000). Além disso, fatores ligados ao estado de compactação e ao teor de água do solo no momento da amostragem aumentam as chances de alteração nas amostras. Portanto, para estudos mais confiáveis, é fundamental uma boa qualidade da amostragem. Como exemplo, a magnitude da condutividade hidráulica pode ser resultante de diminutas mudanças na distribuição e continuidade de poros de maior diâmetro (PAGLIAI et al., 2003), os quais são altamente dependentes da condição estrutural do solo (DEXTER, 2004; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006; CAVALIERI et al., 2009).

Poucos são os trabalhos que quantificam melhorias em metodologias de amostragem de solos, principalmente sem aplicação de golpes. Por exemplo, Wuest e Schillinger (2008), propuseram um amostrador de solos acionado por um atuador linear eletro-mecânico, que elimina pancadas no anel volumétrico para amostragem. Porém, a versatilidade deste tipo de amostrador ainda é relativamente baixa devido a sua reduzida portabilidade. Dessa forma, ainda há carência no desenvolvimento de amostradores com maior portabilidade e mais adequados à amostragem de solos com estrutura indeformada, a fim de maximizar a qualidade da amostragem e, portanto, a representatividade das propriedades de interesse.

Referências

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. In: _____. **ASAE standard: ASAE EP542**. St Joseph, 1999. p. 964-966.
- BAILEY, A.C.; JOHNSON, C.E.; SCHAFER, R.L. A model for agricultural soil compaction. **Journal of Agricultural Research**, Lahore, v. 33, p. 257-262, 1986.
- BALL, B.C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 1141-1158.
- BALL, B.C.; HARRIS, W.; BURFORD, J.R. A laboratory method to measure gas diffusion and flow in soil and other porous materials. **Journal of Soil Science**, London, v. 32, p. 323-333, 1981.
- BALL, B.C.; DOBBIE, K.E.; PARKER, J.P.; SMITH, K.A. The influence of gas transport and porosity on methane oxidation in soils. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 102, p. 23301-23308, 1997.
- BARRAL, M.T.; ARIAS, M.; GUÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 46, p. 261-272, 1998.
- BARTOLI, F.; BURTIN, G.; GUÉRIF, J. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water stability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 54, p. 259-274, 1992.
- 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.; 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, n. 5, p. 787-794, 2006.

BHARATI, L.; LEE, K.H.; ISENHART, T.M.; SCHULTZ, R.C. Soil water infiltration under crops, pasture, and established riparian buffer in Midwest USA. **Agroforestry System**, New York, v. 56, p. 249-257, 2002.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 363-375.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L.B.; POST, W.M.; IZAURRALDE, R.C. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 1472-1481, 2005.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 463-478.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 33, p. 519-524, 1990.

CASAGRANDE, A. Determination of the preconsolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: Harvard University, 1936. v. 3, p. 60-64.

CAUSARANO, H. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 15-25, 1993.

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 158-164, 2009.

CAVENAGE, A.; MORES, K.L.T.; ALVES, M.C.; CARVALHO, M.A.C.; FREITAS, M.L.M.; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 997-1003, 1999.

CHIEF, K.; FERRÉ, T.P.A.; NIJSSEN, B. Field testing of a soil corer air permeameter (SCAP) in desert soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 5, p. 1257-1263, 2006.

_____. Examination of correlation between air permeability and saturated hydraulic conductivity in unburned and burned desert soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 6, p. 1501-1509, 2008.

CHONG, S.K.; KHAN, M.A.; GREEN, R.E. Portable hand-operated soil core sampler. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 2, p. 433-434, 1982.

COREY, A.T. Measurement of water and air permeability in unsaturated soil, **Soil Science Society of America Proceedings**, Oxford, v. 21, p. 7-10, 1957.

_____. Air permeability. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 1121-1136.

CULLEY, J.L.B.; LARSON, W.E. Susceptibility to compression of a Clay Loam Haplaquoll. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 3, p. 562-567, 1987.

DAVIES, W.J.; ZHANG, J. Roots signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 42, p. 55-76, 1991.

DESPHANDE, T.L.; GREENLAND, D.J.; QUIRK, J.P. Charges in soil properties associated with the removal of iron and aluminum oxides. **Journal of Soil Science**, London, v. 19, n. 1, p. 108-122, 1968.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 199-238, 1988.

_____. Soil structure: the key to soil function. **Advances in GeoEcology**, Reiskirchen, v. 35, p. 57-69, 2002.

_____. Soil physical quality: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth: part I. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.31, p.139-147, 1985.

DEXTER, A.R.; WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K.; MULLINS, C. (Ed.). **Soil and environmental analysis, physical methods**. New York: Marcel Dekker, 2000. p. 401-430.

DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A.; GATE, O.P. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 185-189, 2004.

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, 1995.

_____. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 175-182, 1996.

DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAUJO JUNIOR, C.F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to Eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p. 248-255, 2005.

DORAN, J.W., JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: SSSA, 1996. 410 p. (SSSA Special Publication, 49).

FAHRAN, S.; HOLSEN, T.M.; BUDIMAN, J. Interaction of soil air permeability and soil vapor extraction. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 127, n. 1, p. 32-37, 2001.

FAURE, A. A new conception of the plastic and liquid limits of clay. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 1, n. 2, p. 97-105, 1981.

FISH, A.N.; KOPPI, A.J. The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, Amsterdam, v. 63, p. 255-264, 1994.

FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a Molic Ochraqualf in Northwest. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, p. 21-35, 1998.

GOLDBERG, S.; KAPOOR, B.S.; RHOADES, J.D. Effect of aluminum and iron oxides and organic matter on flocculation and dispersion of arid zone soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 150, n. 3, p. 588-593, 1990.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, n. 2, p. 180-186, 1968.

GUÉRIF, J. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, n.2, p.167-178, 1990.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v. 6, p. 65-100, 1987.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C.; STEWART, B.A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 167-180.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 239-282, 1988.

HAMAMOTO, S.; MOLDRUP, P.; KAWAMOTO, K.; KOMATSU, T.; ROLSTON, D.E. Unified measurement system for the gas dispersion coefficient, air permeability, and gas diffusion coefficient in variably saturated soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 6, p. 1921-1930, 2009.

HARTE, K.K. The effect of soil deformation on physical soil properties: a discourse on the common background. **Advances GeoEcology**, Reiskirchen, v. 32, p. 22-31, 2000.

HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H.; SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 34, n. 4, p. 535-546, 1988.

HERRICK, J.E.; JONES, T.L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1320-1324, 2002.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, Amsterdam, suppl. 11, p. 53-71, 1988.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 89-99, 2003.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 45-69.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1656-1661, 2002.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 17-24, 2004.

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, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

IVERSEN, B.V.; SCHJØNNING, P.; POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P. In situ, on site and laboratory measurements of soil air permeability: Boundary conditions and measurement scale. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, p. 97-106, 2001.

JONES, C.A. Effects of soil texture on critical bulk density for root growth. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 1208-1211, 1983.

KAY, B.D.; ANGERS, D.A. Soil structure. In: SUMNER, M. E. (Ed.) **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 1999. p. 229-276.

KAY, B.D.; DEXTER, A.R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 30, n. 3, p. 297-310, 1992.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C.; DEXTER, A.R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 4, p. 860-867, 1987.

KIRKEGAARD, J.A.; MUNNS, R.; JAMES, R.A.; GARDNER, P.A.; ANGUS, J.F. Reduced growth and yield of wheat with conservation cropping. II: Soil biological factors limit growth under direct drilling. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 46, p. 75-88, 1995.

KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 11, p. 93-99, 1946.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 211-218, 1999.

KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 23-44.

LA ROCHELLE, P.; SARRAILH, J.; TAVENAS, F.; ROY, M.; LEROUEIL, S. Causes of sampling disturbance and desing of a new sampler for sensitive soils. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 18, n. 1, p.52-66, 1981.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 6, p. 1127-1132, 1980.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 275-286, 1991.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LOLL, P.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; RILEY, H. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: application in stochastic water infiltration modeling. **Water Resources Research**, Washington, v. 35, n. 8, p. 2387-2400, 1999.

LOWERY, B.; MORRISON, J.E. Soil penetrometers and penetrability. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 363-388.

MACKS, S.P.; MURPHY, B.W.; CRESSWELL, H.P.; KOEN, T.B. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 34, n. 3, p. 343-360, 1996.

McBRIDE, R.A. Estimation of density-moisture-stress functions from uniaxial compression of unsaturated, structured soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 13, n. 4, p. 383-397, 1989.

McBRIDE, R.A.; BOBER, M.L. A re-examination of alternative test procedures for soil consistency limit determination: I. A compression-based procedure. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 1, p. 178-183, 1989.

McBRIDE, R.A.; JOOSSE, P.J. Overconsolidation in agricultural soils: II. Pedotransfer functions for estimating preconsolidation stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 2, p. 373-380, 1996.

McBRIDE, R.A.; WATSON, G.C. An investigation of re-expansion of unsaturated, structured soils during cyclic static loading. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 17, p. 241-253, 1990.

McINTYRE, D.S. Procuring undisturbed cores for soil physical measurements. In: LOVEDAY, J. (Ed.). **Methods for analysis of irrigated soils**. Clayton: Commonwealth Agricultural Bureau of Soils, 1974. p. 154-165. (Technical Communication, 54).

McNABB, D.H.; BOERSMA, L. Nonlinear model for compressibility of partly saturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 2, p. 333-341, 1996.

MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behaviour**. New York: John Wiley, 1976. 422 p.

MOLDRUP, P.; OLESEN, T.; KOMATSU, T.; SCHJØNNING, P.; ROLSTON, D.E. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 613-623, 2001.

MOLDRUP, P.; YOSHIKAWA, S.; OLESEN, T.; KOMATSU, T.; ROLSTON, D.E. Air permeability in undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 32-40, 2003.

MOSADDEGHI, M.R.; HEMMATB, A.; HAJABBASIA, M.A.; ALEXANDROUC, A. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 70, p. 53-64, 2003.

MUGGLER, C.C.; PAPE, Th.; BUURMAN, P. Laser grain-size determination in soil genetic studies. 2. Clay content, clay formation, and aggregation in some Brazilian Oxisols. **Soil Science**, Baltimore, v. 162, n. 3, p. 219-228, 1997.

MUGGLER, C.C.; VAN GRIETHUYSEN, C.; BUURMAN, P.; PAPE, Th. Aggregation, organic matter, and iron oxide morphology in Oxisols from Minas Gerais, Brazil. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, n. 10, p. 759-770, 1999.

MUNKHOLM, L.J.; SCHJØNNING, P. Structural vulnerability of a sandy loam exposed to intensive tillage and traffic in wet conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 79-85, 2004.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; RESCK, D.V.S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 773-781, 2003.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004.

O'SULLIVAN, M.F. Uniaxial compaction effects on soil physical properties in relation to soil type and cultivation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 24, p. 257-269, 1992.

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 119-129, 2003.

PASSIOURA, J.B.; GARDNER, P.A. Control of leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 17, p. 149-157, 1990.

PAZ, A.; GUÉRIF, J. Influence of initial packing density, water content and load applied during compaction on tensile strength of dry soil structural units. **Advances in GeoEcology**, Reiskirchen, v. 32, p. 22-31, 2000.

PERFECT, E.; KAY, B.D.; SILVA A.P. Influence of soil properties on the statistical characterization of dry aggregate strength. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 2, p. 532-537, 1995.

PERUMPRAL, J.V. Cone penetrometer applications - a review. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 30, n. 4, p. 939-44, 1987.

PINHEIRO-DICK, D.; SCHWERTMANN, U. Microaggregates from Oxisols and Inceptisols: dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. **Geoderma**, Amsterdam, v. 74, p. 49-63, 1996.

POULSEN, T.G.; BLENDSTRUP, H.; SCHJØNNING, P. Air permeability in repacked porous media with variable structure-forming potential. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, p. 1139-1143, 2008.

POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; MASSMANN, J.W.; HANSEN, J.A. Gas permeability and diffusivity in undisturbed soil: SVE implications. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 124, n. 10, p. 979-986, 1998.

RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJIK, F. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 145-153, 2000.

REEVE, R.C. A method for determining the stability of soil structure based upon air and water permeability measurements. **Soil Science Society of America Proceedings**, Oxford, v. 17, p. 324-329, 1953.

REINERT, D.J.; COLLARES, G.L.; REICHERT, J.M. Penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo: desenvolvimento e teste de funcionalidade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 304-316, 2007.

ROGERS, J.S.; CARTER, C.E. Soil core sampling for hydraulic conductivity and bulk density. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 5, p. 1393-1394, 1987.

ROSEBERG, R.J.; McCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 4, p. 969-974, 1990.

_____. Tillage- and traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: air permeability assessment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 1261-1267, 1992.

SÁNCHEZ-GIRÓN, ANDREU, V. E.; HERNANZ, J.L. Stress relaxation of five different soil samples when uniaxially compacted at different water contents. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 62, p. 85-99, 2001.

SCHMID, W.E. **The determination of soil properties in situ by an impact penetrometer**. Princeton: Princeton University, Princeton Soil Engineering, 1966. 199 p. (Research Series, 3).

SCHOENHOLTZ, S.H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J.A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, Wageningen, v. 138, p. 335-356, 2000.

SHANMUGANATHAN, R.T.; OADES, J.M. Effect of dispersible clay on the physical properties of the B horizon of a Red-Brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 20, p. 315-324, 1982.

SHUKLA, M.K.; LAL, R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 87, p. 194-204, 2006.

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 253-260, 2001.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 239-249, 2000.

SINGER, M.; EWING, S. Soil quality. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 271-298.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTS, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 41, p. 53-73, 1997.

SOANE, B.D. Process of soil compaction under vehicular traffic and means of alleviating it. In: LAL, R.; SANCHEZ, P.A.; CUMMINGS, R.W. (Ed.). **Land clearing and development in the tropics**. Rotterdam: Balkema Publ., 1986. p. 265-297.

_____. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 179-201, 1990.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms**. Disponível em: <<http://www.soils.org/sssagloss/>>. Acesso em: 20 out. 2008.

STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators. (Acta Agriculturae Scandinavica, Section B), **Soil and Plant Science**, Oslo, v. 49, n. 1, p. 1-24, 1999.

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.

STONE, J.A.; LARSON, W.E. Rebound of five one-dimensionally compressed unsaturated granular soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 4, p. 819-822, 1980.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 963-973, 2008.

TANG, A.; CUI, Y.; ESLAMI, J.; DÉFOSSEZ, P. Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 148, p. 282-290, 2009.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction: Towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, p. 217-243, 1994.

TAYLOR, D.W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley, 1948. 700 p.

TAYLOR, R.H.; BURNETT, E. Influence of soil strength on root growth habits of plants. **Soil Science**, Baltimore, v. 98, p. 174-180, 1964.

TEIXEIRA, M.A.; MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O.A. Equipamento para extração de amostras indeformadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 693-699, 2000.

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

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 33-42, 2008.

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.

TSCHEBOTARIOFF, G.P. **Foundations, retaining and earth structures: the art of design and construction and its scientific basis in soil mechanics**. 2nd ed. Tokyo: MacGraw-Hill/Kogakusha, 1973. 655 p.

UHLAND, R.E. Physical properties of soil as modified by crops and management. **Soil Science Society of America Proceedings**, Oxford, v. 14, p. 361-366, 1949.

UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R. Soil friability. **Journal of Soil Science**, London, v. 32, n. 3, p. 203-213, 1981.

VEENHOF, D.W.; MCBRIDE, R.A. Overconsolidation in agricultural soils: I. Compression and consolidation behavior of remolded and structured soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 2, p. 362-373, 1996.

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 6, p. 1220-1225, 1984.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 4, p. 242-246, 1966.

WATTS, C.; DEXTER, A.R. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 42, n. 2, p. 253-275, 1997.

WILSON, M.J.; MALISZEWSKA-KORDYBACH, B. Soil quality, sustainable agriculture and environmental security in central and eastern. **Environmental Security**, Dordrecht, v. 69, p. 375, 2000. (Europe NATO Science Series, 2).

WUEST, S.B.; SCHILLINGER, W.F. Small-increment electric soil sampler. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 1554-1556, 2008.

ZHANG, S.; GRIP, H.; LOVDAHL, L. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 90, p. 117-125, 2006.

THE HISTORY OF THE

THE HISTORY OF THE

3 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRO-MECÂNICO DE COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE ESTRUTURAL DE SOLOS

Resumo

Tradicionalmente, as propriedades físicas densidade do solo, porosidade, condutividade hidráulica saturada e a permeabilidade ao ar têm sido utilizadas para caracterizar a estrutura do solo. Porém, essas propriedades podem não refletir os processos físicos do solo devido a alterações no arranjo estrutural decorrentes da amostragem. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e avaliar a funcionalidade de um amostrador elétrico para obter amostras indeformadas de solo, com introdução lenta do anel volumétrico, e compará-lo com um amostrador tradicional, cuja introdução no solo é feita por golpes (Uhland). Determinaram-se as propriedades supracitadas, a porosidade total e a distribuição de volume de poros, obtida a partir do teor de água volumétrico nos potenciais mátricos de 0,0 -0,5, -1,0, -6,0, -10,0 kPa, em dois solos de diferentes classes texturais (média e argilosa) sob sistema de plantio direto, localizados no campus da Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Ponta Grossa - PR. A comparação entre os amostradores indicou que algumas propriedades físicas, como a densidade do solo, foram menos alteradas no solo de textura média do que no argiloso. Para propriedades físicas relacionadas com os processos dinâmicos no solo, como a condutividade hidráulica, o modo de introduzir os anéis volumétricos para a coleta das amostras foi determinante para a qualidade dos dados. As diferenças entre os amostradores mostraram elevada magnitude de erros sistemáticos, sendo a variabilidade dos dados obtidos com o amostrador elétrico considerada a mais representativa daquela *in situ* por garantir a preservação da estrutura das amostras coletadas.

Palavras-chave: Extrator de amostras indeformadas de solo; Compactação do solo; Qualidade do solo

Abstract

Traditionally the soil physical properties bulk density, total porosity, hydraulic conductivity and air permeability have been used to characterize soil structure. However, these properties may not reflect soil physical processes, due to alteration in the soil structural arrangement caused by sampling. The objective of this study was to develop and evaluate the functionality of an electric sampler for collecting undisturbed soil samples, with slow introduction of the volumetric sampling ring as compared to a traditional sampler, whose introduction in the soil is made by hammering (Uhland). The physical properties mentioned above were determined along with soil total porosity and pore volume distribution, obtained from the water contents in the matric potentials equivalent to 0.0 -0.5, -1.0, -6.0, -10.0 kPa, in two soils of different textural classes (clay and silty) under no-tillage system, located at Experimental Farm of State University of Ponta Grossa - Paraná, Brazil. The comparison between the samplers indicated that

some physical properties, such as bulk density, were less altered in the silty soil when compared to the clay soil. For soil physical properties related to dynamic processes, e.g. hydraulic conductivity, the method for introducing the core to collect the soil samples was crucial to the quality of the data. The differences between the samplers showed high magnitude of systematic errors, with the variability of the data obtained with the electric sampler being considered most representative of *in situ* situation by ensuring the preservation of the original structure of the samples.

Keywords: Extractor undisturbed soil; Soil compaction; Soil quality

3.1 Introdução

O potencial de produção agrícola e sua sustentabilidade têm estreita relação com a qualidade física do solo. Para quantificar a qualidade física do solo é necessário obter amostras com estrutura preservada para determinar várias propriedades do solo, indicadoras dessa qualidade. Dentre os processos que afetam a qualidade física do solo destaca-se a compactação do solo. A compactação do solo é um processo que ocorre em um sistema tridimensional, induzido por estresses mecânicos comumente originados do tráfego de máquinas e da ação de implementos (FLOWERS; LAL, 1998) e/ou do pisoteio de animais (BHARATI et al., 2002). Este processo ocasiona decréscimo de volume e, conseqüentemente, aumento da densidade, principalmente devido à exclusão dos poros de maior diâmetro (DEXTER, 2004; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006), os quais causam deterioração da qualidade física do solo e limitam o potencial produtivo dos solos (KIRKEGAARD et al., 1995; BEUTLER et al., 2006). Por isso, algumas propriedades físicas podem ser utilizadas satisfatoriamente na caracterização da condição física e estrutural de um determinado solo, sendo denominados de indicadores de sua qualidade física.

A densidade do solo provavelmente é um dos indicadores da qualidade física mais amplamente medidos por relacionar o estado de compactação com o impedimento mecânico do solo às raízes. Este indicador, definido como o quociente da massa de sólidos por seu volume (BLAKE; HARTGE, 1986), é facilmente mensurado e sensível a variações da estrutura do solo em função dos sistemas de uso e manejo. Além dessa aplicação, a quantificação das propriedades físicas da camada de semeadura, a quantidade de nutrientes para as plantas, o monitoramento do estoque de carbono do

solo bem como o nível de poluentes são alguns exemplos relevantes de determinações que dependem fundamentalmente da densidade do solo.

Os amostradores de solos geralmente funcionam com a aplicação de golpes, como o de Uhland (UHLAND, 1949), amplamente difundido para a coleta de amostras indeformadas. O amostrador de Uhland permite que um cilindro, o qual contém um anel volumétrico, seja introduzido no solo, possibilitando a determinação da densidade bem como de outras propriedades físicas do solo. Contudo, devido aos golpes, é de se supor que ocorram alterações na porosidade capazes de modificar substancialmente seu comportamento físico-hídrico (McINTYRE, 1974; CHONG; KHAN; GREEN, 1982; ROGERS; CARTER, 1987). Fatores ligados ao estado de compactação e ao teor de água do solo no momento da amostragem aumentam as chances de alteração das amostras. Portanto, para estudos mais confiáveis, é fundamental uma boa qualidade da amostragem. Como exemplo, a magnitude da condutividade hidráulica pode ser resultante de diminutas mudanças na distribuição dos poros de maior diâmetro e sua continuidade (PAGLIAI et al., 2003), os quais são altamente dependentes da condição estrutural do solo (DEXTER, 2004; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006; CAVALIERI et al., 2009).

Poucos são os trabalhos que quantificam melhorias em metodologias de amostragem de solos, principalmente sem aplicação de golpes. Por exemplo, Wuest e Schillinger (2008), propuseram um amostrador de solos acionado por um atuador linear eletro-mecânico, que elimina pancadas no anel volumétrico para amostragem. Porém, a versatilidade deste tipo de amostrador ainda é relativamente baixa devido a sua reduzida portabilidade. Dessa forma, há carência no desenvolvimento de amostradores com maior portabilidade e mais adequados à amostragem de solos com estrutura indeformada, a fim de maximizar a qualidade da amostragem e, portanto, a representatividade das propriedades físicas de interesse.

Os objetivos deste trabalho incluíram: (i) desenvolver um sistema eletro-mecânico que permite a obtenção de amostras de solos sem aplicação de pancadas e (ii) avaliar o desempenho do amostrador de solo proposto a partir da determinação de algumas propriedades físicas indicadores da qualidade do solo.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Local, equipamentos e amostragem de solo

As amostras destinadas à obtenção das propriedades físicas utilizadas na comparação entre os amostradores foram coletadas em dois solos: um de classe textural franco-argilo-arenosa e outro argilo-arenosa (Tabela 1), doravante denominados como solos de texturas média e argilosa, respectivamente, ambos sob sistema de plantio direto e localizados na Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa - PR. Uma área de 20 x 10 m foi aleatoriamente dividida em cinco parcelas de 1 x 1 m, nas quais foram retiradas amostras indeformadas de solo utilizando anéis volumétricos. Os anéis, com 5 x 5 cm de diâmetro e altura, respectivamente, foram cravados nas entrelinhas da cultura de aveia, de modo que a meia altura de um anel ficasse a 5 cm de profundidade na camada de 0-10 cm e a 25 cm na camada de 20-30 cm.

Tabela 1 - Caracterização granulométrica⁽¹⁾ dos solos avaliados nas camadas de amostragem

Camada (cm)	Argila (g kg ⁻¹) ⁽²⁾	Silte (g kg ⁻¹)	Areia (g kg ⁻¹)		
			Fina	Grossa	Total
Textura média					
0-10	234	23	241	502	743
20-30	256	21	240	484	724
Textura argilosa					
0-10	476	44	266	214	480
20-30	488	35	272	204	476

⁽¹⁾: segundo Gee e Or (2002).

⁽²⁾: Argila: < 2 µm; silte: 2-50 µm; areia fina: 50-250 µm; areia grossa: 250-2000 µm; areia total: areia fina + areia grossa.

Dois amostradores foram utilizados: um do tipo Uhland (UHLAND, 1949) e um elétrico, desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP. O amostrador elétrico é basicamente composto por um atuador linear eletro-mecânico, que permite uma introdução lenta e sem golpes no anel volumétrico e no solo durante a amostragem (Figura 1). Foram coletadas cinco amostras para cada amostrador e camada de solo.

Figura 1 - Amostrador elétrico de solos: (A) dispositivo de acionamento do motor, (B) fonte de alimentação, (C) adaptador, (D) anel volumétrico, (E) parafuso para rápida montagem/desmontagem do equipamento, (F) base auxiliar, (G) conjunto alternativo composto pelo cilindro de Uhland, anel volumétrico (traço pontilhado) e adaptador e (H) atuador linear

Em cada parcela, foram tomadas amostras pareadas, cerca de 10 cm entre os centros dos cilindros volumétricos, utilizando-se o amostrador elétrico seguido do de Uhland, totalizando 40 unidades experimentais. As amostras coletadas foram revestidas com filme de PVC e mantidas sob refrigeração até a análise laboratorial. Durante a amostragem também foram coletadas amostras para determinação do teor de água do solo nas respectivas camadas.

3.2.2 Determinação das propriedades físicas do solo

Em laboratório, as 40 amostras indeformadas foram lentamente saturadas por capilaridade (utilizando água deaerada e deionizada) por 48 h, até cerca de 2/3 de sua altura. Depois de saturadas, determinou-se a condutividade hidráulica saturada do solo (k_{sat}) pela metodologia de carga decrescente (REYNOLDS; ELRICK, 2002), conforme o aparato mostrado na Figura 2, sendo expressa pela eq. (1).

Figura 2 - Vista em corte longitudinal do aparato para a determinação da condutividade hidráulica saturada do solo em laboratório

$$k_{sat} = \left(\frac{\phi}{\phi_s} \right)^2 \left(\frac{H}{t} \right) \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right), \quad (1)$$

sendo, k_{sat} é a condutividade hidráulica saturada do solo (LT^{-1}), ϕ é o diâmetro do anel volumétrico sem solo (L), ϕ_s é o diâmetro do anel volumétrico com solo (L), H , h_0 e h_1

são as alturas de referência (L) e t é o tempo (T) de deslocamento total da coluna d'água entre h_0 e h_1 .

Depois da determinação da k_{sat} , as amostras foram mantidas saturadas até serem submetidas aos potenciais mátricos de -0,5; -1; -6 e -10 kPa, em mesa de tensão (BALL; HUNTER, 1988), e -200 kPa em câmara de pressão de Richards (KLUTE, 1986), determinando-se as massas após atingirem o respectivo equilíbrio hidráulico. A microporosidade (MIC) foi estimada como o teor de água do solo no potencial mátrico de -6 kPa; a macroporosidade do solo (MAC) foi estimada pela diferença entre a porosidade total e a MIC. A P_{0-5cca} correspondeu ao volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -0,5 kPa; a P_{MAC} correspondeu ao volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -1 kPa (REYNOLDS, et al., 2002).

Após atingirem o teor de água correspondente ao potencial mátrico de -200 kPa, as amostras foram utilizadas para a determinação da permeabilidade do solo ao ar (k_a), conforme a metodologia de carga constante descrita por Ball e Schjønning (2002). O aparato experimental contém um controlador de vazão mássica para fixar, por exemplo, os valores de 4 e de 8 mL min⁻¹ de ar para fluírem sucessivamente dentro cada amostra. Há também um manômetro de pressão diferencial (resolução de 0,01 Pa) para registro das diferenças entre as pressões à entrada e à saída da amostra, modificada principalmente em função do teor de água e da estrutura do solo. A eq. (2) foi utilizada para estimar a k_a :

$$k_a = \frac{Q\eta H}{A(P_i - P_o)}, \quad (2)$$

onde, k_a é a permeabilidade do solo ao ar (L²), Q é o fluxo de volume de ar (L³T⁻¹), η é a viscosidade do ar (ML⁻¹T⁻¹), H é o comprimento da amostra (L), A é a área da secção transversal da amostra de solo (L²) e P_i e P_o são as pressões de entrada e saída da amostra, respectivamente (ML⁻¹T⁻²).

Ao final deste ensaio, as amostras foram secas em estufa a 105 °C, por 48 h, para determinações do teor de água, pela relação entre as massas de água e de solo seco, e da densidade do solo (BLAKE; HARTGE, 1986). Também foi determinada a densidade de partículas utilizando-se um picnômetro a gás (Hélio), modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation®). Para tanto, foram processadas no

picnômetro aproximadamente 8 g de terra fina seca em estufa por amostra. A porosidade total foi estimada pela eq. (3):

$$PT = 1 - \frac{Ds}{Dp}, \quad (3)$$

onde, PT é a porosidade total do solo (L^3L^{-3}), Ds é a densidade do solo (ML^{-3}) e Dp é a densidade de partículas do solo (ML^{-3}).

Ao longo deste trabalho, as medidas de Ds, PT, P_{0-5cca} , P_{MAC} , MAC, MIC e θ_{CC} serão consideradas como propriedades físicas relacionadas com os processos estáticos no solo enquanto que k_{sat} e k_a , com os processos dinâmicos.

3.2.3 Análises estatísticas

Foram realizadas análises de variância para cada área experimental, sendo aplicado o teste de Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade da distribuição dos resíduos (SHAPIRO; WILK, 1965). As médias das propriedades físicas medidas foram comparadas utilizando o teste t ($p < 0,05$) para amostras pareadas dentro de cada camada de solo e, entre estas, para amostras independentes. Outros testes estatísticos foram utilizados para quantificar o desempenho dos amostradores de solos, como visualizações gráficas, análises de regressão e coeficientes de determinação. Além destes, para quantificar os erros experimentais foram utilizadas técnicas estatísticas robustas (ZACHARIAS; HEATWOLE; COAKLEY, 1996; MESQUITA; MORAES; CORRENTE, 2002), ou seja, que não exigem distribuição normal dos dados, exceto para as eqs. (10) e (11). Essas equações requerem estimativas da variável dependente e, por isso, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade da distribuição do resíduo das regressões lineares, a fim de permitir que os erros aleatórios e sistemáticos pudessem ser calculados. Os seguintes índices estatísticos foram utilizados:

a) índice de concordância (LEGATES; McCABE, 1999):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (4)$$

b) razão de desvios (LOAGUE; GREEN, 1991):

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

c) eficiência do modelo (LEGATES; McCABE, 1999):

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|} \quad (6)$$

d) erro absoluto médio (WILLMOTT et al., 1985):

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (7)$$

e) erro máximo (LOAGUE; GREEN, 1991):

$$Emax = \max(|O_i - P_i|)_{i=1}^N \quad (8)$$

f) raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (LOAGUE; GREEN, 1991):

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (9)$$

g) componentes aleatório (RMSEa) e sistemático (RMSEs) do erro total (LEGATES; McCABE, 1999) normalizado:

$$RMSEa = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (\hat{P}_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (10)$$

$$RMSEs = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (\hat{P}_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (11)$$

g) coeficiente de massa residual (LOAGUE; GREEN, 1991):

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N O_i - \sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N O_i}, \quad (12)$$

onde, $\bar{O}$ é a média aritmética,

$$\bar{O} = N^{-1} \sum_{i=1}^N O_i$$

e $\hat{P}_i$ é a estimativa do valor da variável dependente (WILLMOTT et al., 1985),

$$\hat{P}_i = a + bO_i,$$

sendo, O_i os dados obtidos pelo amostrador tipo Uhland (equipamento de referência), P_i os dados obtidos pelo amostrador elétrico (equipamento sob teste) e N o número de observações experimentais.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Aspectos construtivos do amostrador elétrico

O amostrador elétrico (Figura 1) foi idealizado para amostragem indeformada de solos com anéis volumétricos, com o objetivo de melhor preservar a estrutura do material coletado, tanto pela ausência quanto pela aleatoriedade dos golpes, causada por desgaste físico ou inexperiência do encarregado das amostragens. Para isso, a introdução destes anéis no solo ocorre sob regime de velocidade aproximadamente constante (2 mm s^{-1} e sem aplicação de pancadas), realizada por meio de um atuador linear eletro-mecânico (Figura 1-H). Este atuador é acionado por um motor elétrico (BOSCH® - CEP 12V) e comandado manualmente por um dispositivo de controle externo ao amostrador (Figura 1-A). Mediante ensaios preliminares em campo, este tipo de motor foi escolhido por ser mais adequado devido ao seu peso e tamanho reduzidos, possibilitando que o amostrador seja leve, portátil além de sua fácil aquisição no mercado. Durante os ensaios, também foram detectadas e realizadas algumas modificações na configuração original do motor, como a troca do material da engrenagem redutora de velocidade para bronze e o isolamento do circuito elétrico interno em relação à sua carcaça, para garantir uma operação robusta e segura, respectivamente.

A energia elétrica para alimentação do motor é fornecida por uma bateria selada de 12 V, à base de gel (Figura 1-B), para evitar acidentes devido a vazamentos de eletrólitos (ácidos), o que pode ocorrer com outros tipos de bateria. Foi escolhida uma bateria com capacidade de carga de 7 Ah (Ampères-hora), pois apresentou autonomia para 60 amostragens, aproximadamente, e permitiu um rendimento de trabalho

satisfatório ao longo do dia, sendo dependente da resistência que o solo oferece à introdução do cilindro amostrador no solo. O dispositivo de acionamento do motor (Figura 1-A), composto por uma chave comutadora elétrica de 6 pólos x 3 posições x 15 CA (corrente alternada), de acionamentos rápidos, favoreceu um posicionamento mais preciso do atuador linear eletro-mecânico. Adicionalmente, ao fim da utilização do amostrador, pode-se rapidamente desmontá-lo por meio de parafusos laterais (Figura 1-E), o que permitiu diminuir sua altura, com melhor adequação ao transporte.

A base auxiliar (Figura 1-F) apresentou formato adequado para os pés do operador, o que diminuiu o pisoteio na área experimental durante a amostragem. Além disso, sua maior área de contato em relação àquela dos pés do operador diminuiu a pressão aplicada ao solo e, portanto, favoreceu a manutenção das condições estruturais adjacente à amostrada coletada. A base auxiliar também permitiu que houvesse maior estabilidade durante todo o processo de introdução do cilindro de Uhland, eliminando oscilações verticais e horizontais na amostragem.

3.3.2 Protocolo para utilização do amostrador elétrico de solos

Depois dos ensaios preliminares em campo, elaborou-se uma seqüência lógica dos procedimentos para a coleta de amostras de solo utilizando o amostrador elétrico. Inicialmente, assim como para o amostrador de Uhland, deve-se preparar o local de amostragem por meio da limpeza superficial do solo, para retirar a vegetação e, ou, materiais sem interesse de serem coletados bem como realizar seu nivelamento, eliminando as irregularidades do terreno para melhor apoio da base do amostrador. Esse amostrador permite a introdução, individualmente, de anéis volumétricos com tamanho limite de 7,5 x 10 cm de diâmetro e altura, respectivamente, podendo opcionalmente ser acondicionados em um cilindro de Uhland (Figura 1-G).

Para introduzir os anéis volumétricos para amostragem de solos é necessário utilizar um adaptador (Figura 1-C), que permite a transmissão de movimento do eixo do atuador linear eletro-mecânico para a borda superior do anel volumétrico (Figura 1-D), empurrando-o diretamente para dentro do solo. Ademais, deve-se utilizar a base auxiliar para contrapesos (Figura 1-F) com carga maior que a resistência do solo, para permitir

a cravação vertical do anel volumétrico no solo e evitar desequilíbrios do amostrador elétrico durante seu funcionamento e, conseqüentemente, possíveis danos às amostras coletadas. O próprio usuário pode servir como contrapeso ao pisar com ambos os pés sobre esta base. Em solos com resistência relativamente elevada, pode-se utilizar duas pessoas como contrapesos, uma em cada lado da base auxiliar. Em casos mais extremos, comumente ao amostrador de Uhland, o prévio umedecimento do solo com água é uma alternativa que possibilita a coleta de amostras devido à redução da coesão do solo (CHONG; KHAN; GREEN, 1982; GROSSMAN; REINSCH, 2002) e melhora a desempenho do amostrador elétrico.

Depois de devidamente posicionado, o usuário deve controlar os movimentos verticais (descida e subida) e o tempo de acionamento do atuador linear eletromecânico por meio do dispositivo de acionamento do motor (Figura 1-A). Assim, visualmente, o usuário deve finalizar o movimento descendente do eixo do atuador linear após o anel volumétrico estar totalmente introduzido no solo. Em seguida, deve retorná-lo à posição superior. Para finalizar o procedimento de amostragem, caso seja utilizado o anel volumétrico confinado em um cilindro de Uhland, a remoção desse conjunto no solo pode ser realizada com o auxílio de uma ferramenta (Figura 3-D) que se encaixa na parte superior do cilindro de Uhland e permite removê-lo rapidamente pela aplicação de um movimento giratório (para quebrar o torrão em sua parte inferior) seguido de um ascendente.

3.3.3 Experimentação com amostradores de solo

Considerações iniciais

As condições experimentais foram similares entre os amostradores de Uhland e o elétrico. Em cada amostrador foi utilizado um cilindro de Uhland (UHLAND, 1949) (Figura 1-G) para acondicionar um anel volumétrico para amostragem de solo (Figuras 1-D e 3-E). A coleta de amostras de forma pareada permitiu a comparação dos amostradores mediante os resultados das propriedades físicas do solo. Dessa forma, a variabilidade dos dados entre os pares experimentais pode ser atribuída principalmente

Figura 3 - Amostrador elétrico no campo e etapas da amostragem. Os detalhes mostram: (A) cilindro de Uhland com um anel volumétrico em seu interior mais o adaptador (Figura 1-C), (B) operador como contrapeso, (C) conjunto contendo um cilindro de Uhland mais um anel volumétrico para amostragem totalmente introduzido no solo, com suas superfícies interna e externa ao cilindro de Uhland no mesmo nível, (D) retirada da amostra com uma ferramenta alternativa à escavação com faca e (E) amostra indeformada de solo com seu volume ajustado ao do anel volumétrico

aos erros de amostragem, que serão mais expressivos para um ou outro amostrador em função de seus aspectos funcionais. Isto indica que o modo de introdução dos anéis volumétricos para amostragem pode influir na qualidade da amostra de solo coletada.

O amostrador de Uhland, utilizado como referência neste trabalho devido a sua ampla difusão em pesquisas científicas, produz vibrações no solo devido aos golpes aplicados durante a amostragem, que podem ocasionar maiores distúrbios na estrutura do solo coletado (CHONG; KHAN; GREEN, 1982; ROGERS; CARTER, 1987). Observações práticas em campo confirmam que, em solos mais secos, podem ocorrer fraturamentos do solo dentro do anel volumétrico para amostragem, modificando sua estrutura original. Por outro lado, em solos mais úmidos, freqüentemente é percebida a

ocorrência de compactação das amostras devido à maior adesão do solo às paredes do anel volumétrico (McINTYRE, 1974), o que também compromete a qualidade da amostra e, conseqüentemente, a representatividade das propriedades do solo. Portanto, o teor de água adequado é um dos pré-requisitos que, necessariamente, devem ser atendidos durante a coleta de amostras. Neste trabalho, o teor de água sempre esteve adequado à utilização do amostrador de Uhland. Durante as amostragens, o teor médio de água no solo de textura média ($0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), pouco inferior à capacidade de campo ($0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e não diferiu entre as camadas de solo ($p>0,05$). Já o teor médio de água no solo argiloso, na camada de 0-10 cm, foi de $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e esteve um pouco mais próximo à capacidade de campo média ($0,43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$); na camada de 20-30 cm o seu teor médio de água foi de $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e não diferiu ($p>0,05$) daquele da capacidade de campo.

Para a amostragem de solo sem a aplicação de golpes, existem algumas recomendações a respeito da velocidade de introdução do anel volumétrico, sendo que esta deve ser constante e na ordem de $150 \text{ a } 300 \text{ mm s}^{-1}$ (McINTYRE, 1974). Embora o amostrador construído opere a uma velocidade bastante inferior ($\approx 2 \text{ mm s}^{-1}$), não se pode considerar que prejudique a qualidade da amostra. Uma velocidade 75 a 150 vezes maior diminuiria o tempo de amostragem, mas exigiria um motor com maior torque, portanto, mais pesado e caro, diminuindo a desejada portabilidade do equipamento. Além disso, não há prejuízo na qualidade da amostra e, para as condições experimentais deste trabalho, o amostrador elétrico se mostrou eficiente em preservar a estrutura das amostras. Esta constatação decorreu da observação de que, ao introduzir o cilindro de Uhland no solo, e previamente à sua retirada, verificou-se que a superfície superior do solo no anel volumétrico teve seu nível similar àquele imediatamente externo a este (Figura 3-C). Isto indica que não houve compactação da amostra no campo e, inicialmente, a amostragem realizada foi correta (BLAKE; HARTGE, 1986).

O tempo de coleta das amostras com o amostrador elétrico foi aproximadamente 50 % maior em relação ao de Uhland. Embora o tempo tenha sido maior, o amostrador elétrico requereu um menor esforço do usuário durante sua utilização em relação ao amostrador de Uhland. Por exemplo, ao longo do dia, a força utilizada para introduzir o

anel volumétrico com o amostrador de Uhland geralmente varia devido ao cansaço do usuário. Isso dificulta a manutenção de um único posicionamento vertical do amostrador de Uhland, sendo fonte de possíveis distúrbios nas amostras de solo coletadas. Por outro lado, o amostrador elétrico não apresenta essa limitação, o que contribui para ganhos em relação à qualidade das amostras coletadas devido à minimização de distúrbios no solo.

Análise exploratória dos dados

As propriedades físicas do solo apresentam variabilidade amplamente conhecida, podendo ter distintos valores para uma determinada área. Caso estes valores sejam bastante diferenciados, porém não discrepantes, haverá grande amplitude total e elevados coeficientes de variação (WARRICK; NIELSEN, 1980; DIIWU et al., 2001). O grau de variabilidade das propriedades físicas do solo pode ser analisado a partir do coeficiente de variação (CV), com base na classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), sendo os limites $CV < 12 \%$, $12 \leq CV < 52 \%$, e $CV \geq 52 \%$ para propriedades do solo com baixa, média e alta variabilidade, respectivamente. Ademais, o coeficiente de variação permite a comparação da dispersão relativa entre as propriedades físicas do solo, pois independe das unidades de medidas envolvidas.

Para a maioria das propriedades físicas (Tabelas 2 e 3) foram observados valores de coeficientes de variação que indicam baixa a média variabilidade, sendo poucos os classificados como alta. Em geral, as propriedades estáticas apresentaram menores coeficientes de variação que as dinâmicas, principalmente para os dados obtidos com o amostrador elétrico. Em ambos os solos, a D_s , PT , P_{0-5cca} , P_{MAC} , MAC , MIC e θ_{cc} apresentaram CV compatíveis com aqueles propostos por Warrick e Nielsen (1980), exceto na camada de 0-10 cm do solo arenoso onde P_{0-5cca} teve alta variabilidade para o amostrador de Uhland. Warrick e Nielsen (1980) classificaram como alta a variabilidade dos dados da k_{sat} ($CV = 52 \%$). Porém, no solo de textura média, a k_{sat} não se enquadrou nessa classificação ($CV < 45 \%$), enquanto que no solo argiloso a variabilidade foi $> 57 \%$, em concordância com Warrick e Nielsen (1980). A maioria dos valores dos CV para a k_a indicou variabilidade dos dados classificada entre

Tabela 2 - Resumo estatístico das propriedades físicas do solo de textura média nas camadas 0-10 e 20-30 cm para dois tipos de amostradores. (N = 5)

Propriedade ⁽¹⁾	Amostrador Uhland						Amostrador Elétrico					
	Mín	Máx	Mediana	Média ⁽²⁾	DP	CV	Mín	Máx	Mediana	Média	DP	CV
Camada de 0-10 cm												
Ds	1,484	1,587	1,551	1,542 Aa	0,047	3,0	1,478	1,541	1,505	1,507 Aa	0,028	1,8
PT	0,392	0,432	0,404	0,409 Ab	0,018	4,5	0,410	0,435	0,424	0,422 Ab	0,011	2,6
P _{0-5cca}	0,002	0,013	0,006	0,006 Ba	0,004	65,3	0,019	0,043	0,023	0,027 Aa	0,009	33,8
P _{MAC}	0,009	0,016	0,012	0,012 Bb	0,002	20,1	0,028	0,052	0,032	0,035 Aa	0,010	27,7
MAC	0,042	0,101	0,070	0,073 Ab	0,025	34,0	0,060	0,103	0,070	0,076 Ab	0,017	22,6
MIC	0,323	0,350	0,336	0,336 Aa	0,012	3,6	0,332	0,360	0,344	0,347 Aa	0,011	3,1
θ _{CC}	0,259	0,307	0,273	0,280 Aa	0,022	7,9	0,265	0,321	0,291	0,290 Aa	0,022	7,6
k _{sat}	36,085	96,282	75,863	69,593 Bb	22,566	32,4	90,492	219,789	112,783	132,410 Ab	52,257	39,5
k _a	2,653	3,560	2,947	2,994 Bb	0,339	11,3	3,124	20,155	9,057	10,263 Ab	7,206	70,2
Camada de 20-30 cm												
Ds	1,428	1,519	1,447	1,464 Ab	0,036	2,5	1,404	1,478	1,415	1,433 Ab	0,034	2,4
PT	0,422	0,457	0,449	0,442 Aa	0,015	3,3	0,436	0,465	0,461	0,454 Aa	0,013	2,9
P _{0-5cca}	0,009	0,015	0,011	0,011 Ba	0,002	21,9	0,019	0,048	0,031	0,032 Aa	0,012	35,9
P _{MAC}	0,015	0,024	0,018	0,019 Ba	0,004	21,0	0,024	0,060	0,044	0,043 Aa	0,014	32,4
MAC	0,099	0,155	0,137	0,135 Aa	0,022	16,3	0,139	0,177	0,151	0,157 Aa	0,016	10,3
MIC	0,299	0,325	0,320	0,316 Ab	0,011	3,4	0,288	0,318	0,293	0,297 Bb	0,012	4,1
θ _{CC}	0,263	0,278	0,275	0,271 Aa	0,007	2,7	0,246	0,273	0,257	0,257 Ab	0,011	4,3
k _{sat}	137,990	197,016	173,551	174,151 Ba	23,358	13,4	229,392	583,809	318,341	379,258 Aa	164,689	43,4
k _a	7,704	20,801	9,566	12,695 Ba	5,875	46,3	11,685	42,399	22,606	26,120 Aa	11,627	44,5

(1): Ds, densidade do solo (Mg m^{-3}); PT, porosidade total do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); P_{0-5cca}, volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -0,5 kPa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); P_{MAC}, volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -1 kPa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); MAC, macroporosidade do solo; MIC, microporosidade do solo; θ_{CC}, teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na capacidade de campo ou equivalente ao potencial mátrico de -10 kPa; k_{sat}, condutividade hidráulica saturada do solo (mm h^{-1}); k_a, permeabilidade do solo ao ar (μm^2); Mín, mínimo valor; Máx, máximo valor; DP, desvio padrão da média; CV, coeficiente de variação (%).

(2): Médias seguidas de letras maiúsculas e minúsculas iguais, na linha e na coluna, respectivamente, não diferem entre si a 5 % de probabilidade pelo teste t. O teste de médias para a k_{sat} e a k_a foram realizados mediante transformação logarítmica dos dados.

média e alta. O CV indica a variabilidade relativa de variáveis e, do ponto de vista de amostragem, a utilização de um mesmo número de amostras para a comparação conjunta das propriedades físicas do solo pode ocasionar diferenças na sensibilidade das estimativas de suas médias. Assim, para as propriedades físicas do solo com CV alto, é necessário maior número de amostras para que as medidas estatísticas tenham o mesmo grau de sensibilidade.

Tabela 3 - Resumo estatístico das propriedades físicas do solo de textura argilosa nas camadas 0-10 e 20-30 cm para dois tipos de amostradores. (N = 5)

Propriedade ⁽¹⁾	Amostrador Uhland						Amostrador Elétrico					
	Mín	Máx	Mediana	Média ⁽²⁾	DP	CV	Mín	Máx	Mediana	Média	DP	CV
Camada de 0-10 cm												
Ds	1,231	1,358	1,287	1,286 Aa	0,050	3,9	1,174	1,255	1,199	1,213 Ba	0,039	3,2
PT	0,478	0,531	0,502	0,505 Ba	0,020	3,9	0,515	0,546	0,536	0,531 Aa	0,014	2,7
P _{0-5cca}	0,011	0,041	0,031	0,028 Aa	0,011	38,0	0,027	0,048	0,034	0,034 Ab	0,009	24,8
P _{MAC}	0,023	0,043	0,036	0,035 Aa	0,007	21,1	0,033	0,060	0,038	0,041 Ab	0,011	26,2
MAC	0,042	0,059	0,055	0,052 Ab	0,008	15,0	0,048	0,100	0,070	0,072 Ab	0,019	26,3
MIC	0,421	0,475	0,461	0,453 Aa	0,023	5,0	0,446	0,471	0,458	0,459 Aa	0,010	2,2
θ _{CC}	0,391	0,456	0,438	0,426 Aa	0,028	6,5	0,420	0,450	0,426	0,429 Aa	0,012	2,9
k _{sat}	1,970	16,537	9,274	9,349 Ab	5,340	57,1	16,847	121,904	18,508	48,092 Ab	46,211	96,1
k _a	1,049	2,095	1,321	1,506 Ab	0,417	27,7	1,988	22,258	2,659	8,339 Aa	8,855	106,2
Camada de 20-30 cm												
Ds	1,278	1,320	1,313	1,304 Aa	0,018	1,4	1,178	1,293	1,272	1,257 Ba	0,046	3,7
PT	0,500	0,515	0,501	0,506 Ba	0,007	1,4	0,511	0,552	0,517	0,523 Aa	0,017	3,2
P _{0-5cca}	0,025	0,038	0,029	0,030 Ba	0,006	19,2	0,038	0,066	0,047	0,050 Aa	0,011	22,6
P _{MAC}	0,034	0,044	0,037	0,039 Ba	0,004	11,2	0,055	0,070	0,059	0,061 Aa	0,006	10,6
MAC	0,085	0,118	0,101	0,100 Ba	0,013	13,0	0,118	0,161	0,141	0,137 Aa	0,018	13,1
MIC	0,383	0,424	0,405	0,406 Ab	0,016	3,9	0,376	0,394	0,390	0,386 Bb	0,008	2,2
θ _{CC}	0,359	0,398	0,384	0,380 Ab	0,015	3,8	0,349	0,371	0,357	0,359 Bb	0,011	2,9
k _{sat}	12,859	98,495	49,621	54,226 Ba	33,172	61,2	39,917	445,023	122,284	198,409 Aa	170,541	86,0
k _a	2,442	15,717	7,758	8,318 Aa	4,795	57,6	6,030	49,300	16,430	21,917 Aa	17,502	79,9

(1): Ds, densidade do solo (Mg m^{-3}); PT, porosidade total do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); P_{0-5cca}, volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -0,5 kPa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); P_{MAC} volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -1 kPa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); MAC, macroporosidade do solo; MIC, microporosidade do solo; θ_{CC}, teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na capacidade de campo ou equivalente ao potencial mátrico de -10 kPa; k_{sat}, condutividade hidráulica saturada do solo (mm h^{-1}); k_a, permeabilidade do solo ao ar (μm^2); Mín, mínimo valor; Máx, máximo valor; DP, desvio padrão da média; CV, coeficiente de variação (%).

(2): Médias seguidas de letras maiúsculas e minúsculas iguais, na linha e na coluna, respectivamente, não diferem entre si a 5 % de probabilidade pelo teste *t*. O teste de médias para a k_{sat} e a k_a foram realizados mediante transformação logarítmica dos dados.

Os valores da média e mediana (Tabelas 2 e 3) foram iguais ou muito próximos para as propriedades Ds, PT, P_{0-5cca}, P_{MAC}, MAC, MIC e θ_{CC}. Isso é um indicativo de que as observações experimentais foram distribuídas simetricamente em torno da média e da mediana e que estas medidas podem ser consideradas como valores típicos do conjunto de dados obtidos, ou seja, os resultados observados podem ser sumarizados por uma dessas medidas, com exceção de k_{sat} e k_a. A diferença entre o valor médio e mediano para a k_{sat} e a k_a foi acentuada. Estes resultados indicam que as observações

experimentais da k_{sat} e da k_a provavelmente não foram distribuídas simetricamente em torno da média e da mediana, o que requer prévia transformação desses dados para que os resultados experimentais possam ser analisados e interpretados corretamente (MESQUITA; MORAES; CORRENTE, 2002).

Embora a k_{sat} e a k_a não tenham apresentado simetria em torno da média e da mediana, os dados obtidos com o amostrador elétrico possuem maior amplitude e magnitude entre seus valores mínimos e máximos em relação aos de Uhland, principalmente para o solo argiloso (Tabela 2 e 3). Essas maiores faixas de valores obtidas para a k_{sat} e a k_a são esperadas como as mais representativas da variabilidade espacial entre as amostras e, portanto, seus valores não foram considerados como discrepantes. Isso pode ser explicado pela estreita dependência da k_{sat} e da k_a pela condição estrutural do solo (ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006; POULSEN; BLENDSTRUP; SCHJØNNING, 2008; CAVALIERI et al., 2009). Durante a amostragem dos solos, é aceitável supor que algum grau de compactação possa ter ocorrido nas amostras de solo (McINTYRE, 1974). Por exemplo, para a D_s , os dados obtidos com o amostrador de Uhland geralmente apresentaram valores numericamente maiores em relação aos do amostrador elétrico, sugerindo que ocorreram mais distúrbios na estrutura das amostras obtidas mediante a aplicação de golpes. Isto corroborou as menores sobreposições das faixas de valores de k_{sat} e k_a entre os tratamentos. Esta explicação também pode ser estendida às demais propriedades físicas dos solos de texturas média e argilosa, evidenciando que a variabilidade dos dados pode ter sido influenciada pelo modo de introdução do anel volumétrico para amostragem de solos.

Análises de variância e teste de médias

O parâmetro W do teste de Shapiro-Wilk indica se as amostras ($N < 50$) provêm de uma distribuição normal de probabilidade (SHAPIRO; WILK, 1965). Neste estudo, os resíduos de cada análise de variância foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk e apresentaram valores elevados da estatística W , evidenciando que não houve desvios à normalidade de distribuição ($p > 0,05$). Apenas para a condutividade hidráulica saturada e a permeabilidade do solo ao ar foram realizadas transformação logarítmica dos dados. Essas duas propriedades do solo comumente requerem transformação de dados

para sua adequação às pressuposições básicas dos testes estatísticos paramétricos (McINTYRE; TANNER, 1959; LOGSDON; JAYNES, 1996; MESQUITA, MORAES; CORRENTE, 2002).

Pequenos distúrbios na estrutura do solo podem ocasionar sua compactação, o que impede a obtenção de amostras de solo verdadeiramente indeformadas (McINTYRE, 1974). A compactação altera a estrutura original do solo devido ao rearranjo dos agregados na matriz e expulsão de ar (HAKANSSON; VOORHEES, 1998), o que reduz seu espaço poroso total, transformando poros de maiores diâmetro em menores (DEXTER, 2004; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006) os quais podem aumentar a força capilar de retenção de água no solo (ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006). Portanto, nesta pesquisa, era esperado que os distúrbios decorrentes da amostragem dos solos resultassem em decréscimos nos valores originais das propriedades físicas PT , P_{0-5cca} , P_{MAC} , MAC , k_{sat} e k_a além de incrementos na D_s , MIC e θ_{CC} (Tabelas 2 e 3) com magnitudes dependentes do modo de introdução do anel volumétrico e das características intrínsecas dos solos, como sua composição granulométrica.

Entretanto, apenas para algumas propriedades físicas estáticas do solo de textura média estes resultados esperados foram concordantes. Considerando a camada de 0-10 cm, a maioria dos valores médios de D_s , PT , MAC , MIC e θ_{CC} não apresentou diferenças ($p>0,05$) entre os amostradores (Tabela 2). Também, na camada de 20-30 cm, as médias da D_s , PT , MAC e θ_{CC} não apresentaram diferenças ($p>0,05$), enquanto que a MIC teve valor médio maior ($p<0,05$) para o amostrador de Uhland. Já as médias das porosidades P_{0-5cca} e P_{MAC} sempre foram maiores ($p<0,05$) para o amostrador elétrico nas duas camadas de solo, sugerindo que o amostrador de Uhland compactou o solo. Exceto para a P_{0-5cca} e a P_{MAC} , que consistem em poros de diâmetros maiores (0,6 e 0,3 mm, respectivamente) e mais susceptíveis a alterações pela compactação do solo (DEXTER, 2004; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006), de modo geral, o teste de médias mostrou que a magnitude das demais propriedades físicas foi pouco afetada pelo modo de introdução do anel volumétrico no solo.

Em contraste com o solo de textura média, as propriedades físicas estáticas do solo argiloso sofreram maiores alterações. Na camada de 0-10 cm (Tabela 3), as

médias da D_s e PT foram maiores para os amostradores de Uhland e elétrico, respectivamente, sendo que a MAC teve média maior para o amostrador elétrico a 10 % de probabilidade. Neste mesmo solo, na camada de 20-30 cm, as médias da D_s , MIC e θ_{CC} foram maiores ($p < 0,05$) para o amostrador de Uhland, enquanto que as médias da PT , P_{0-5cca} , P_{MAC} e MAC foram maiores ($p < 0,05$) para o amostrador elétrico. Estes resultados confirmam a compactação do solo de textura mais fina pelo amostrador tipo Uhland e evidenciam a importância do modo de introdução do anel volumétrico no solo na preservação da estrutura das amostras coletadas. A utilização do amostrador de Uhland gerou resultados menos representativos devido à compactação decorrente da amostragem. McIntyre (1974) sugere que isso ocorre porque, além da adesão do solo às paredes do anel volumétrico, a força de atrito estática se torna dominante à medida que o anel é introduzido, o que incrementa a resistência à penetração e pode perturbar a estrutura da amostra. Chong, Khan e Green (1982), afirmam que esses resultados também se devem às vibrações ocasionadas pelos golpes aplicados ao anel volumétrico.

As propriedades dinâmicas, k_{sat} e k_a , permitem avaliar o grau de funcionalidade do sistema poroso dos solos (ELLIES; GREZ; RAMIREZ, 1997; CAVALIERI et al., 2009). Na comparação entre as amostras do solo de textura média, nas duas camadas avaliadas, a k_{sat} e a k_a apresentaram médias maiores ($p < 0,05$) para o amostrador elétrico (Tabela 2), sugerindo a preservação da porosidade durante o processo de amostragem. Por outro lado, no solo argiloso, o teste de médias foi menos sensível em detectar diferenças para as médias da k_{sat} e da k_a na camada de 0-10 cm (Tabela 3), isto é, as médias dessas propriedades também foram maiores para o amostrador elétrico, mas apenas a 10 % de probabilidade. Já na camada de 20-30 cm, as médias da k_{sat} e da k_a novamente foram maiores para o amostrador elétrico, a 5 e a 10 % de probabilidade, respectivamente. Estes resultados mostram que as propriedades físicas dinâmicas do solo foram as mais adequadas em detectar as modificações na estrutura das amostras e também indicam diferenças importantes entre os amostradores, embora o teste de médias tenha sido pouco sensível em identificar os efeitos do modo de introdução do anel volumétrico. Provavelmente, isso ocorreu porque é comum não haver diferenças significativas entre as médias dos tratamentos quando o número de

observações experimentais é pequeno ($N = 5$), visto que as variabilidades da k_{sat} e da k_a são relativamente altas e limitam o poder de testes paramétricos, como o teste t , (GUROVICH, 1982; LAL, 1999; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006).

Também foram avaliadas as diferenças médias das propriedades físicas entre as camadas de solo, fixando-se o efeito do amostrador. No solo de textura média (Tabela 2), o amostrador de Uhland permitiu obter médias diferentes ($p < 0,05$) para a maioria das propriedades físicas, exceto para a P_{0-5cca} e o θ_{CC} . Para o amostrador elétrico, apenas as médias da P_{0-5cca} e da P_{MAC} não foram diferentes ($p > 0,05$). No solo argiloso (Tabela 3), as médias obtidas com o amostrador de Uhland não foram diferentes ($p > 0,05$) para as propriedades físicas D_s , PT , P_{0-5cca} e P_{MAC} . Nesse mesmo solo, os resultados obtidos com o amostrador elétrico foram similares àqueles de Uhland, com exceção para médias da P_{0-5cca} ($p < 0,05$) e da k_a ($p > 0,05$). Exceto para k_a , que se enquadra nas explicações anteriores sobre as limitações dos testes paramétricos e a variabilidade dos dados, o desempenho dos amostradores em identificar as diferenças entre as propriedades físicas nas duas camadas avaliadas pouco diferiu para a maioria dos resultados de ambos os solos.

Componentes dos erros experimentais

O erro experimental é a diferença entre o valor real de uma grandeza física e seu valor obtido por medições experimentais. Mesmo que a experimentação seja realizada com o máximo de cuidado, sempre há fontes de erro que podem afetá-la, podendo ser do tipo sistemático ou aleatório. Geralmente, os erros sistemáticos são causados por fontes identificáveis e podem ser eliminados ou compensados. Este tipo de erro gera medidas sistematicamente acima ou abaixo do valor real, prejudicando sua exatidão. Nesta pesquisa, os erros sistemáticos indicam a diferença na magnitude das propriedades físicas do solo obtida em função do modo de introdução do anel volumétrico no solo. Já os erros aleatórios decorrem de fatores imprevisíveis: são flutuações que fazem com que aproximadamente a metade das medidas realizadas esteja desviada para mais e, a outra, para menos, afetando sua precisão, sendo que nem sempre é possível identificar suas fontes. Portanto, a melhoria da exatidão está

associada à magnitude dos erros sistemáticos, os quais têm influência direta na avaliação da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo.

As Figuras 4, 5 e 6 mostram os modelos de regressão linear para as propriedades físicas, utilizando os dados pareados obtidos com os amostradores de Uhland e o elétrico. De modo geral, os gráficos mostram o comportamento das propriedades físicas e permitem definir a tendência de disparidade entre essas medidas em função do tipo de amostrador de solo. Em ambos os solos, foram observados valores de PT , P_{0-5cca} , P_{MAC} , MAC , k_{sat} e k_a maiores para o amostrador elétrico em relação àqueles de Uhland, ratificados pelos pontos experimentais geralmente localizados acima da linha 1:1. Por outro lado, a D_s apresentou, mais freqüentemente, maiores valores para o amostrador de Uhland. Para a MIC e o θ_{cc} , na camada de 20-30 cm, todos os valores foram maiores para o amostrador de Uhland enquanto que, camada de 0-10 cm, essas propriedades apresentaram valores mais igualmente distribuídos em torno da linha 1:1. O comportamento das propriedades físicas medidas reflete os efeitos da compactação do solo, verificados pela redução do espaço poroso (DEXTER, 2004; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006) e aumento da retenção de água nos poros de diâmetro menor (ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006), comentados anteriormente, os quais tiveram magnitudes dependentes fundamentalmente do modo de introdução do anel volumétrico no solo.

Para os solos avaliados, os valores dos coeficientes de determinação (R^2) foram menores do que 0,7, demonstrando baixa precisão entre os dados gerados pelos amostradores (Figuras 4, 5 e 6). Porém, no solo argiloso, na camada de 0-10 cm, a MIC apresentou $R^2 > 0,70$ e, entre 20-30 cm, a P_{0-5cca} e a P_{MAC} apresentaram R^2 igual a 0,97 e 0,87, respectivamente. Entretanto, analisar a relação entre as variáveis experimentais apenas pelo coeficiente de determinação pode não ser suficiente para gerar conclusões adequadas sobre o desempenho dos amostradores, fato que se deve à insensibilidade do R^2 ao tamanho da diferença entre um valor de referência e um valor obtido por outros métodos (WILLMOTT; WICKS, 1980; LEGATES; McCABE, 1999).

Figura 4 - Resultados das regressões lineares entre algumas propriedades físicas obtidas com os amostradores de Uhland e o elétrico para os solos de texturas média (A) e argilosa (B)

Figura 5 - Resultados das regressões lineares entre algumas propriedades físicas obtidas com os amostradores de Uhland e o elétrico para os solos de texturas média (A) e argilosa (B)

Figura 6 - Resultados das regressões lineares entre algumas propriedades físicas obtidas com os amostradores de Uhland e o elétrico para os solos de texturas média (A) e argilosa (B)

Para contornar essa possível fragilidade do R^2 , pode-se utilizar índices estatísticos (Tabelas 4 e 5) que não requerem distribuição normal de probabilidade dos dados experimentais, permitindo avaliar mais adequadamente o grau de ajustamento entre os valores das propriedades físicas obtidos com o amostrador elétrico em relação aos de Uhland. Caso o grau de ajustamento entre os dados gerados por ambos os amostradores fosse perfeito, esses índices resultariam em $d = RD = EF = 1$ e $Emáx = MAE = RMSE = RMSEa = RMSEs = CMR = 0$. Considerando o índice d , que reflete a homogeneidade da dispersão dos dados em relação à linha 1:1 (Figuras 4, 5 e 6), sua magnitude foi menor que 0,63 e 0,43 para os solos de textura média e argilosa, respectivamente. Apenas o θ_{cc} , na camada de 0-10 cm do solo de textura média, apresentou valores do R^2 e do índice d acima de 0,6. Isso indica que, mesmo quando o R^2 apresentou valores mais elevados, o modo de introdução do anel volumétrico no solo interferiu na exatidão das medições das propriedades físicas, sendo que suas médias foram distintas entre os amostradores, algo pouco detectado pelo teste t para os solos avaliados (Tabelas 2 e 3).

Os demais índices estatísticos complementam a avaliação sobre os efeitos do modo de introdução do anel volumétrico na quantificação das propriedades físicas do solo. Por exemplo, na camada de 0-10 cm do solo de textura média, as propriedades D_s , PT e θ_{cc} tiveram valores da RD mais próximos da unidade (ideal), significando que a dispersão dos dados de ambos os amostradores de solo foram mais similares. Para o solo argiloso, nessa mesma camada, isso foi observado apenas para a P_{0-5cca} . Entretanto, em ambos os solos, os valores de EF negativos ou mais próximos de zero indicaram que as médias dos dados não foram consistentes entre os amostradores utilizados. Ademais, os índices MAE e $Emáx$, que medem, respectivamente, o erro médio absoluto e o erro máximo entre os dados dos amostradores, apresentaram magnitudes mais elevadas para as propriedades P_{0-5cca} , P_{MAC} , k_{sat} e k_a para o solo de textura média, cujos valores foram muito próximos ou superiores à média obtida com o amostrador de Uhland. Já para o solo argiloso, o MAE e o $Emáx$ também foram mais expressivos para essas mesmas propriedades do solo de textura média, exceto na camada de 0-10 cm para a P_{0-5cca} e a P_{MAC} . Já o $RMSE$ ou, simplesmente, o erro total

Tabela 4 - Propriedades físicas do solo e índices estatísticos obtidos da relação entre os amostradores elétrico e o de Uhland para o solo de textura média

Propriedade ⁽¹⁾	Índices estatísticos ⁽²⁾									
	R ²	d	RD	EF	MAE	Emáx	CMR	RMSE	RMSEa	RMSEs
Camada de 0-10 cm										
Ds	0,524	0,524	0,947	0,091	0,035	0,082	0,023	2,97	1,10	2,76
PT	0,594	0,540	1,004	0,148	0,013	0,031	-0,032	4,16	1,51	3,88
P _{0-5cca}	0,027	0,117	0,028	-6,522	0,021	0,036	-3,270	359,91	127,21	336,55
P _{MAC}	0,008	0,072	0,008	-11,929	0,023	0,040	-1,899	204,32	71,35	191,48
MAC	0,392	0,534	2,071	0,247	0,015	0,032	-0,033	24,01	16,25	17,64
MIC	0,019	0,409	0,576	-0,337	0,013	0,037	-0,032	5,63	2,86	4,85
θ _{CC}	0,611	0,625	0,774	0,246	0,014	0,031	-0,038	6,05	4,40	4,15
k _{sat}	0,045	0,212	0,066	-2,717	62,817	140,912	-0,903	112,59	65,64	91,47
k _a	0,152	0,030	0,001	-31,094	7,270	17,204	-2,428	322,03	198,26	253,77
Camada de 20-30 cm										
Ds	0,001	0,423	0,543	-0,318	0,038	0,115	0,021	3,74	2,10	3,10
PT	0,016	0,472	0,573	-0,176	0,014	0,043	-0,028	4,64	2,68	3,77
P _{0-5cca}	0,000	0,072	0,008	-11,829	0,021	0,039	-1,959	218,48	94,95	197,06
P _{MAC}	0,156	0,126	0,018	-5,917	0,024	0,044	-1,233	143,94	59,57	131,01
MAC	0,140	0,362	0,543	-0,595	0,024	0,048	-0,166	22,06	10,00	19,65
MIC	0,054	0,337	0,194	-1,216	0,019	0,032	0,059	7,12	3,39	6,27
θ _{CC}	0,053	0,342	0,150	-1,172	0,014	0,031	0,052	6,44	3,52	5,40
k _{sat}	0,146	0,074	0,007	-11,475	205,106	413,999	-1,178	142,81	78,18	119,51
k _a	0,060	0,286	0,096	-1,696	13,425	32,833	-1,058	133,98	79,44	107,89

(1): Ds, densidade do solo (Mg m^{-3}); P_{0-5cca}, volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -0,5 kPa; P_{MAC}, volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -1 kPa; MAC, macroporosidade do solo; MIC, microporosidade do solo; θ_{CC}, teor de água no solo na capacidade de campo ou equivalente ao potencial mátrico de -10 kPa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); k_{sat}, condutividade hidráulica saturada do solo (mm h^{-1}); k_a, permeabilidade do solo ao ar (μm^2).

(2): R², coeficiente de determinação; d, coeficiente de concordância; RD, razão de desvios; EF, coeficiente de eficiência; MAE, erro absoluto médio; Emáx, erro máximo; RMSE, raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado; RMSEa, raiz quadrada do erro aleatório médio normalizado; RMSEs, raiz quadrada do erro sistemático médio normalizado; CMR, coeficiente de massa residual. MAE e Emáx possuem a mesma unidade da respectiva propriedade do solo; RMSE, RMSEa e RMSEs possuem unidades percentuais. Os demais índices estatísticos são adimensionais.

médio, foi mais expressivo para as propriedades P_{0-5cca}, P_{MAC}, MAC, k_{sat} e k_a em ambos os solos. Estes resultados corroboram àqueles do teste de médias (Tabelas 2 e 3) e refletem modificações importantes na geometria do espaço poroso das amostras (ROSEBERG; McCOY, 1990) devido à perturbação da estrutura durante a amostragem.

Os sinais positivos ou negativos do CMR indicam se o amostrador elétrico tende a subestimar ou superestimar, respectivamente, os valores das propriedades físicas do

Tabela 5 - Propriedades físicas do solo e índices estatísticos obtidos da relação entre os amostradores elétrico e o de Uhland para o solo de textura argilosa

Propriedade ⁽¹⁾	Índices estatísticos ⁽²⁾									
	R ²	d	RD	EF	MAE	Emáx	CMR	RMSE	RMSEa	RMSEs
Camada de 0-10 cm										
Ds	0,429	0,335	0,303	-0,981	0,073	0,122	0,057	6,26	2,05	5,91
PT	0,581	0,352	0,361	-0,838	0,026	0,042	-0,052	5,64	1,62	5,40
P _{0-5cca}	0,122	0,432	0,994	-0,145	0,008	0,025	-0,209	40,94	25,28	32,29
P _{MAC}	0,254	0,325	0,304	-0,660	0,009	0,017	-0,196	31,49	24,16	20,06
MAC	0,001	0,153	0,069	-2,643	0,024	0,045	-0,390	52,82	32,71	41,52
MIC	0,703	0,077	3,567	-0,359	0,025	0,046	-0,013	6,35	1,08	6,26
θ _{CC}	0,622	0,014	4,731	-0,302	0,031	0,059	-0,007	8,08	1,60	7,92
k _{sat}	0,312	0,088	0,007	-9,404	38,743	114,412	-4,144	628,55	366,63	510,55
k _a	0,344	0,041	0,001	-19,389	6,875	20,952	-4,535	705,70	425,74	562,81
Camada de 20-30 cm										
Ds	0,483	0,241	0,066	-2,155	0,047	0,100	0,036	4,37	2,28	3,73
PT	0,436	0,262	0,076	-1,819	0,017	0,037	-0,034	4,11	2,25	3,44
P _{0-5cca}	0,970	0,183	0,051	-3,451	0,020	0,028	-0,684	70,55	5,97	70,30
P _{MAC}	0,872	0,145	0,029	-4,919	0,022	0,026	-0,567	57,03	5,25	56,83
MAC	0,002	0,211	0,084	-2,730	0,037	0,070	-0,368	41,60	16,02	38,40
MIC	0,512	0,366	0,448	-0,734	0,020	0,033	0,049	5,50	1,29	5,34
θ _{CC}	0,349	0,349	0,322	-0,865	0,021	0,040	0,055	6,21	1,99	5,88
k _{sat}	0,183	0,178	0,020	-4,638	144,183	395,402	-2,659	373,70	254,25	273,88
k _a	0,138	0,212	0,043	-3,406	13,928	41,541	-1,635	239,97	174,72	164,50

(1). Ds, densidade do solo (Mg m⁻³); P_{0-5cca}, volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -0,5 kPa; P_{MAC}, volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -1 kPa; MAC, macroporosidade do solo; MIC, microporosidade do solo; θ_{CC}, teor de água no solo na capacidade de campo ou equivalente ao potencial mátrico de -10 kPa (m³ m⁻³); k_{sat}, condutividade hidráulica saturada do solo (mm h⁻¹); k_a, permeabilidade do solo ao ar (μm²).

(2). R², coeficiente de determinação; d, coeficiente de concordância; RD, razão de desvios; EF, coeficiente de eficiência; MAE, erro absoluto médio; Emáx, erro máximo; RMSE, raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado; RMSEa, raiz quadrada do erro aleatório médio normalizado; RMSEs, raiz quadrada do erro sistemático médio normalizado; CMR, coeficiente de massa residual. MAE e Emáx possuem a mesma unidade da respectiva propriedade do solo; RMSE, RMSEa e RMSEs possuem unidades percentuais. Os demais índices estatísticos são adimensionais.

solo em relação àqueles de Uhland. Em ambos os solos, a Ds foi subestimada pelo amostrador elétrico. Ademais, algumas propriedades físicas mais sensíveis a modificações da estrutura do solo, como a P_{0-5cca}, P_{MAC}, k_{sat} e k_a, sempre apresentaram valores negativos, significando que o amostrador elétrico proporcionou menores distúrbios nas amostras. Estes resultados foram apenas parcialmente detectados pelo teste de médias (Tabelas 2 e 3). Por outro lado, a decomposição dos erros experimentais em aleatórios e sistemáticos, representados por RMSEa e RMSEs,

indicou diferenças expressivas entre as propriedades físicas em ambos os solos. Os valores da RMSEa e RMSEs, obtidos após a confirmação da normalidade da distribuição do resíduo da regressão linear entre os dados do amostrador elétrico e o de Uhland para cada propriedade física medida, apresentaram valores da RMSEs notadamente maiores que aqueles da RMSEa para a maioria das observações experimentais. Isso reforça as justificativas já mencionadas sobre a melhor representatividade da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo (Tabelas 2 e 3) proporcionada pelo amostrador elétrico visto que os índices estatísticos (Tabelas 4 e 5), principalmente os relacionados aos erros sistemáticos, indicam melhor adequação desse amostrador para estudos que requerem maior exatidão de medidas.

É importante ressaltar que não seria desejável obter a relação $d = RD = EF = 1$ e $Emax = MAE = RMSE = RMSEa = RMSEs = CMR = 0$. Caso ocorressem estas condições, significaria que o amostrador elétrico não se diferenciaria daquele de Uhland sob o aspecto da qualidade da amostra, mas apenas pelo menor esforço do usuário para introduzir o anel volumétrico. Entretanto, a não concordância dos índices estatísticos com as condições mencionadas revelou que a preservação da originalidade da estrutura das amostras coletadas foi estreitamente relacionada ao modo de introdução dos anéis volumétricos no solo.

Modificações instrumentais originadas a partir desta pesquisa

Durante as amostragens de solos, foram coletadas informações para o aprimoramento do amostrador elétrico proposto. A Figura 4 apresenta uma nova versão do equipamento que inclui algumas modificações, como a estrutura de sustentação e o atuador linear. O protocolo de utilização da nova versão do amostrador elétrico permaneceu similar àquele mencionado para as amostragens, com poucas alterações. Basicamente, suas modificações construtivas do incluíram:

- a) O atuador linear (Figura 4-A,d) teve seu eixo aumentado e passou a ter profundidade máxima de deslocamento até 40 cm, o que resultou em uma estrutura de sustentação do amostrador em formato de “torre”. Para melhor aproveitamento do torque produzido pelo motor, o atuador linear teve seu fuso de

Figura 4 - Versão modificada do amostrador elétrico após os trabalhos em campo: (A,a) caixa com motor, bateria e comandos elétricos, (A,b) manípulo quebra-torrão, (A,c) alça para transporte, (A,d) atuador linear, (B,a) localização do sensor fim de curso superior e indicador de deslocamento, (B,b) sensor fim de curso inferior e móvel, (B,c) régua métrica, (C,a) acoplamento giratório, (C,b) terminal de engate do cilindro de amostragem, (C,c) base para contrapesos, (D,a) anel volumétrico, (D,b) cilindro de amostragem desmontado, (D,c) conjunto montado - cilindro de amostragem e anel volumétrico

perfil quadrado substituído por um de esferas, o que permite menor resistência interna durante o deslocamento de seu eixo;

- b) Foram adicionados dois sensores de fim de curso no atuador linear. Sua principal função é evitar problemas de travamento do motor elétrico, caso seja atingido o limite (superior ou inferior) de deslocamento do eixo do atuador. Adicionalmente, o sensor inferior (Figura 4-B,b) permite regular precisamente a profundidade desejada de coleta das amostras;
- c) Depois de introduzido o anel volumétrico no solo, um manípulo (Figura 4-A,b) permite girar ($\approx 30^\circ$) o conjunto atuador linear mais o cilindro de Uhland, que é fixado ao eixo do atuador via engate rápido. Isso possibilita que, após parar o funcionamento do atuador, o usuário gire o manípulo para quebrar o torrão de solo junto à parte inferior da amostra e, em seguida, retorne o eixo do atuador à posição superior;
- d) A base do amostrador e o atuador linear podem ser separados quando manípulo for girado o suficiente para soltar essas peças junto ao acoplamento giratório

(Figura 4-C,a), o que também possibilita melhor locomoção e adequação aos trabalhos de campo.

3.4 Conclusões

1 - A metodologia proposta para a obtenção de amostras indeformadas de solo com o amostrador elétrico foi apropriada;

2 - A eficiência do amostrador elétrico foi comprovada pelas menores alterações na estrutura das amostras coletadas e pelo seu tamanho reduzido, que permite amostragens de solo com e sem culturas e cujo peso do conjunto (estrutura mecânica, motor, bateria elétrica etc.) não prejudica a locomoção e utilização do equipamento;

3 - Ambos os amostradores foram sensíveis na caracterização da estrutura de solo entre as camadas avaliadas. Porém, apresentaram magnitudes distintas entre si em função da classe textural do solo;

4 - A variabilidade espacial das propriedades físicas do solo dependeu do modo de introdução dos anéis volumétricos;

5 - A introdução do anel volumétrico com velocidade de 2 mm s^{-1} foi mais adequada à preservação das propriedades físicas do solo;

6 - Para estudos mais detalhados sobre geometria do espaço poroso e transmissibilidade de fluidos no solo, recomenda-se a utilização do amostrador elétrico.

Referências

- BALL, B.C.; HUNTER, R. The determination of water release characteristics of soil cores at low suctions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 43, p. 195-212, 1988.
- BALL, B.C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 1141-1158.

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, n. 5, p. 787-794, 2006.

BHARATI, L.; LEE, K.H.; ISENHART, T.M.; SCHULTZ, R.C. Soil water infiltration under crops, pasture, and established riparian buffer in Midwest USA. **Agroforestry System**, New York, v. 56, p. 249-257, 2002.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 363-375.

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 158-164, 2009.

CHONG, S.K.; KHAN, M.A.; GREEN, R.E. Portable hand-operated soil core sampler. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 433-434, 1982.

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

DIIWU, J.Y.; RUDRA, R.P.; DICKINSON, W.T.; WALL, G.J. Two component transfer function modeling of flow trough macroporous soil. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 80, n. 2, p. 223-231, 2001.

ELLIES, A.; GREZ, R.; RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta par el diagnostico de la estructura Del suelo. **Agro Sur**, Valdivia, v. 5, p. 51-56, 1997.

FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a Molic Ochraqualf in Northwest. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, p. 21-35, 1998.

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 255-293.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H.; TOPP, C. **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 201-228.

GUROVICH, L.A. Field spatial variability structure of soil hydrodynamic properties. **Ciencia e Investigacion Agraria**, Santiago, v. 9, n. 3, p. 243-254, 1982.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C.; STEWART, B.A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 167-180.

KIRKEGAARD, J.A.; MUNNS, R.; JAMES, R.A.; GARDNER, P.A.; ANGUS, J.F. Reduced growth and yield of wheat with conservation cropping. II: Soil biological factors limit growth under direct drilling. **Australian Journal of Agriculture Research**, Collingwood, v. 46, p. 75-88, 1995.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: _____. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 635-662.

LAL, R. Soil compaction and tillage effects on soil physical properties of a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Journal of Sustainable Agriculture**, New York, v. 14, n. 4, p. 53-65, 1999.

LEGATES, D.R.; McCABE Jr., G.J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, **Water Resources Research**, Washington, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LOAGUE, K.; GREEN, R.G. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v.7, n.1-2 p.51-73, 1991.

LOGSDON, S.D.; JAYNES, D.B. Spatial variability of hydraulic conductivity in a cultivated field at different times. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 3, p. 703-709, 1996.

McINTYRE, D.S. Procuring undisturbed cores for soil physical measurements. In: LOVEDAY J. (Ed.). **Methods for analysis of irrigated soils**. Clayton: Commonwealth Agricultural Bureau of Soils, 1974. p. 154-165. (Technical Communication, 54).

McINTYRE, D.S.; TANNER, C.B. Abnormally distributed soil physical measurements and no parametric statistics. **Soil Science**, Madison, v. 88, p. 133-137, 1959.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O.; CORRENTE, J.E. More adequate probability distributions to represent the saturated soil hydraulic conductivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 789-793, 2002.

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 119-129, 2003.

POULSEN, T.G.; BLENDSTRUP, H.; SCHJØNNING, P. Air permeability in repacked porous media with variable structure-forming potential. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, p. 1139-1143, 2008

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. Falling head soil core (Tank) method. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 809-812.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, p. 131-146, 2002.

ROGERS, J.S.; CARTER, C.E. Soil core sampling for hydraulic conductivity and bulk density. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 5, p. 1393-1394, 1987.

ROSEBERG, R.J.; McCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 4, p. 969-974, 1990.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, Cambridge, v. 52, p. 591-611, 1965.

UHLAND, R.E. Physical properties of soil as modified by crops and management. **Soil Science Society of America Procedures**, Oxford, v. 14, p. 361-366, 1949.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. p. 319-344.

WILLMOTT, C.J.; WICKS, D.E. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. **Physical Geography**, Los Angeles, v. 1, p. 59-73, 1980.

WILLMOT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K.M.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

WUEST, S.B.; SCHILLINGER, W.F. Small-increment electric soil sampler. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 1554-1556, 2008.

ZACHARIAS, S.; HEATWOLE, C.D.; CAKLEY, C.W. Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 39, p. 47-54, 1996.

ZHANG, S.; GRIP, H.; LOVDAHL, L. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 90, p. 117-125, 2006.

the same way, the $\mathcal{H}^1$ -norm of the difference between the exact solution and the numerical solution is bounded by the $\mathcal{H}^1$ -norm of the difference between the exact solution and the numerical solution. This is a standard result in the theory of numerical methods for partial differential equations.

4 DESENVOLVIMENTO DE UM PENETRÔMETRO AUTOMATIZADO: INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO NAS DETERMINAÇÕES DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E DE RESISTÊNCIA TÊNซิล DE AGREGADOS

Resumo

A resistência do solo à penetração (RP) e a resistência tênsil de agregados (RT) são comumente utilizadas para caracterizar a condição física e estrutural de solos agrícolas. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e avaliar a funcionalidade de um novo penetrômetro portátil automatizado, com controle de posição e velocidade constante para medições de RP e de RT. A RP foi determinada com o equipamento proposto em amostras indeformadas de um solo de textura argilosa sob cultivo de seringueira em duas posições de amostragem. Nestas amostras, foram determinados o teor de água e a densidade do solo para estimar a curva de resistência do solo à penetração (CRP). Os valores de RT foram medidos em solos de classes texturais franco-argilo-arenosa (solo 1) e muito argilosa (solo 2) sob distintos sistemas de uso: solo 1, sob cultivo por longo prazo e mata nativa, e solo 2, sob culturas anuais e mata composta por eucaliptos há mais de 30 anos. Para as determinações de RT, foram utilizadas duas máquinas de ensaio: uma de referência, já amplamente utilizada em outros trabalhos, e o equipamento proposto. A CRP apresentou elevados valores de coeficiente de determinação ($R^2 \geq 0,92$), independente da posição de amostragem. Os valores médios de RT dos solos 1 e 2 obtidos com o equipamento proposto não diferiram ($p > 0,05$) daqueles da máquina de ensaio de referência, independente do sistema de uso e da classe textural do solo. Os resultados indicam que a RT e a RP podem ser determinadas mais rapidamente e com elevada acurácia utilizando o equipamento proposto.

Palavras-chave: Compactação do solo; Qualidade do solo; Penetrometria; Estresse tênsil

Abstract

Soil resistance to penetration (PR) and the tensile strength of aggregates (TS) are commonly used to characterize the physical and structural conditions of agricultural soils. The objective of this study was to develop and evaluate the functionality of a new portable and automated penetrometer with position control and constant speed for measuring PR and TS. The PR was determined with the proposed equipment on undisturbed samples of a clay soil under rubber trees in two sampling positions (row and inter-row of rubber trees). These samples were also used for determination of the soil volumetric water content and bulk density, which were then used to estimate the soil resistance to penetration curve (SRPC). The values of TS were measured in a sandy clay loam soil (soil 1) and in a heavy clay soil (soil 2) under different uses: soil 1 under long-term cultivation and native forest and soil 2 under annual crops and eucalyptus

trees for over 30 years. For the determination of TS, we tested two devices: a reference machine already widely used in other studies and the proposed equipment. SRPC fits showed high coefficients of determination ($R^2 \geq 0.92$), independent of sampling position. The mean values of TS in soils 1 and 2 obtained with the proposed equipment did not differ ($p > 0.05$) from those of the reference testing machine, independent of soil use and textural class. The results indicate that the TS and PR can be determined faster and with higher accuracy by using the proposed equipment.

Keywords: Soil compaction; Soil quality; Penetrometry; Shear stress

4.1 Introdução

A resistência do solo à penetração (RP) é um dos indicadores da qualidade do solo frequentemente utilizado na caracterização da compactação e das restrições mecânicas ao crescimento de raízes (BARBER; 1994) bem como dos efeitos do preparo do solo (BUSSCHER, 2000) e do tráfego de máquinas (SHARRAT et al., 1998). Letey (1985) afirma que a RP é uma das propriedades físicas que influencia diretamente o crescimento de plantas e, conseqüentemente, a produtividade das culturas (KIRKEGAARD et al., 1995; BEUTLER et al., 2006). A determinação da RP é realizada com penetrômetros, que medem a força necessária para introduzir um cone com dimensões padronizadas no solo, localizado na extremidade de uma haste metálica (ASAE, 1999). A magnitude da RP depende de aspectos relacionados ao diâmetro basal, comprimento e ângulo do cone de penetração e de propriedades físicas, como a densidade do solo, resistência ao cisalhamento, teor de água, teor de argila dentre outras (BRADFORD, 1986; LOWERY; MORRISON, 2002).

Os penetrômetros podem ser classificados como: (i) dinâmicos, nos quais a introdução do cone no solo se dá mediante impactos provocados por uma massa conhecida (SCHMID, 1966; STOLF, 1991) e (ii) estáticos, nos quais o cone é introduzido no solo mediante acionamento por mecanismos hidráulicos ou eletromecânicos (BRADFORD, 1986; LOWERY; MORRISON, 2002). Os penetrômetros estáticos podem apresentar velocidade constante de penetração, o que melhora a acurácia dos resultados (HERRICK; JONES, 2002) devido à redução de erros sistemáticos e, conseqüentemente, da variabilidade das medidas de RP. Para facilitar as determinações de RP, os penetrômetros podem ser acoplados a diferentes

estruturas para torná-los mais portáteis, inclusive com sensores para medir a profundidade de penetração e o teor de água do solo (VAZ; HOPMANS, 2001), geralmente associados a dispositivos computadorizados para aquisição e armazenamento dos dados (BRADFORD, 1986; LOWERY; MORRISON, 2002). Apesar de aumentarem a precisão, essas características construtivas elevam o custo e podem restringir a utilização destes penetrômetros em avaliações agronômicas.

Os penetrômetros fornecem medidas fáceis e rápidas da RP (BENGHOUGH; MULLINS, 1990). Entretanto, a dependência da RP pelo teor de água e pela densidade do solo (BUSSCHER, 1990) dificulta sua utilização e interpretação isoladamente. Algumas equações matemáticas descrevem adequadamente uma relação não-linear entre a RP e essas variáveis (BUSSCHER, 1990; BUSSCHER et al., 1997), permitindo gerar curvas de resistência à penetração (CRP). A CRP tem sido amplamente utilizada para quantificar a qualidade física em diferentes solos (SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1999; IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000; LEÃO et al., 2006) a partir de amostras indeformadas ou diretamente no campo. Isto é realizado pela medição da RP durante o secamento de um conjunto de amostras com distintos valores de densidade do solo. Dessa forma, a CRP inclui o efeito de diferentes fatores relacionados à degradação física do solo e possibilita estabelecer valores críticos do teor de água e da densidade do solo nos quais a RP limita ao crescimento de plantas (IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000).

A resistência tênsil de agregados (RT) também tem sido considerada um importante indicador da qualidade estrutural do solo. A RT corresponde à força por unidade de área necessária à ruptura de um determinado agregado (DEXTER; WATTS, 2000). Alguns dos fatores que a influenciam são: os ciclos de umedecimento e secamento (UTOMO; DEXTER, 1981; KAY; DEXTER, 1992), o teor de argila e a mineralogia (BARTOLI; BURTIN; GUÉRIF, 1992; IMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002), o teor de argila dispersa (SHANMUGANATHAN; OADES, 1982), a matéria orgânica do solo (CAUSARANO, 1993; PERFECT; KAY; SILVA, 1995; IMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002), os materiais ligantes e/ou cimentantes, como a sílica e aluminossilicatos pobremente cristalizados (KAY; DEXTER, 1992; KAY; ANGERS, 1999), a composição química e a concentração da solução do solo (RAHIMI; PAZIRA; TAJIK, 2000). Dessa

forma, a RT constitui uma medida sensível aos efeitos de sistemas de uso e manejo na estrutura do solo (WATTS; DEXTER, 1997; MUNKHOLM; SCHJØNNING, 2004; BLANCO-CANQUI et al., 2005; TORMENA; FIDALKI; ROSSI JUNIOR, 2008).

A quantificação da RT pode ser realizada mediante ensaios diretos e indiretos (DEXTER; WATTS, 2000). Os ensaios diretos consistem na aplicação de forças de mesma direção e sentidos opostos em dois extremos de um agregado, separando-o em duas partes. Já nos ensaios indiretos, uma força compressiva é aplicada através do diâmetro polar do agregado por duas placas metálicas planas, sendo uma fixa e outra móvel. O deslocamento da placa móvel proporciona aumentos sucessivos do estresse interno do agregado. Teoricamente, o valor máximo desse estresse tênsil ocorre no plano vertical central do agregado. Assim, uma fissura aparece no centro do agregado, fragmentando-o em unidades de menor tamanho (e maior RT) no momento que o estresse aplicado supera a resistência tênsil dos agregados (forças de magnitudes iguais e sentidos opostos). A RT freqüentemente é determinada pelo método indireto utilizando-se dispositivos móveis com velocidade de deslocamento linear extremamente baixa, o que torna bastante laboriosa e demorada a sua determinação.

O incremento do estresse interno do agregado deve ocorrer de forma constante (DEXTER; KROESBERGEN, 1985; DEXTER; WATTS, 2000) nas determinações de RT. Para tanto, nos ensaios indiretos, deve-se manter constante a velocidade de deslocamento da placa móvel durante a compressão individual de agregados. Nesse contexto, Dexter e Kroesbergen (1985) recomendam que o incremento da força até a ruptura do agregado ocorra em um tempo de aproximadamente 100 s. Porém, isso é algo bastante incerto visto que a forma e as dimensões dos agregados não são idênticas para um determinado conjunto de amostras. Dexter e Watts (2000) afirmam que a taxa de incremento da força sobre o agregado pode influenciar os resultados de RT. Esses mesmos autores recomendam uma velocidade constante de compressão igual a $0,07 \text{ mm s}^{-1}$, sendo também sugerida a possibilidade de utilizar valores diferentes. Atualmente, muitos trabalhos são realizados com velocidade constante de compressão do agregado igual a $0,03 \text{ mm s}^{-1}$, conforme indicado por Imhoff, Silva e Dexter (2002). Portanto, pode-se observar que há uma grande carência em estudos mais detalhados sobre os efeitos da velocidade de compressão nas determinações da

RT.

Os objetivos deste trabalho incluíram: (i) desenvolver e avaliar a funcionalidade de um penetrômetro estático automatizado, de baixo custo e portátil, para determinações de RP em laboratório; (ii) ajustar os dados de RP, obtidos com velocidade constante de $1,55 \text{ mm s}^{-1}$, à equação proposta por Busscher (1990) e verificar a similaridade dos coeficientes do modelo com aqueles obtidos em outros trabalhos e (iii) avaliar a viabilidade deste equipamento em medir a resistência tênsil de agregados utilizando uma velocidade constante de compressão igual a $1,55 \text{ mm s}^{-1}$, para testar a hipótese de que os resultados de RT não diferem daqueles tomados com a velocidade de $0,03 \text{ mm s}^{-1}$ da máquina de referência (controle). A confirmação desta hipótese significa que medidas de RT possam ser obtidas mais rapidamente e sem prejuízo à sua acurácia.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Resistência do solo à penetração

As amostras destinadas à modelagem da CRP foram coletadas num Nitossolo Vermelho (EMBRAPA, 2006) de textura argilosa (480 g kg^{-1} argila, 300 g kg^{-1} areia) cultivado com seringueira, na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba - SP. Numa área de $14 \times 30 \text{ m}$, na camada de $0\text{-}10 \text{ cm}$, foram aleatoriamente coletadas amostras indeformadas com anéis volumétricos de 5 cm de diâmetro e altura, sendo individualmente revestidas com filme de PVC. Ao todo, foram obtidas 66 unidades experimentais nas posições de amostragem relativas à linha e entrelinha da cultura. No laboratório, cada amostra foi ajustada ao volume do anel, sendo colocada uma tela de nylon em sua extremidade inferior. Em seguida, estas foram saturadas (por capilaridade) com água deionizada por 48 h. Depois disto, cobriu-se a extremidade superior de cada amostra com papel, sendo deixada secar ao ar (lentamente e com drenagem livre) a fim de obter um gradiente de teor de água entre estas. Em seguida, foram novamente revestidas com filme de PVC e mantidas sob refrigeração ($5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 30 d), para redistribuição interna da água.

Antes do ensaio de RP, as amostras foram pesadas para determinação do teor de água (θ). Em seguida, foi introduzida uma haste de aço de extremidade cônica (ângulo de 60° e diâmetro basal de 0,4 cm) até 4,5 cm da superfície superior de cada amostra de solo numa velocidade constante igual a $1,55 \text{ mm s}^{-1}$. Um computador foi utilizado para a aquisição e o armazenamento de dados de força (kgf), com frequência de uma medição por segundo, totalizando 29 medições por amostra de solo. Descontadas as medições na bordadura, equivalente a 0,95 cm (superior e inferior, respectivamente), uma camada 3,1 cm foi utilizada para as determinações da RP por amostra de solo. Ao final das medições de força, foram determinados o θ , pela relação entre as massas de água e de solo seco, e a D_s (BLAKE; HARTGE, 1986). O valor médio de força, obtido em cada amostra, foi transformado para pressão:

$$RP = \frac{Fg}{A 10^6}, \quad (1)$$

sendo, RP expressa em MPa; F a força medida (kgf); g a aceleração da gravidade (m s^{-2}) e A a área basal do cone (m^2).

Para determinar a RP, foi construído um penetrômetro eletrônico, no Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP, doravante denominado de equipamento proposto ou máquina de ensaio sob teste. Este equipamento consiste na automação de uma máquina para ensaios de dinamometria (Lutron, FS-1001[®]), cuja base móvel é originalmente movimentada pelo usuário mediante acionamento de uma manivela.

4.2.2 Resistência tênsil de agregados

Para avaliar o efeito da velocidade de deslocamento nas determinações da RT, foram utilizadas duas máquinas de ensaio: o equipamento proposto e uma de referência (IMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002), utilizada em outros trabalhos e descrita mais adiante. Para tanto, foram coletados blocos de amostras indeformadas de dois solos na camada de 0-20 cm: um Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2006), de classe textural franco-argilo-arenosa (textura média), sob mata nativa e cultivado com culturas anuais, localizado na Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá - PR; e um Nitossolo Vermelho distroférrico (EMBRAPA, 2006), de

classe textural argilo-arenosa (textura muito argilosa), cultivado com eucalipto por mais de 30 anos e com culturas anuais, localizado na área experimental do Centro Técnico de Irrigação da UEM (Tabela 1).

Tabela 1 - Caracterização granulométrica⁽¹⁾ e carbono orgânico⁽²⁾ para a camada de 0-20 cm dos solos avaliados

Sistema de uso	Argila (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Areia (g kg ⁻¹)	CO (g dm ⁻³)
Textura média				
Mata	190	20	790	11,3
Cultivo	200	30	770	7,9
Textura muito argilosa				
Mata	735	90	175	23,6
Cultivo	735	90	175	14,7

⁽¹⁾: Argila: < 2 µm; silte: 2-50 µm; areia: 50-2000 µm (GEE; OR, 2002).

⁽²⁾: Carbono orgânico (CO), conforme (EMBRAPA, 1997).

Aleatoriamente, foi coletado um bloco de solo (0,20 x 0,20 x 0,10 m de largura, comprimento e altura, respectivamente) em cada área experimental. Esses blocos foram revestidos com filme de PVC, acondicionados em caixas térmicas e transportados ao laboratório. Em seguida, os blocos foram manualmente destorroados em seus agregados naturais pela aplicação de uma força mínima necessária para separá-los pelos seus pontos de fraqueza. O diâmetro dos agregados foi classificado com o auxílio de duas peneiras, cujas respectivas aberturas de malha foram de 19,0 e 12,7 mm (IMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002). Para secagem final e homogeneização do teor de água, esses agregados foram secos ao ar por 36 h e, em estufa, a uma temperatura de 60 °C por 24 h, sendo armazenados em sacos de papel até o momento da realização dos ensaios de RT. Foram utilizados 400 agregados, sendo 50 repetições por tratamento.

Para as medições de RT, cada agregado foi previamente pesado em balança analítica e, em seguida, submetido ao ensaio de tensão indireta. Em ambas as máquinas de ensaio, individualmente os agregados de solo foram colocados na posição mais estável entre duas placas metálicas: uma inferior, fixa à base da máquina, e outra superior, móvel e ligada à extremidade da célula de carga do dinamômetro, com capacidade de 20 kgf. No equipamento proposto, a força necessária à ruptura tênsil de

cada agregado de solo foi obtida mediante a função “peak hold” do dinamômetro, a qual registra o momento que ocorre a maior força imediatamente antes da ruptura do agregado devido à compressão proporcionada pela placa móvel. Já na máquina de referência, utilizou-se um microcomputador para a aquisição de dados e a seleção da máxima força necessária à ruptura de cada agregado. Esta máquina é descrita com mais detalhes por Imhoff, Silva e Dexter (2002), sendo basicamente composta por um atuador linear eletro-mecânico (projetado para posicionamentos de alta precisão) que movimenta uma célula de carga (tipo “S”; 20 kgf) com velocidade constante de $0,03 \text{ mm s}^{-1}$. Todas as medições de força máxima (kgf) foram registradas e utilizadas nos cálculos de RT. Aproximadamente a cada 1/3 do total de agregados, as amostras foram pesadas em balança analítica e submetidas à secagem em estufa a 105°C por 48 h, para a determinação do teor de água residual médio dos agregados de solo. A RT foi calculada conforme Dexter e Kroesbergen (1985):

$$RT = \frac{0,576(P)}{D^2 10^3}, \quad (2)$$

sendo, RT expressa em kPa; 0,576 a constante de proporcionalidade da relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P a força aplicada (N) e D o diâmetro efetivo do agregado (m).

O parâmetro D foi calculado pela eq. (DEXTER; KROESBERGEN, 1985):

$$D = D_m \left(\frac{M}{M_0} \right)^{0,333}, \quad (3)$$

sendo, D_m o diâmetro médio dos agregados (m), definido pela média dos tamanhos da abertura das peneiras; M a massa seca do agregado individual (g) e M_0 a massa seca média dos agregados (g).

4.2.3 Análises estatísticas

4.2.3.1 Curva de resistência do solo à penetração

Os valores de RP , θ e D_s , para a linha e a entrelinha da cultura de seringueira, foram ajustados ao modelo não-linear proposto por Busscher (1990) para estimar a curva de resistência do solo à penetração (CRP), descrita pela eq. (4):

$$RP = a\theta^b D_s^c, \quad (4)$$

sendo, RP expressa em MPa; θ o teor de água no solo ($m^3 m^{-3}$); D_s a densidade do solo ($Mg m^{-3}$), a , b e c os coeficientes de ajuste do modelo.

Foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a normalidade da distribuição dos resíduos das análises de regressão não-linear para a geração das CRP.

4.2.3.2 Resistência tênsil de agregados

As determinações da resistência tênsil de agregados foram obtidas mediante um delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial $2 \times 2 \times 2$, sendo dois solos (texturas média e muito argilosa), dois sistemas de uso (mata e cultivo) e duas máquinas de ensaio, sendo uma de referência (IMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002) e o equipamento proposto. Foram realizadas análises de variância para amostras independentes entre os tratamentos, sendo utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a normalidade da distribuição dos resíduos.

4.2.3.3 Outras análises estatísticas

Para quantificar o desempenho do equipamento proposto nas determinações da RP e da RT , também foram utilizados gráficos, análises de regressão e coeficientes de determinação. Além destes, para quantificar os erros experimentais foram utilizadas técnicas estatísticas robustas (ZACHARIAS; HEATWOLE; COAKLEY, 1996; MESQUITA; MORAES; CORRENTE, 2002), ou seja, que não exigem distribuição

normal de probabilidade dos dados, exceto para as eq. (11) e (12). Essas equações requerem estimativas da variável dependente e, para tanto, foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade da distribuição do resíduo das regressões lineares, a fim de permitir que os erros aleatórios e sistemáticos pudessem ser determinados. Os seguintes índices estatísticos foram utilizados:

a) índice de concordância (LEGATES; McCABE, 1999):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O})^2 + \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

b) razão de desvios (LOAGUE; GREEN, 1991):

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

c) eficiência do modelo (LEGATES; McCABE, 1999):

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

d) erro absoluto médio (WILLMOTT et al., 1985):

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (8)$$

e) erro máximo (LOAGUE; GREEN, 1991):

$$Emax = \max(|O_i - P_i|)_{i=1}^N \quad (9)$$

f) raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (LOAGUE; GREEN, 1991):

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \right]^{0.5} \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (10)$$

g) componentes aleatório (RMSEa) e sistemático (RMSEs) do erro total (LEGATES; McCABE, 1999) normalizado:

$$RMSEa = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (\hat{P}_i - P_i)^2 \right]^{0.5} \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (11)$$

$$\text{RMSEs} = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (\hat{P}_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (12)$$

g) coeficiente de massa residual (LOAGUE; GREEN, 1991):

$$\text{CRM} = \frac{\sum_{i=1}^N O_i - \sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N O_i}, \quad (13)$$

onde, $\bar{O}$ é a média aritmética,

$$\bar{O} = N^{-1} \sum_{i=1}^N O_i$$

e $\hat{P}_i$ é a estimativa do valor da variável dependente (WILLMOTT et al., 1985),

$$\hat{P}_i = a + bO_i,$$

sendo, no estudo de RP, O_i dados medidos com a máquina sob teste e P_i aqueles estimados segundo Busscher (1990). Para a RT, O_i são dados medidos com a máquina de referência e P_i aqueles da máquina sob teste. N é o número de observações.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Aspectos construtivos do equipamento proposto

Motorização da máquina original para ensaios de dinamometria

A movimentação da base móvel (Figura 1-B,b) com velocidade constante de $1,55 \text{ mm s}^{-1}$ foi obtida pela utilização de um motor elétrico BOSCH® - CEP 12V, escolhido por ser de fácil aquisição no mercado e apresentar peso e tamanho reduzidos, o que possibilitou tornar o equipamento proposto leve e portátil. Durante ensaios preliminares, foram detectadas e realizadas algumas modificações na configuração original do motor, como o isolamento do circuito elétrico interno em relação à sua carcaça para garantir uma operação mais segura. Além disso, para verificar sua capacidade em suprir as exigências do equipamento proposto, foi calculada a força máxima que pode ser aplicada junto ao fuso (Figura 1-B,h), que movimenta a base móvel mais o dinamômetro

Figura 1 - Detalhes construtivos do equipamento proposto para medições de resistência tênsil de agregados, utilizando uma haste com placa metálica plana (A) e (D), e de resistência do solo à penetração: base fixa (B,a); base móvel (B,b); dinamômetro (B,c); módulo eletrônico mais motor elétrico (B,d); sensores de fim de curso superior (B,e_s) e inferior (B,e_i); haste com cone de penetração (B,f); vistas lateral (C) e frontal (E)

(Figura 1-B,c). Conforme Budynas e Nisbett (2007), a eq. (14) permite estimar o torque necessário para que um fuso de rosca métrica, similar àquele desta pesquisa, movimente uma determinada carga:

$$T = \frac{F \, dm}{2} \left(\frac{l + \pi f \, dm \, \sec \alpha}{\pi \, dm - f \, l \, \sec \alpha} \right) + \frac{F \, fc \, dc}{2}, \quad (14)$$

sendo, T o torque do motor (Nm); F a força (kN); dm o diâmetro médio (mm) do fuso; l o deslocamento axial (mm) proporcionado por uma volta do fuso; f a força de atrito; α o semi-ângulo ($^{\circ}$) do filete do fuso; fc a força de atrito no mancal de apoio do fuso; dc o diâmetro (mm) da parte sob atrito no mancal de encosto do fuso.

Alternativamente, a eq. (14) pode ser rearranjada para explicitar a força aplicada contra um corpo:

$$F = 2T \left[dm \left(\frac{l + \pi f dm \sec \alpha}{\pi dm - f l \sec \alpha} \right) + f_c dc \right]^{-1}, \quad (15)$$

Mediante a eq. (15), considerando o torque nominal do motor (6,5 Nm, conforme fabricante) e as características dos outros elementos constituintes do equipamento proposto, como dm (15 mm), l (2 mm), dc (16 mm), f e f_c (0,15) e α (15°), a força máxima que o fuso pode exercer durante o deslocamento descendente da base móvel é de aproximadamente 2,3 kN (234 kgf). Para os propósitos desta pesquisa, a força requerida está entre zero e 20 kgf e corresponde a até 8,5 % da capacidade de carga máxima do motor utilizado, significando que a velocidade de deslocamento do dinamômetro provavelmente não apresentará variações significativas nas determinações da RP e da RT. Isto foi verificado em ensaios preliminares de penetração de um cone (diâmetro basal de 0,4 cm) em amostras de solo com 5 cm de diâmetro e altura. Para o conjunto de amostras analisadas, considerando a camada de 0-4,5 cm, a força média estimada esteve entre 0 e 20 kgf e confirmaram que o motor utilizado no equipamento proposto permitiu obter variação nula da velocidade de deslocamento da base móvel. Ao relacionar a área do cone e a faixa de força medida, pode-se afirmar que o equipamento proposto abrange a escala de valores comumente detectada nas avaliações de resistência do solo à penetração, incluindo os valores críticos ao crescimento de plantas (TAYLOR; ROBERSON; PARKER, 1966; EHLERS et al., 1983; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998). Alternativamente, a utilização do equipamento proposto para determinações de RT pode ser feita mediante a substituição da haste com extremidade cônica (Figura 1-B,f) por outra contendo uma placa metálica plana (Figura 1-D) (IMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002).

Automação eletro-eletrônica e utilização do equipamento proposto

Depois da motorização, a máquina original para ensaios de dinamometria foi automatizada. Para tanto, o módulo de controle automático (Figura 2), desenvolvido no programa computacional para projetos eletrônicos ExpressPCB®, permitiu controlar

Figura 2 - Tela do microcomputador mostrando o ambiente de desenvolvimento de projetos eletrônicos do programa ExpressPCB® e o desenho da placa eletrônica do módulo de controle automático dos movimentos da base móvel (Figura 1-B)

satisfatoriamente o sentido e a velocidade de rotação do motor bem como o deslocamento da base móvel do equipamento proposto, visando determinações da RP e da RT sem a interferência do usuário nos resultados. A automação realizada apresenta as seguintes características:

- Alimentação elétrica - o motor elétrico e o módulo de controle automático funcionam com baixa tensão (12 VCC, corrente contínua). Alternativamente, este módulo pode fornecer tensão estabilizada de 9 VCC para o dinamômetro;
- Teclas de comando (Figura 1-B) - funcionam com apenas um toque e mantêm ativado o comando pré-selecionado. "INICIAR" - este comando promove o movimento de descida vertical do dinamômetro. Opcionalmente, esse movimento

é revertido automaticamente quando o comando “RETORNAR” for acionado pelo usuário. A paralisação instantânea do processo ocorre mediante o acionamento do comando “PARAR” pelo usuário;

- c) Controle do processo auxiliado por sensores de fim de curso. Sua função é reverter automaticamente o movimento de descida quando o sensor inferior (Figura 1-B,e_i) for acionado pela base móvel ou parar o movimento de subida quando o sensor superior (Figura 1-B,e_s) for acionado pela mesma, sendo a velocidade constante de deslocamento igual a 1,55 e 2,00 mm s⁻¹ para a descida e subida, respectivamente;
- d) Função memória - caso o comando “PARAR” seja acionado, ao reiniciar o funcionamento do equipamento proposto, será mantido o mesmo sentido de movimento da base móvel imediatamente antes da paralisação do processo.

O fornecimento de energia elétrica estabilizada para o dinamômetro, obtida do próprio módulo de controle automático, simplificou a instalação e a utilização do equipamento proposto por diminuir a quantidade de acessórios elétricos externos ao mesmo. Alternativamente, a alimentação do sistema elétrico mediante bateria de 12 V com capacidade de carga de 18 Ah (Ampères-hora) permite o funcionamento do equipamento proposto por aproximadamente duas horas, algo interessante em caso de falhas no fornecimento de energia elétrica da rede pública e que, após algumas adequações, também apresenta potencial para utilização em campo.

Os comandos “INICIAR”, “PARAR” e “RETORNAR” permitiram fácil acesso do usuário ao controle do processo de deslocamento vertical (automático ou manual) da base móvel mais o dinamômetro bem como de seu rápido desligamento em caso de alguma emergência. Mediante os sensores de fim de curso, o limite de deslocamento desta base também pode ser ajustado para distâncias em torno de 0-30 cm acima da superfície da base fixa (Figura 1-B,a). Isto foi importante nas determinações da RP porque o ajuste destes sensores permitiu posicionar, de modo automático e preciso, o cone de penetração até a profundidade de 4,5 cm em relação ao topo de cada amostra utilizando apenas o comando “INICIAR”. Além disso, o ajuste dos sensores de fim de curso também possibilita determinar a RP em amostras com altura bastante diversificada.

Já nas determinações de resistência tênsil, os comandos “INICIAR” e “RETORNAR” possibilitaram controlar satisfatoriamente a compressão de agregados. Primeiramente, para cada agregado de solo, foi acionado o comando “INICIAR” e, quando observada a ruptura da amostra, foi acionado imediatamente o comando “RETORNAR”. A necessidade de utilizar um processo comandado manualmente nas determinações da resistência tênsil de agregados se deve ao fato de que as amostras utilizadas apresentavam diâmetros distintos, ou seja, neste caso, os sensores de fim de curso foram utilizados como um recurso de segurança ao limitar o deslocamento da base móvel até as posições inferior ($\approx 0,5$ cm acima da placa móvel) e superior (≈ 1 cm acima do agregado), a fim de evitar danos ao funcionamento do equipamento proposto.

4.3.2 Experimentos para validação do equipamento proposto

Resistência do solo à penetração

O equipamento proposto permitiu medir a resistência do solo à penetração (RP), com velocidade constante de penetração do cone ($1,55 \text{ mm s}^{-1}$), em amostras indeformadas obtidas de diferentes posições de amostragem na cultura de seringueira. De modo geral, a velocidade de avanço do cone para a operação de penetrômetros não apresenta um valor pré-estabelecido. Este fato é justificado pelo modo de interação entre a velocidade e a força de penetração do cone, ou seja, um pequeno incremento na taxa de deslocamento do cone pode ocasionar influências positiva, negativa ou mesmo nula sobre a resistência à penetração. Isto se deve às mudanças no potencial da água geradas pelo avanço do cone, e sua taxa de dissipação, além das propriedades de dilatância de um determinado solo submetido ao cisalhamento (BRADFORD, 1986). Neste contexto, Lowery e Morrison (2002) afirmam que velocidades constantes de deslocamento do cone menores que $8,3 \text{ mm s}^{-1}$ são usuais em condições laboratoriais e satisfatórias em campo (LOWERY, 1986; LARNEY et al., 1989). Considerando que a velocidade de avanço referente ao equipamento proposto correspondeu a apenas 18,7 % do valor máximo sugerido por Lowery e Morrison (2002) e que as demais características, como o cone de penetração e o anel volumétrico, foram similares àqueles de outros trabalhos (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1999;

IMHOFF et al., 2001, SERAFIM et al., 2008), espera-se que os resultados da RP obtidos sejam representativos das condições estruturais das amostras avaliadas.

O grau de variabilidade dos atributos físicos (Tabela 2) pode ser analisado a partir do coeficiente de variação (CV), com base na classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), sendo os limites $CV < 12 \%$, $12 \leq CV < 52 \%$, e $CV \geq 52 \%$ para atributos do solo com baixa, média e alta variabilidade, respectivamente. Em ambas as posições de amostragem, as variabilidades para a D_s e o θ são classificadas como baixa e média, respectivamente, concordando com Warrick e Nielsen (1980) e com outros trabalhos que também mensuraram essas propriedades (SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1999; SILVA et al., 2008). Para a D_s , é notável a proximidade entre os valores máximo e mínimo para a linha e a entrelinha da cultura, respectivamente. Já para o θ , a faixa de valores para linha foi relativamente maior que àquela da entrelinha da cultura. Para a RP, os elevados valores do coeficiente de variação observados se devem principalmente ao gradiente do θ e à variabilidade de D_s entre as amostras. Estes resultados podem ser explicados pelo efeito do tráfego de máquinas na área experimental, o qual resultou em diferentes graus de compactação do solo. A compactação altera a estrutura original do solo devido ao rearranjo dos agregados na matriz e à expulsão de ar (HAKANSSON; VOORHEES, 1998), com redução de seu espaço poroso total devido à transformação de poros de maiores diâmetros em menores (DEXTER, 2004; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006). Isto ocasiona incrementos da D_s (HILL, 1990; HAKANSSON; VOORHEES, 1998) e da força capilar de retenção de água (ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006), refletindo em estreitamento da variabilidade dos valores do θ e da D_s bem como uma maior amplitude da RP na entrelinha da cultura.

De modo geral, a RP não deve ser interpretada individualmente, ou seja, sem considerar outras propriedades físicas, como a D_s e o θ (BUSSCHER, 1990). As indicações para medidas da RP são de que estas devem ser feitas considerando uma condição padrão de θ , como àquela equivalente à capacidade de campo (HENDERSON, 1989; ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996). Porém, mesmo nesta condição de θ , uma variação de D_s implica em modificação da RP. Portanto, para

Tabela 2 - Indicadores estatísticos⁽¹⁾ para as propriedades físicas determinadas nas amostras indeformadas para diferentes posições de amostragem na cultura da seringueira. (N = 33)

Propriedade ⁽¹⁾	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV
Linha da cultura					
RP	0,395	3,331	1,371	0,781	56,9
Ds	1,173	1,478	1,317	0,073	5,5
θ_{cc}	0,199	0,472	0,354	0,067	18,8
Entrelinha da cultura					
RP	1,100	6,596	2,784	1,345	48,3
Ds	1,454	1,632	1,546	0,048	3,1
θ_{cc}	0,252	0,420	0,348	0,041	11,8

(1): DP, desvio-padrão; CV, coeficiente de variação (%).

(2): RP, resistência do solo à penetração (MPa); Ds, densidade do solo (Mg m^{-3}) e θ , teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

melhor avaliação da eficiência do equipamento proposto em diferenciar a compactação entre os tratamentos, foram geradas curvas de resistência do solo à penetração (CRP), definidas pela relação não-linear da RP com a Ds e o θ . Inicialmente, foi confirmada a normalidade da distribuição dos resíduos das CRP (Tabela 3) pela aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 3 - Resultados do ajuste da CRP e testes de hipóteses para os coeficientes da equação não-linear $RP = a\theta^b Ds^c$ para as posições de amostragem na cultura de seringueira

Parâmetro	Estimativa	Erro-padrão	t	P> t
Linha da cultura				
a	0,0297	0,0079	3,744	< 0,0008
b	-2,2334	0,1272	-17,563	< $2,0 \cdot 10^{-16}$
c	4,8374	0,5442	8,890	$6,58 \cdot 10^{-10}$
Entrelinha da cultura				
a	0,0046	0,0020	2,282	0,0297
b	-3,6649	0,1889	-19,398	< $2,0 \cdot 10^{-16}$
c	5,5394	0,7228	7,664	$1,51 \cdot 10^{-8}$

O modelo ajustado explicou 92 e 93 % da variabilidade da RP para a linha e a entrelinha da cultura, respectivamente. Os coeficientes de ajuste a, b e c da regressão não-linear foram altamente significativos (Tabela 3) e apresentaram magnitudes similares a de outros trabalhos (LEÃO et al., 2006; SILVA et al., 2008). Esses coeficientes mostraram que a RP variou positivamente com a Ds e negativamente com

o θ , o que concorda com os resultados obtidos por vários autores (TAYLOR; ROBERSON; PARKER, 1966; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1999; SILVA et al., 2008) e confirma que a RP foi influenciada por essas propriedades físicas como esperado (BUSSCHER, 1990). O coeficiente c , associado à D_s , é numericamente maior na entrelinha em relação à linha da cultura, revelando que o aumento de D_s implica em maiores valores de RP nesta posição de amostragem. Esse aumento da D_s promove maior força fricção entre as partículas e aumento da coesão, o que incrementa a RP (VEPRASKAS, 1984). O aumento da RP com o decréscimo do θ é um processo que ocorre devido ao aumento no estresse efetivo (SNYDER; MILLER, 1985), o qual é intensificado positivamente pela D_s , e confirma as diferenças estruturais das amostras devido ao tráfego de máquinas. Ainda, o elevado valor absoluto de t associado ao θ indica que a RP é mais sensivelmente alterada pela variação do θ do que pela D_s , independente da posição de amostragem.

Geralmente, valores de $RP \geq 2$ MPa têm sido considerados críticos para o crescimento de plantas (TAYLOR; ROBERSON; PARKER, 1966; EHLERS et al., 1983; SILVA; KAY; PERFECT, 1994), exceto para algumas culturas cujas restrições ocorrem abaixo desse valor (BENGOUGH; MULLINS, 1990). Notadamente, a ocorrência de valores críticos de RP depende das condições do solo em termos de D_s e θ . Dessa forma, a variação do θ determina os valores de D_s em que a RP permite a exploração do solo pelo sistema radicular. O ajuste desses dados à equação não-linear permitiu estimar distintas faixas de θ menos restritivas ao crescimento de plantas (Figura 3). Pode-se observar que a D_s teve grande impacto sobre os valores da $RP = 2$ MPa, cuja a magnitude também dependeu do secamento do solo. Assim, na linha da cultura, cujos valores da D_s mais baixos promovem menores forças de coesão e de fricção entre as partículas (VEPRASKAS, 1984), haverá menos restrições físicas ao crescimento de plantas sob maior secamento do solo em relação à entrelinha. Devido a essa ampla variabilidade de valores de D_s , os resultados corroboram a argumentação de Letey (1985) de que esta propriedade física influencia indiretamente o crescimento de plantas e, portanto, não deve ser utilizada isoladamente para avaliar o efeito de práticas de manejo na qualidade física do solo.

Figura 3 - Curva de resistência do solo à penetração igual a 2 MPa considerando as variáveis teor de água e densidade do solo na linha e entrelinha da cultura de seringueira

Embora o R^2 tenha apresentado valores satisfatórios ($\geq 92\%$) em ambos os tratamentos, este índice possui limitações em sua interpretação devido a sua insensibilidade ao tamanho da diferença entre um valor de referência e um valor obtido por outros métodos (WILLMOTT; WICKS, 1980; LEGATES; McCABE, 1999), como as equações propostas por Busscher (1990). Tendo em vista a possível fragilidade do R^2 em gerar conclusões mais detalhadas sobre os efeitos da velocidade de deslocamento do equipamento proposto, foram utilizadas visualizações gráficas (Figura 4-A e B) e outros índices estatísticos (Tabela 4) que conjuntamente permitem avaliar a qualidade de diferentes ajustes dos dados da RP à equação de Busscher (1990). Esta equação foi escolhida para gerar as CRP devido a sua ampla utilização em outros trabalhos (SILVA e KAY; PERFECT, 1994; IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000; LEÃO et al., 2006; SILVA et al., 2008), os quais apresentaram excelentes resultados. Como comentado, é esperado que a velocidade de deslocamento de $1,55 \text{ mm s}^{-1}$ produza valores de R representativos das condições estruturais da amostra em função da Ds e do θ . Assim

Figura 4 - Regressões lineares entre os valores de resistência do solo à penetração obtidos pelo equipamento proposto e os estimados (BUSSCHER, 1990), utilizando como variáveis independentes o teor de água (A) e o teor de água e a densidade do solo (B)

Tabela 4 - Índices estatísticos* para a comparação dos dados medidos de resistência do solo à penetração (RP) e os obtidos por diferentes ajustes dos dados da densidade e do teor de água no solo com os modelos não-lineares $RP = a\theta^b$ e $RP = a\theta^b Ds^c$ para a linha e entrelinha da cultura de seringueira

Posição de amostragem	Índices estatísticos									
	R^2	d	RD	EF	MAE	Emáx	CMR	RMSE	RMSEa	RMSEs
$RP = a\theta^b$										
Linha	0,724	0,909	1,540	0,722	0,316	1,162	-0,011	29,58	23,73	17,67
Entrelinha	0,787	0,936	1,335	0,787	0,474	1,578	-0,004	21,97	18,99	11,05
$RP = a\theta^b Ds^c$										
Linha	0,922	0,980	1,072	0,922	0,180	0,485	0,002	15,63	15,09	4,06
Entrelinha	0,927	0,981	1,056	0,927	0,271	1,258	0,002	12,85	12,49	3,00

*: R^2 , coeficiente determinação; d, coeficiente de concordância; RD, razão de desvios; EF, coeficiente de eficiência; MAE, erro absoluto médio; Emáx, erro máximo; RMSE, raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado; RMSEa, raiz quadrada do erro aleatório médio normalizado; RMSEs, raiz quadrada do erro sistemático médio normalizado; CMR, coeficiente de massa residual. MAE e Emáx possuem a mesma unidade da respectiva propriedade do solo; RMSE, RMSEa e RMSEs possuem unidades percentuais. Os demais índices estatísticos são adimensionais.

caso o grau de ajustamento entre os dados observados e os estimados de RP sejam adequados, os índices estatísticos deverão apresentar uma relação mais próxima a esta: $d = RD = EF = 1$ e $Emáx = MAE = RMSE = RMSEa = RMSEs = CMR = 0$. O

resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov mostrou que houve normalidade da distribuição do resíduo das regressões lineares entre os dados observados e os estimados pelo modelo proposto por Busscher (1990), o que possibilitou a determinação da RMSEa e da RMSEs.

Em ambas as posições de amostragem, considerando a $RP(\theta)$, o ajuste dos dados à equação de Busscher (1990) apresentou valores de R^2 menores que os do índice d (Tabela 4), indicando que parte da variabilidade dos dados da RP provavelmente se deve a outros fatores. Este fato foi confirmado pela $RP(\theta, D_s)$, que apresentou maiores magnitude e proximidade entre os valores desses índices. O índice d , que reflete a homogeneidade da dispersão dos dados em relação à linha 1:1 (Figura 4-A e B), mostrou que a exatidão das medições da RP pelo equipamento proposto foi satisfatória para ambos os ajustes dos dados ($d > 0,90$). Por outro lado, embora a exatidão das medições da RP tenha sido aceitável, a relação da dispersão entre os dados medidos e estimados foi mais próxima da condição ideal ($RD = 1$) apenas quando a CRP incluiu os efeitos da D_s e do θ . De modo similar, os valores de EF indicaram que o modelo mais eficiente foi o proposto por Busscher (1990) - $RP(\theta, D_s)$, sugerindo que suas médias estimadas são mais consistentes e próximas daquelas obtidas para os dados observados da RP, embora valores de EF acima de 0,7 também sejam considerados estatisticamente adequados.

Os demais índices estatísticos complementam a avaliação dos efeitos da D_s e do θ na RP. Os índices MAE, $Emáx$, CMR, RMSE, RMSEa e RMSEs apresentaram magnitudes decrescentes no sentido da $RP(\theta)$ para a $RP(\theta, D_s)$, significando que as estimativas da RP foram melhoradas pela diminuição dos erros experimentais, principalmente os sistemáticos (CMR e RMSEs). Isto confirma que o θ e a D_s foram os principais fatores que influenciaram a magnitude dos valores da RP entre os tratamentos, visto que não há variação na composição do solo. Os resultados obtidos concordam com a argumentação de vários autores sobre a influência destas propriedades físicas na RP, sobretudo quando os demais fatores são mantidos constantes (CAMP; LUND, 1968; CAMPBELL; O'SULLIVAN, 1991; PABIN et al., 1998). Assim, pode-se afirmar que o equipamento proposto foi simultaneamente sensível às variações das condições estruturais e da umidade do solo, e permite inferir que as

medidas de RP obtidas com velocidade constante de penetração igual a $1,55 \text{ mm s}^{-1}$ produzem resultados confiáveis e adequados à quantificação da compactação do solo.

Resistência tênsil de agregados

Tendo em vista a carência de valores pré-estabelecidos relacionados à velocidade na qual um agregado de solo é comprimido até sua ruptura, os tratamentos escolhidos para esta pesquisa incluíram solos de diferentes texturas e sob distintos sistemas de uso, visando obter uma ampla variabilidade de estruturas e de propriedades intrínsecas do solo que afetam a resistência tênsil de agregados (RT), como o teor de argila e carbono orgânico (DEXTER; WATTS, 2000; IMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002). Isto foi importante para permitir a identificação das possíveis faixas de valores de RT que seriam mais sensivelmente detectadas pelas máquinas de ensaio em função de distintas velocidades de deslocamento de seus dispositivos móveis, utilizados na compressão de agregados. Os teores de água no momento da ruptura dos agregados do solo de textura média foram de 0,3 e 0,2 % para a mata e uso agrícola, respectivamente. Para o solo de classe textural muito argilosa, os teores de água foram de 4,9 e 2,8 % sob eucalipto e uso agrícola, respectivamente. Essas diferenças nos teores de água dentro do mesmo solo provavelmente estão relacionadas aos maiores teores de carbono orgânico no solo sob mata (Tabela 1). Entretanto, essas condições experimentais foram mantidas durante as determinações da RT para permitir a comparação do desempenho entre a máquina de ensaio sob teste (equipamento proposto) e a de referência, descrita por Imhoff, Silva e Dexter (2002).

Considerando ambos os solos, a diferença entre os valores mínimos e máximos apresentou resultados similares entre as máquinas de ensaio, isto é, para o solo de textura média houve menores amplitudes da RT em relação ao de classe textural muito argilosa (Tabela 5). Estes resultados também indicam que houve grande variabilidade dos dados, a qual tem sido relatada como dependente das dimensões dos agregados (IMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002), fato justificado pelos seus formatos desde os mais próximos a esferas até prismáticos. Os valores dos coeficientes de variação (CV) da RT apresentaram magnitudes distintas entre os solos. Para ambas as máquinas de ensaio,

Tabela 5 - Resumo estatístico* da resistência tênsil de agregados (kPa) para os fatores solo, sistema de uso e máquina de ensaio. (N = 50)

Classe textural	Sistema de uso	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	DP	CV
Máquina de ensaio de referência							
Média	Mata	22,06	145,56	49,57	52,90	24,08	45,52
Média	Cultivo	18,44	93,36	54,58	55,09	21,01	38,14
Muito argilosa	Mata	24,00	308,03	97,92	117,88	70,09	59,46
Muito argilosa	Cultivo	58,16	407,27	185,24	195,18	78,17	40,05
Máquina de ensaio sob teste							
Média	Mata	21,44	99,47	45,87	48,29	16,37	33,91
Média	Cultivo	18,37	118,10	54,30	53,02	21,55	40,64
Muito argilosa	Mata	11,61	561,56	141,59	157,02	104,00	66,23
Muito argilosa	Cultivo	70,36	361,91	166,32	183,56	71,64	39,03

*: DP, desvio-padrão; CV, coeficiente de variação (%).

no solo de textura média foram observados valores do CV mais próximos entre os sistemas de uso. Por outro lado, no solo muito argiloso, os valores de CV apresentaram um maior distanciamento entre os sistemas de uso. Estas observações refletem certo grau de igualdade entre os resultados obtidos por ambas as máquinas de ensaio. De modo geral, os valores mais elevados do CV para os solos sob mata também é devido ao maior número de ciclos de umedecimento e secagem, que pode melhorar a microestrutura e gerar zonas heterogêneas de baixa resistência nos agregados (KAY; DEXTER, 1992), além de uma maior variação do seu formato, fato observado durante a determinação da RT. Por outro lado, as modificações na estrutura dos agregados originadas pelo tráfego de máquinas corroboram as menores variabilidades da RT observadas nos solos cultivados (TORMENA; FIDALSKI; ROSSI JUNIOR, 2008).

A diferença entre o valor médio e mediano da RT foi acentuada para alguns tratamentos (Tabela 5). Estes resultados indicam que nem todas as observações experimentais foram distribuídas simetricamente em torno destas medidas de posição, o que provavelmente requer prévia transformação dos dados para que os resultados obtidos possam ser analisados e interpretados corretamente (MESQUITA; MORAES; CORRENTE, 2002). Para tanto, foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade da distribuição dos resíduos da análise de variância, que confirmou a necessidade de realizar transformação logarítmica dos dados visando estabilizar as variâncias dos tratamentos e adequá-los aos testes estatísticos

paramétricos (McINTYRE; TANNER, 1959; LOGSDON; JAYNES, 1996; MESQUITA, MORAES; CORRENTE, 2002). A análise de variância dos dados indicou que a RT não foi influenciada pelos tipos de máquinas de ensaio utilizadas ($F=0,23$; $p>0,63$) (Tabela 6). Em relação aos outros fatores em estudo, as interações (Solo*Máquina de ensaio) e (Sistema de uso*Máquina de ensaio) foram não significativas, apresentando os respectivos valores ($F=2,56$; $p>0,11$) e ($F=2,23$; $p>0,14$). Isto demonstra que a velocidade de deslocamento igual a $1,55 \text{ mm s}^{-1}$, utilizada para a compressão dos agregados, não produz resultados de RT distintos daqueles obtidos com velocidade igual a $0,03 \text{ mm s}^{-1}$ da máquina de ensaio de referência, o que possibilita determinar a RT utilizando unicamente a máquina de ensaio sob teste (equipamento proposto).

Tabela 6 - Análise de variância dos valores de resistência tênsil de agregados do solo obtidos pelas máquinas de ensaio sob teste e de referência para diferentes sistemas de uso da terra

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	P > F
Solo	1	114,349	522,270	< 0,0001
Sistema de uso	1	6,024	27,510	< 0,0001
Máquina de ensaio	1	0,050	0,230	0,6338
Solo*Sistema de uso	1	3,749	17,120	< 0,0001
Solo*Máquina de ensaio	1	0,561	2,560	0,1104
Sistema de uso*Máquina de ensaio	1	0,488	2,230	0,1365

A Figura 5 mostra a análise de regressão linear entre as médias da RT dos tratamentos obtidas com as máquinas de ensaio sob teste e de referência. Pode-se observar que os pontos experimentais geralmente se alinham muito próximos à linha 1:1, o que confirma a similaridade das médias da RT entre as máquinas de ensaio verificada na análise de variância (Tabela 6). Os índices estatísticos (Tabela 7), que não dependem da distribuição dos dados, permitiram complementar a avaliação dos efeitos da velocidade de compressão dos agregados nas determinações da RT em função do tipo de máquina de ensaio utilizada. Nesta pesquisa, caso as velocidades de compressão dos agregados proporcionem resultados de RT satisfatórios, o grau de ajustamento esperado entre as máquinas de ensaio deverá ser o mais próximo da

Figura 5 - Resultados da regressão linear para os valores médios do logaritmo da resistência tênsil de agregados obtidos pelas máquinas de ensaio sob teste e de referência, considerando todos os solos e sistemas de uso avaliados

Tabela 7 - Índices estatísticos dos dados de resistência tênsil de agregados de solo obtidos com a máquina de ensaio sob teste em relação àquelas da máquina de ensaio de referência

R^2	d	RD	EF	MAE	Emáx	CMR	RMSE	RMSEa	RMSEs
0,953	0,986	0,859	0,940	0,102	0,248	-0,005	3,01	2,90	0,77

*: R^2 , coeficiente determinação; d, coeficiente de concordância; RD, razão de desvios; EF, coeficiente de eficiência; MAE, erro absoluto médio; Emáx, erro máximo; RMSE, raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado; RMSEa, raiz quadrada do erro aleatório médio normalizado; RMSEs, raiz quadrada do erro sistemático médio normalizado; CMR, coeficiente de massa residual. MAE e Emáx possuem a mesma unidade da respectiva propriedade do solo; RMSE, RMSEa e RMSEs possuem unidades percentuais. Os demais índices estatísticos são adimensionais.

relação: $d = RD = EF = 1$ e $Emáx = MAE = RMSE = RMSEa = RMSEs = CMR = 0$. O resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov mostrou que houve normalidade da distribuição do resíduo da regressão linear entre os dados obtidos pelas máquinas de ensaio, o que possibilitou a determinação da RMSEa e da RMSEs.

Os índices de precisão (R^2) e de exatidão (d) foram altamente concordantes entre si (Tabela 7), com valores próximos da unidade (condição ideal). O valor da RD indica comportamentos similares entre as máquinas de ensaio quanto à dispersão dos dados em torno de suas respectivas médias, fato também confirmado pelo elevado valor de EF (0,94), o qual demonstra que as médias da RT dos tratamentos foram

consistentes entre as máquinas de ensaio. Ademais, os índices MAE e $E_{máx}$ mostraram que a magnitude dos erros relacionados ao conjunto de tratamentos se manteve estatisticamente aceitável. Notadamente, a RMSE, a RMSEa e a RMSEs, isto é, os erros total, aleatórios e sistemáticos, respectivamente, apresentaram valores bastante reduzidos. A RMSEa teve magnitude similar àquela da RMSE, enquanto que a RMSEs representou menos que 1 % da média da RT referente ao conjunto de tratamentos, fato confirmado pela magnitude do CMR (praticamente zero). Estes resultados comprovam a predominância dos erros aleatórios em relação aos sistemáticos na comparação dos dados da RT entre as máquinas de ensaio. Portanto, considerando as escalas de velocidade de compressão dos agregados utilizadas, pode-se afirmar não existe uma faixa de valores de RT que sejam mais bem detectadas por uma ou outra máquina de ensaio. Dessa forma, esta pesquisa constitui uma importante contribuição para avanços metodológicos em Física do Solo devido à possibilidade de realizar análises mais rápidas e sem prejuízo à acurácia das medidas de RT, o que favorece sua determinação em rotinas laboratoriais e maior difusão como indicadora da qualidade estrutural do solo.

4.4 Conclusões

1 - O equipamento proposto foi adequado às determinações de resistência do solo à penetração em laboratório, cujo ajuste dos dados mediante regressão não-linear permitiu diferenciar os tratamentos de forma satisfatória, apresentando coeficientes similares àqueles de outros trabalhos;

2 - Não houve diferença significativa da resistência tênsil determinada sob velocidades constantes de compressão dos agregados com magnitudes de 0,03 e 1,55 mm s⁻¹;

3 - As resistências à penetração e a tênsil de solos podem ser determinadas com elevada acurácia utilizando unicamente o equipamento proposto.

Referências

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. In: _____. **ASAE standard: ASAE EP542**. St Joseph, 1999. p. 964-966.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, R. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Ed.). **Methods for assessing quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141. (SSSA. Special Publication, 49).
- BARBER, R.G. Persistence of loosened horizons and soybean yield increases in Bolivia. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 3, p. 943-950, 1994.
- BARTOLI, F.; BURTIN, G.; GUÉRIF, J. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water stability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 54, p. 259-274, 1992.
- 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.; 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, n. 5, p. 787-794, 2006.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 363-375.
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L.B.; POST, W.M.; IZAURRALDE, R.C. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 1472-1481, 2005.
- BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 463-478.
- BUDYNAS, R.G.; NISBETT, J.K. **Shigley's mechanical engineering design**. 8th ed. New York: McGraw Hill Higher Education, 2007. 1088 p.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 33, p. 519-524, 1990.
- BUSSCHER, W.J.; FREDERICK, J.R.; BAUER, P.J. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 3, p. 999-1003, 2000.

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.

CAMP Jr., C.R.; LUND, Z. Effect of mechanical impedance on cotton root growth. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 11, p. 168-190, 1968.

CAMPBELL, D.J.; O'SULLIVAN, M.F. The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction, and tillage. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. **Soil Analysis**. New York: Marcell Dekker, 1991. p. 399-423.

CAUSARANO, H. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.28, n.1, p.15-25, 1993.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 31, p. 139-147, 1985.

DEXTER, A.R.; WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K.; MULLINS, C. **Soil and environmental analysis, physical methods**. New York: Marcel Dekker, 2000. p. 401-430.

EHLERS, W.W.; KOPKE, F.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and growth root of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.3, p.261-275, 1983.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

_____. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2nd ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Brasília: Sistema de Produção de Informação, 2006. 306 p.

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 255-293.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C.; STEWART, B.A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 167-179.

HENDERSON, C.W.L. Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform, sandy soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 40, p. 497-508, 1989.

HERRICK, J.E.; JONES, T.L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1320-1324, 2002.

HILL, R.L. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 161-166, 1990.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strenght and friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1656-1661, 2002.

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, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação das pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 11-18, 2001.

KAY, B.D.; ANGERS, D.A. Soil structure. In: SUMNER, M.E. (Ed.) **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 1999. p. 229-276.

KAY, B.D.; DEXTER, A.R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 30, p. 297-310, 1992.

KIRKEGAARD, J.A.; MUNNS, R.; JAMES, R.A.; GARDNER, P.A.; ANGUS, J.F. Reduced growth and yield of wheat with conservation cropping. II: Soil biological factors limit growth under direct drilling. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 46, p. 75-88, 1995.

LARNEY, F.J.; HUFFMAN, R.L.; SCHULER, R.T.; TAYLOR, D.R.; KLADIVKO, E.J.; LOWERY, B. A portable, self-leveling, constant-rate cone penetrometer with cone penetrometer with computer-controlled data acquisition for tillage studies. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 14, p. 231-239, 1989.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, p. 279-285, 2006.

LEGATES, D.R.; McCABE Jr., G.J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, **Water Resources Research**, Washington, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LOAGUE, K.; GREEN, R.G. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 7, n. 1-2 p. 51-73, 1991.

LOGSDON, S.D.; JAYNES, D.B. Spatial variability of hydraulic conductivity in a cultivated field at different times. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 3, p. 703-709, 1996.

LOWERY, B. A portable constant-rate cone penetrometer. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 2, p. 412-414, 1986.

LOWERY, B.; MORRISON, J.E. Soil penetrometers and penetrability. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 363-88.

McINTYRE, D.S.; TANNER, C.B. Abnormally distributed soil physical measurements and no parametric statistics. **Soil Science**, Madison, v. 88, p. 133-137, 1959.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O.; CORRENTE, J.E. More adequate probability distributions to represent the saturated soil hydraulic conductivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 789-793, 2002.

MUNKHOLM, L.J.; SCHJØNNING, P. Structural vulnerability of a sandy loam exposed to intensive tillage and traffic in wet conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 79-85, 2004.

PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A.; KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 46, p. 203-208, 1998.

PERFECT, E.; KAY, B.D.; SILVA, A.P. Influence of soil properties on the statistical characterization of dry aggregate strength. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 2, p. 532-537, 1995.

RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJIK, F. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 145-153, 2000.

SCHMID, W.E. **The determination of soil properties in situ by an impact penetrometer**. Princeton: Princeton University, Princeton Soil Engineering, 1966. 199 p. (Research Series, 3).

SERAFIM, M.E.; VITORINO, A.C.T.; PEIXOTO, P.P.P.; SOUZA, C.M.A.; CARVALHO, D.F. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo vermelho distroférico sob diferentes sistemas de produção. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 654-665, 2008.

SHANMUGANATHAN, R.T.; OADES, J.M. Effect of dispersible clay on the physical properties of the B horizon of a Red-Brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 20, p. 315-324, 1982.

SHARRATT, B.; VOORHEES, W.; McINTOSH, G.; LEMME, G. Persistence of soil structural modifications along a historic wagon trail. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 3, p. 774-777, 1998.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.C. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2008.

SNYDER V.A.; MILLER, R.D. Tensile strength of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 1, p. 58-65, 1985.

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.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium- to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 33-42, 2008.

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.

_____. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, p. 223-232, 1999.

UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R. Soil friability. **Journal of Soil Science**, London, v. 32, n. 3, p. 203-213, 1981.

VAZ, C.M.P., HOPMANS, J.W. Simultaneous measurement of soil strength and water content with a combined penetrometer-moisture probe. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 1, p. 4-12. 2000.

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 1220-1225, 1984.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. p. 319-344.

WATTS, C.; DEXTER, A.R. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 42, n. 2, p. 253-275, 1997.

WILLMOTT, C.J., WICKS, D.E. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. **Physical Geography**, Los Angeles, v. 1, p. 59-73, 1980.

WILLMOT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K.M.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

ZACHARIAS, S.; HEATWOLE, C.D.; CAKLEY, C.W. Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 39, p. 47-54, 1996.

ZHAI, R.; KACHANOSKI, R.G.; VORONEY, R.P. Tillage effects on the spatial and temporal variations of soil water. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 1, p. 186-192, 1990.

5 DESENVOLVIMENTO DE UM CONSOLIDÔMETRO PNEUMÁTICO: MODELAGEM DA COMPACTAÇÃO, RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E RESISTÊNCIA TÊNIL DE AGREGADOS

Resumo

O manejo inadequado do solo freqüentemente tem promovido sua compactação, o que pode ocasionar perda da sustentabilidade da produção agrícola. Os objetivos deste trabalho foram: (i) desenvolver um consolidômetro com propulsão pneumática de baixo custo; (ii) avaliar sua funcionalidade mediante estudo do comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho de textura argilo-arenosa, sob plantio direto; (iii) avaliar o potencial de utilização da propulsão pneumática para determinações de resistência do solo à penetração (RP) e de resistência tênil de agregados (RT) utilizando o consolidômetro proposto. A avaliação do comportamento compressivo do solo foi realizada mediante curvas de compressão utilizando amostras indeformadas, obtidas das posições de amostragem relativas à linha e à entrelinha da cultura de aveia-preta. Nestas amostras foram realizados ensaios de compressão uniaxial em condição de teor de água correspondente ao potencial mátrico de -10 kPa, sendo determinados o índice de compressão (IC) e a pressão de preconsolidação (σ_p) bem como suas relações com outras propriedades físicas do solo. A RP foi determinada em amostras indeformadas de um solo de classe textural franco-arenosa sob citrus. Para as determinações da RT foram utilizados agregados de dois solos: um Argissolo Acinzentado coeso e um Argissolo Amarelo não coeso. Os resultados mostraram que a porosidade total e a densidade do solo foram maiores ($p < 0,05$) para a linha e entrelinha da cultura de aveia-preta, respectivamente. A curva de compressão foi sensível às diferenças estruturais do solo entre as posições de amostragem, sendo que a σ_p e o IC indicaram, respectivamente, maior capacidade de suporte de carga e menor susceptibilidade à compactação ($p < 0,05$) para a entrelinha da cultura de aveia-preta. O IC e a σ_p podem ser estimados com elevada acurácia e mais rapidamente a partir da densidade do solo inicial. A utilização de propulsão pneumática não influenciou os resultados da RP e da RT. Isto permite afirmar que a curva de compressão do solo, a RP e a RT podem ser determinadas unicamente com o equipamento pneumático desenvolvido neste estudo.

Palavras-chave: Ensaio de compressão uniaxial; Pressão de preconsolidação; Índice de compressão

Abstract

Inadequate soil management is often the cause of soil compaction, which in turn can cause loss of sustainability of agricultural production. The objectives of this study were to: (i) develop an inexpensive pneumatic consolidometer, (ii) evaluate its functionality through the study of compressive behavior of a sandy clay Rhodic

Hapludox, under no-tillage system, (iii) evaluate the potential use of pneumatic propulsion for determination of resistance to penetration (PR) and tensile strength of aggregates (TS) using the proposed consolidometer. Compression curves using undisturbed soil samples obtained from row and inter-row sampling positions under oats were used for evaluation of compressive behavior of the soil. Uniaxial compression tests were performed in these samples on soil water contents corresponding to a matric potential of -10 kPa and used for the determination of the compression index (CI) and the preconsolidation pressure (σ_p) and their correlations with other soil physical properties. The PR was determined on undisturbed samples of a sandy loam soil under citrus. Aggregates from two Ultisols were used for the determination of TS: a hardsetting and a non-hardsetting soil. The results showed that the soil total porosity and bulk density were higher ($p < 0.05$) for the row and inter-row positions, respectively. The compression curve was sensitive to soil structural differences between the sampling positions, and the σ_p and CI indicated, respectively, higher load support and less susceptibility to compaction ($p < 0.05$) for the inter-row position. The CI and σ_p can be estimated with faster and higher accuracy from the initial soil bulk density. The use of pneumatic propulsion did not influence the results of PR and TS. Therefore, the soil compression curve, PR and TS can be determined using only the pneumatic equipment developed in this study.

Keywords: Uniaxial compression test; Preconsolidation pressure; Compression index

5.1 Introdução

A compactação é um dos processos que mais afeta a estrutura do solo. Este processo ocorre em um sistema tridimensional, induzido por estresses mecânicos comumente originados do tráfego de máquinas e da ação de implementos agrícolas (FLOWERS; LAL, 1998) e/ou do pisoteio de animais (BHARATI et al., 2002). Como resultado, a compactação ocasiona decréscimo de volume do solo (DEXTER, 2004; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006) e, conseqüentemente, a deterioração de sua qualidade física, podendo limitar o potencial produtivo de solos agrícolas (KIRKEGAARD et al., 1995; BEUTLER et al., 2006). A resistência do solo à redução de seu volume quando submetido a uma força externa é definida como compressibilidade (BRADFORD; GUPTA, 1986; GUPTA; ALLMARAS, 1987; HORN; LEBERT, 1994), a qual depende de fatores externos e internos. Os fatores externos são caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência da força aplicada (HORN, 1988; LEBERT; HORN, 1991), enquanto que os fatores internos se referem à história de tensão, teor de água,

teor de matéria orgânica, textura, estrutura, densidade do solo inicial dentre outros (HORN, 1988; McBRIDE, 1989; IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004).

O comportamento compressivo do solo depende principalmente de suas propriedades físicas e da força aplicada (estresse), apresentando estreita relação com o sistema de manejo (HOLTZ; KOVACS, 1981). Neste contexto, alguns indicadores, como a pressão de preconsolidação e o índice de compressão, permitem avaliar a capacidade de suporte de carga e a susceptibilidade do solo à compactação, respectivamente, os quais são úteis para o planejamento mais adequado da execução de operações mecanizadas e a redução dos problemas de degradação física de solos agrícolas (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; SILVA; REINERT; REICHERT, 2000; DIAS JUNIOR et al., 2005). Estes indicadores são obtidos da curva de compressão, que expressa a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo (ou índice de vazios) (HOLTZ; KOVACS, 1981). Para tanto, é necessário utilizar um equipamento específico, denominado consolidômetro.

No Brasil, poucos consolidômetros têm sido produzidos e os modelos importados, automatizados ou não, possuem elevado custo, o que limita a utilização do índice de compressão e da pressão de preconsolidação bem como suas relações com outros indicadores da qualidade física de solos agrícolas. Dessa forma, freqüentemente, funções de pedotransferência têm sido utilizadas para estimar a pressão de preconsolidação e/ou o índice de compressão a partir de determinações da textura e do teor de água no solo (HORN; FLEIGE, 2003; IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004), da densidade do solo (McBRIDE; JOOSSE, 1996; IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004; SUZUKI et al., 2008), da matéria orgânica (McBRIDE; JOOSSE, 1996), da resistência tênsil de agregados (RT) (MOSADDEGHI et al., 2003) dentre outros. A pressão de preconsolidação também apresenta potencial para prever as condições adequadas ao crescimento de plantas devido a sua estreita relação com a resistência do solo à penetração (RP) (CULLEY; LARSON, 1987; MOSADDEGHI et al., 2003; SUZUKI et al., 2008). Além disso, considerando a curva de compressão, é possível determinar o volume total de poros em função da densidade do solo. Isto permite identificar os níveis de pressão aplicada que podem reduzir a macroporosidade do solo a $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$

(OLIVEIRA et al., 2003), considerada crítica ao crescimento de raízes (VOMOCIL; FLOCKER, 1966).

Dessa forma, os objetivos deste trabalho foram: (i) desenvolver um consolidômetro com propulsão pneumática e de baixo custo; (ii) avaliar sua funcionalidade mediante estudo do comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho de classe textural argilo-arenosa sob plantio direto e (iii) avaliar o potencial de utilização do equipamento de propulsão pneumática nas determinações da RP em um solo de classe textural franco-arenosa bem como da RT em dois Argissolos, sendo um coeso e outro não coeso.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Detalhes construtivos do consolidômetro pneumático

O consolidômetro proposto foi desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba - SP. O seu princípio de funcionamento consiste na utilização de um corpo-de-prova (amostra de solo, indeformada ou não), confinado lateralmente em anel volumétrico metálico e com livre drenagem nas extremidades superior e inferior, o qual é submetido a incrementos sucessivos de pressão vertical (US DEPARTMENT OF THE ARMY, 1970). Para tanto, foi desenvolvido um conjunto pneumático para aplicar cargas uniaxiais à amostra de solo, sendo os carregamentos mantidos por tempos pré-definidos pelo usuário. A compressibilidade da amostra é determinada a partir de sua deformação vertical, detectada por um dispositivo medidor de deslocamento linear: um relógio comparador eletrônico com capacidade de 12,7 mm e resolução de 0,01 mm (Figura 1-C,a). O consolidômetro construído é mostrado na Figura 1 e os componentes de seu conjunto pneumático são caracterizados a seguir:

- a) Um filtro de ar Norgren, série Excelon[®], modelo F72G-2GN-QD3, com capacidade de pressão até 17 bars, cuja finalidade é garantir maior segurança aos demais componentes pneumáticos, principalmente para as válvulas reguladoras de pressão e de fluxo de ar (Figura 1-B,a);

Figura 1 - Consolidômetro pneumático com uma amostra sob ensaio de compressão uniaxial. Detalhes: (A,a) manômetro eletrônico com resolução 0,01 bar, (A,b) eixo do cilindro pneumático, (B,a) filtro de ar, (B,b) válvula reguladora de pressão, (B,c) válvula para controle de fluxo tipo multidirecional, (B,d) válvula controladora de fluxo, (C,a) indicador de deformação da amostra de solo, (C, b) suporte de fixação do indicador de deformação, (D) e (E) placas porosas inferior e superior, respectivamente, do dispositivo de transmissão de pressão à amostra de solo

- b) Um cilindro pneumático de duplo efeito e com amortecimento fixo (modelo RA/192000 - ISO 21287). Este atuador tem diâmetro de pistão e curso iguais a 100 e 50 mm, respectivamente, e o deslocamento vertical de seu eixo promove a transmissão da carga à amostra durante o teste de compressão axial (Figura 1-A,b);
- c) Uma válvula reguladora de precisão Norgren, modelo 11-018-110, cuja função é controlar os carregamentos com pressão entre 25 e 1600 kPa, aplicados sobre amostras de 0,07 m de diâmetro. Sua faixa nominal de operação é de 0,4 a 10 bars (Figura 1-B,b);
- d) Um manômetro eletrônico Watson Smith, modelo 53 6035 00, com capacidade máxima de 10 bars e resolução de 0,01 bar, para medição da pressão de ar atuante no cilindro pneumático (Figura 1-A,a);

- e) Uma válvula de fluxo multidirecional para aplicações de dupla pressão. Principais características: marca Norgren, modelo X3 3637 02, tipo 5/3 vias, centro fechado, com acionamento manual por alavanca. Esta válvula permite controlar o posicionamento vertical do eixo do atuador linear pneumático (Figura 1-B,c);
- f) Duas válvulas controladoras de fluxo (marca Norgren, tipo unidirecionais) que permitem regular a velocidade de deslocamento do eixo do atuador linear, sendo uma localizada junto ao cilindro pneumático, com regulagem fixa e atuante no retorno do eixo do atuador à posição inicial (modelo C0SA01228), e outra com regulagens pré-definidas pelo usuário e atuante na compressão da amostra (modelo T1000A2800) (Figura 1-B,d).

Foi gerada uma curva de calibração para o consolidômetro visando estabelecer a relação entre a força aplicada à superfície de uma amostra de solo em resposta à pressão de ar regulada no consolidômetro. Para tanto, foi utilizada uma célula de carga com capacidade de 500 kgf e sensibilidade de 2 mV/V, entreposta no lugar da amostra de solo e fixa à parte superior do consolidômetro. Os valores de força medidos foram gravados em um sistema eletrônico de armazenamento dados. Dessa forma, foi possível medir a variação da força no eixo do cilindro pneumático (Figura 1-A,b), gerada pela aplicação de diferentes pressões de ar no consolidômetro obtidas a partir da regulagem manual da válvula reguladora de pressão. A faixa de pressões utilizada foi de 0,15 a 7,9 bar, o que corresponde a carregamentos (pressões axiais aplicadas ao corpo de prova) entre 13 e 1600 kPa para amostras de diâmetro igual a 0,07 m. Ressalta-se que as medidas de pressão de ar são expressas em bar devido à escala do manômetro utilizado (Figura 1-A,a) enquanto que os carregamentos são mencionados em kPa, como comumente ocorrem em ensaios de compressão uniaxial.

Alternativamente, foram desenvolvidos alguns acessórios que permitem a utilização de um dinamômetro eletrônico juntamente ao consolidômetro. Dessa forma, pode ser acoplada ao dinamômetro uma haste de aço com extremidade cônica para penetrometria (Figura 2-E,e) ou outra composta por uma placa metálica plana para ensaios de resistência tênsil de agregados de solo (Figura 2-E,d). Sua montagem é relativamente simples e rápida, consistindo na substituição dos dispositivos para ensaio de compressão uniaxial (Figura 1-C; D; E) pelo dinamômetro e seus acessórios.

Figura 2 - Consolidômetro pneumático com acessórios para ensaios de resistência do solo à penetração (RP) e resistência tênsil de agregados (RT). Detalhes: (A) e (B) máquina de ensaio preparada para medidas de RP, (C) e (D) máquina de ensaio preparada para medidas de resistência tênsil de agregados de solo, RT, (E,a) dinamômetro eletrônico, (E,b) chapa de aço (cantoneira) para fixação do dinamômetro, (E,c) haste com extremidade cônica para penetrometria e (E,d) haste com base plana para ensaios de RT

5.2.2 Curvas de compressão do solo

O estudo foi desenvolvido em um solo classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2006) de classe textural argilo-arenosa (476, 44 e 480 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente), localizado na Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa - PR e sob sistema de plantio direto há mais

de 16 anos, com rotação das culturas soja, milho, feijão, trigo, aveia-preta, ervilhaca e tremoço. As dimensões da área experimental foram de 50 x 10 m, e a amostragem correspondeu a uma linha e entrelinha ao centro da cultura de aveia-preta. Para cada posição de amostragem, na camada superficial entre 2,5 e 5,0 cm, foram coletadas oito amostras indeformadas de solo utilizando anéis volumétricos de 7,0 x 2,5 cm de diâmetro e altura, respectivamente.

No laboratório, as amostras foram saturadas com água por capilaridade durante 48 h e, em seguida, submetidas ao potencial mátrico de -10 kPa utilizando câmaras de Richards (KLUTE, 1986). Após atingir o equilíbrio hidráulico, cada amostra foi pesada e submetida ao ensaio de compressão uniaxial, realizado mediante a aplicação sucessiva e contínua de carregamentos crescentes e pré-estabelecidos de 25, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1300 e 1600 kPa. Cada carregamento foi aplicado durante cinco minutos, o suficiente para que ocorresse 99 % da máxima deformação do solo (SILVA; REINERT; REICHERT, 2000). A variação da altura da amostra de solo em função do carregamento aplicado foi registrada e utilizada nos cálculos de deformação do solo. Finalizado o ensaio de compressão uniaxial, as amostras foram secas em estufa a 105 °C, por 24 h, para a determinação da densidade do solo (BLAKE; HARTGE, 1986). O teor de água em cada amostra, imediatamente antes do ensaio, foi determinado pela razão entre as massas de água e de solo seco. A porosidade total foi estimada pela eq. (1) e as variações da razão de vazios, da porosidade de aeração e do grau de saturação do solo, obtidos em função dos carregamentos aplicados, foram calculadas pelas eqs. (2), (3) e (4), respectivamente:

$$PT = 1 - \frac{D_{si}}{D_p}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{D_p}{D_s} - 1, \quad (2)$$

$$\alpha = PT - \theta, \quad (3)$$

$$Gs = \frac{\theta}{PT} 100, \quad (4)$$

sendo, PT a porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), D_p a densidade de partículas, com valor igual a $2,6 \text{ Mg m}^{-3}$, ε a razão de vazios ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), α a porosidade de aeração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ o teor

de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Gs o grau de saturação do solo (%), sendo considerada a densidade da água igual a $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$.

O ensaio realizado permitiu obter curvas de compressão, que consiste na razão de vazios do solo em função do logaritmo da pressão vertical aplicada (Figura 3). A partir destas curvas, foram determinados os valores do índice de compressão (IC) e da pressão de preconsolidação (σ_p) para as duas posições de amostragem, utilizando os procedimentos desenvolvidos por Imhoff, Silva e Fallow (2004) com o programa computacional Mathcad® (MATHSOFT, 2000). Na primeira etapa, o programa calcula o ponto de máxima curvatura da curva de compressão uniaxial, que corresponde ao valor mínimo de sua segunda derivada. Em etapas sucessivas, a quantificação da σ_p e do IC é realizada conforme o método gráfico proposto por Casagrande (1936). Este método consiste em traçar, sobre o ponto de máxima curvatura, uma reta paralela ao eixo das abscissas (Figura 3-a) e uma reta tangente (Figura 3-b). A abscissa referente à intersecção da bissetriz do ângulo formado entre essas duas retas (Figura 3-c) com o prolongamento da linha de compressão virgem (Figura 3-d) representa a σ_p (CASAGRANDE, 1936; TAYLOR, 1948). O coeficiente angular da linha de compressão virgem corresponde ao IC (Figura 3).

Figura 3 - Curva de compressão do solo e estimativa da σ_p segundo o método de Casagrande (1936): (a) linha paralela ao eixo das abscissas no ponto de máxima curvatura, (b) tangente no ponto de máxima curvatura, (c) bissetriz do ângulo formado entre as linhas (a) e (b), (d) linha de compressão virgem, (σ_p) pressão de preconsolidação

5.2.3 Resistência mecânica do solo

Resistência do solo à penetração

A avaliação da funcionalidade do consolidômetro proposto para determinações da resistência à penetração (RP) foi realizada em amostras indeformadas de solo em anéis volumétricos (5 cm de diâmetro e altura). Para tanto, foi selecionado um solo de classe textural franco-arenosa: 150, 66 e 784 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente, cultivado com citrus e localizado no Campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP. Foram coletadas duas amostras na área experimental, sendo as posições de amostragem aleatoriamente escolhidas. As amostras coletadas foram individualmente revestidas com filme de PVC. No laboratório, as amostras foram ajustadas ao volume de seu anel volumétrico, sendo colocada uma tela de nylon na extremidade inferior. Em seguida, foram saturadas (por capilaridade) com água deionizada por 48 h. Depois, cobriu-se cada extremidade superior com papel, deixando-se secar ao ar (lentamente e com drenagem livre) a fim de obter um gradiente de teor de água entre as amostras. Em seguida, as amostras foram revestidas com filme de PVC e mantidas sob refrigeração (5 °C por 30 d), para redistribuição interna da água.

Antes do ensaio de RP, as amostradas foram pesadas para determinação do teor de água no solo. Em seguida, foi introduzida uma haste de aço de extremidade cônica (ângulo de 60° e diâmetro basal de 0,4 cm) até 4,0 cm da superfície superior de cada amostra de solo. A velocidade de penetração do cone no solo foi ajustada pela válvula controladora de fluxo (Figura 1-B,d) para um valor nominal de 10 mm min⁻¹ (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998). Um computador foi utilizado para a aquisição e o armazenamento dos dados de força (kgf) necessários à penetração do cone, com frequência de uma medição por segundo, totalizando aproximadamente 230 medições por amostra de solo. Ao final das medições de força, foram determinados o θ , pela razão entre as massas de água e de solo seco, e a D_s (BLAKE; HARTGE, 1986). O conjunto de dados de força, obtido em cada amostra, foi transformado para pressão:

$$RP = \frac{Fg}{A 10^6}, \quad (5)$$

sendo, RP expressa em MPa; F a força medida (kgf); g a aceleração da gravidade ($m s^{-2}$) e A a área basal do cone (m^2).

Resistência tênsil de agregados

O potencial de utilização do consolidômetro proposto para determinações da RT foi avaliado em agregados naturais de dois solos, localizados em uma área da Estação Experimental da EMBRAPA/CNPAT, em Pacajus - CE (LIMA et al., 2005; ALMEIDA, 2008). Os solos foram classificados como Argissolo Acinzentado coeso e Argissolo Amarelo não coeso (EMBRAPA, 2006), ambos sob cultivo de cajuzeiro e sob mata nativa, respectivamente. As amostras do solo coeso e do não coeso foram obtidas nos horizontes Bt na profundidade média de 1,17 e 1,51 m, respectivamente, cuja caracterização é apresentada na Tabela 1. Em cada área experimental foi coletado um bloco indeformado de solo com 15 x 22 x 7 cm de largura, comprimento e altura, respectivamente. Esses blocos foram revestidos com filme de PVC, acondicionados em caixas térmicas e transportados ao laboratório. Em seguida, os blocos foram manualmente destorroados em seus agregados naturais pela aplicação de uma força mínima necessária para separá-los pelos seus pontos de fraqueza. O diâmetro dos agregados foi classificado com o auxílio de duas peneiras, cujas respectivas aberturas de malha foram de 19,0 e 12,7 mm (IMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002). Para secagem final e homogeneização do teor de água, esses agregados foram secos ao ar por 36 h e, em estufa, a 60 °C por 24 h, sendo armazenados em sacos de papel até o momento da realização dos ensaios de RT. Foram utilizadas 30 repetições por área experimental.

Tabela 1 - Caracterização granulométrica* e matéria orgânica (MO) para os solos analisados, conforme resultados obtidos por Lima et al. (2005)

Solo	Sistema de uso	Argila	Silte	Areia	MO
----- g kg ⁻¹ -----					
Argissolo Acinzentado coeso	Cultivo	290	40	670	3,0
Argissolo Amarelo não coeso	Mata	280	20	700	8,0

*: Argila: < 2 µm; silte: 2-50 µm; areia: 50-2000 µm.

As medições de RT foram realizadas em duas máquinas de ensaio: no consolidômetro proposto e no penetrômetro automatizado, descrito no capítulo 4. No consolidômetro proposto foi utilizada uma pressão de ar de 8 bars, ajustada com a válvula reguladora de pressão (Figura 1-B,b), e velocidade de deslocamento do atuador linear de $0,03 \text{ mm s}^{-1}$, obtida pelo ajuste da válvula controladora de fluxo (Figura 1-B,d). Para o penetrômetro automatizado, a velocidade de deslocamento do atuador linear foi constante e igual a $1,55 \text{ mm s}^{-1}$. Previamente, cada agregado de solo foi pesado em balança analítica e, em seguida, submetido ao ensaio de tensão indireta.

Em ambas as máquinas de ensaio, os agregados de solo foram individualmente colocados na posição mais estável entre duas placas metálicas: uma inferior, fixa à base da máquina de ensaio, e outra superior, móvel e ligada à extremidade da célula de carga do dinamômetro, com capacidade de 20 kgf. A força necessária à ruptura tênsil de cada agregado de solo foi obtida mediante a função “peak hold” do dinamômetro, que registra a força de maior intensidade antes da ruptura do agregado devido à compressão proporcionada pela placa móvel. As amostras foram pesadas em balança analítica e submetidas à secagem em estufa a $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 48 h, para a determinação do teor de água residual médio dos agregados de solo. A RT foi calculada conforme (DEXTER; KROESBERGEN, 1985):

$$RT = \frac{0,576 P}{D^2 10^3}, \quad (6)$$

sendo, RT a resistência tênsil de agregados (kPa); 0,576 a constante de proporcionalidade da relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P a força aplicada (N) e D o diâmetro efetivo do agregado (m).

O parâmetro D foi calculado pela equação (DEXTER; KROESBERGEN, 1985):

$$D = D_m \left(\frac{M}{M_0} \right)^{0,333}, \quad (7)$$

sendo, D_m o diâmetro médio dos agregados (m), definido pela média dos tamanhos da abertura das peneiras; M a massa seca do agregado individual (g) e M_0 a massa seca média dos agregados (g).

5.2.4 Análises estatísticas

Os dados referentes aos índices obtidos a partir da curva de compressão do solo e as demais propriedades físicas envolvidas nos ensaios de compressão uniaxial foram submetidos à análise de variância, sendo as médias entre as posições de amostragem comparadas pelo teste t ($p < 0,05$). Para os dados de RP, foram gerados gráficos de sua distribuição em cada unidade experimental e calculadas as medidas de dispersão e de posição, excluindo-se as bordaduras. Os dados de RT, para ambos os solos e equipamentos, foram submetidos à análise de variância e ao teste F ($p < 0,05$). Foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade da distribuição dos dados submetidos à análise de variância.

5.3 Resultados e Discussão

A utilização de curva de calibração apresenta como vantagem a simplificação dos cálculos da relação entre a pressão de ar regulada no consolidômetro e a pressão atuante na superfície da amostra de solo (carregamento) durante o ensaio de compressão uniaxial (Figura 4). Isto é importante porque quantificar as perdas de carga em um sistema pneumático nem sempre é fácil. Para os quatro primeiros pontos da curva de calibração, equivalentes à pressão de ar de 0,15; 0,24; 0,38 e 0,63 bar, houve uma pequena divergência de linearidade em relação aos demais dados. Este fato se deve a válvula reguladora de pressão. Esta válvula possui faixa de operação entre 0,4 e 10 bars, o que dificulta manter um ajuste mais preciso para baixos valores de pressão. Se considerarmos o ajuste da curva de calibração apenas para os quatro primeiros pontos, obtemos a seguinte equação: $y = 74,641x - 4,315$ ($R^2 = 0,997$). A partir desta equação, para uma amostra com superfície relativa ao diâmetro de 0,07 m, pode-se verificar que aplicações de carregamentos iguais a 25 e 50 kPa apresentam erros muito pequenos ($\approx 3,0$ e $0,4$ kPa, respectivamente) em relação aos calculados conforme o modelo ajustado mostrado na Figura 4, indicando que a curva de calibração para a faixa de pressões de ar entre 0,15 e 7,9 bars foi adequada para os ensaios de compressão uniaxial.

Figura 4 - Curva de calibração relativa à pressão de ar medida no manômetro e a força aplicada na superfície da amostra em ensaios de compressão uniaxial. N = 90 para cada pressão manométrica

A variabilidade da densidade do solo inicial (D_{si}) nas amostras indeformadas utilizadas nos ensaios de compressão uniaxial apresentou similaridade entre as posições de amostragem, fato justificado pela magnitude do coeficiente de variação (Tabela 2). Entretanto, as médias da D_{si} foram diferentes ($p < 0,05$), evidenciando os contrastes de estrutura do solo entre as posições de amostragem. Por outro lado, embora a pressão de preconsolidação (σ_p) tenha sido maior ($p < 0,05$) para a entrelinha da cultura, os valores de densidade do solo final (D_{sf}) não diferiram entre as posições de amostragem ($p > 0,05$). Isto decorreu da proximidade espacial entre os pontos amostrais, sendo, neste caso, a estrutura do solo o fator determinante dos resultados obtidos. Desse modo, a partir do momento em que os carregamentos se tornaram maiores que a σ_p , isto é, maior que a capacidade de suporte de carga, a deformação adicional (plástica) do solo destruiu sua estrutura (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; SILVA; REINERT; REICHERT, 2000; DIAS JUNIOR et al., 2005). Assim, os valores de D_{sf} , obtidos sob máximo estresse (1600 kPa), foram similares entre as amostras

Tabela 2 - Resumo estatístico das propriedades físicas do solo⁽¹⁾ obtidas do ensaio de compressão uniaxial para cada posição de amostragem. (N = 8)

Índice estatístico	Dsi	Dsf	Def	θ	σ_p	IC
Linha da cultura						
Mínimo	0,83	1,49	9,58	0,25	33,45	0,59
Máximo	0,99	1,65	11,62	0,36	82,30	0,77
Desvio-padrão	0,051	0,063	0,581	0,033	16,684	0,062
Coeficiente de variação (%)	5,49	3,99	5,61	11,18	24,81	9,32
Média ⁽²⁾	0,93 B	1,57 A	10,36 A	0,30 A	67,25 B	0,66 A
Entrelinha da cultura						
Mínimo	1,02	1,51	6,35	0,25	108,37	0,41
Máximo	1,16	1,58	8,46	0,37	172,22	0,64
Desvio-padrão	0,056	0,024	0,826	0,036	20,103	0,081
Coeficiente de variação (%)	5,14	1,56	11,16	11,64	14,85	15,85
Média ⁽²⁾	1,09 A	1,54 A	7,41 B	0,31 A	135,39 A	0,51 B

(1): Dsi, densidade do solo inicial (Mg m^{-3}); Dsf, densidade do solo final (Mg m^{-3}); Def, deformação do solo (mm); θ , teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); σ_p , pressão de preconsolidação (kPa); IC, índice de compressão do solo.

(2): Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem entre si pelo teste *t* a 5 % de probabilidade.

independente da posição de amostragem. Ressalta-se que os valores do índice de compressão (IC), que expressa a susceptibilidade à compactação, e de deformação (Def) confirmaram a maior compressibilidade do solo para a linha da cultura. Isto se deveu, provavelmente, ao afrouxamento da estrutura das amostras pelas fraturas decorrentes da mobilização do solo na época do plantio, o que diminuiu sua compactação em relação à entrelinha da cultura (BAVER; GARDNER; GARDNER, 1972).

As curvas de compressão do solo (Figura 5-A) suavemente apresentaram forma tipo "S" para as diferentes posições de amostragem, o que indica desvios de linearidade em relação à linha de compressão virgem em altos valores de carregamentos no ensaio de compressão uniaxial (BAUMGARTL; KOCK, 2004). Desse modo, quando o estresse aplicado foi elevado o bastante para produzir essa forma de curva, suas derivadas ($-d\varepsilon/d\log\sigma$) apresentaram mudança abrupta, caracterizada por um decréscimo acentuado a partir do ponto de máximo valor na Figura 5-B, indicando mais claramente o momento inicial dos desvios de linearidade (TANG et al., 2009). Estes desvios induzem a erros nas estimativas das propriedades físicas relacionadas ao comportamento compressivo do solo e, portanto, os dados obtidos dessa parte da curva não foram utilizados.

Figura 5 - Modelo da curva de compactação (A), sua primeira derivada (B) e variação do grau de saturação (C) e da porosidade de aeração (D) em função da pressão aplicada (σ) em um solo argiloso sob plantio direto, correspondente à camada de 2,5-5,0 cm, nas posições linha e entrelinha da cultura. (N = 8)

Os fatores que afetam a forma da curva de compressão podem ser relacionados às mudanças na porosidade do solo. As Figuras 5-C e D respectivamente mostram a expulsão de ar e de água dos poros das amostras decorrentes da redução de seu volume em resposta aos estresses aplicados nos ensaios de compressão uniaxial. Segundo Tang et al. (2009), durante a compressão das amostras inicialmente há aumento de pressão de ar nos poros e, subsequente, de água. Dessa forma,

enquanto o decréscimo do volume de poros contendo ar foi dominante, a inclinação das curvas ($-d\varepsilon/d\log\sigma$) *versus* $\log\sigma$ (Figura 5-B) dependeram somente da estrutura do solo visto que o ar flui mais facilmente que a água. Por outro lado, quando a redução do volume de poros com água se tornou dominante, a inclinação dessas curvas passou a ser abruptamente menor que o caso anterior devido ser necessário maior estresse para balancear as forças capilares e ocorrer drenagem. Assim, devido a redução da porosidade promover decréscimos da permeabilidade do solo ao ar (HORN et al., 1995) e da condutividade hidráulica (DEXTER; CZYZ; GATE, 2004), o tempo necessário para a dissipação da pressão gerada nos poros foi maior e corroborou a obtenção de curvas de compressão com a forma tipo “S”.

As relações entre as variáveis obtidas da curva de compressão com outras propriedades físicas do solo (Figura 6) apresentaram distribuição normal dos dados, conforme indicado pelo teste de Shapiro-Wilk, além de todos os valores de R^2 serem altamente significativos ($p < 0,0001$). Observa-se que, quanto maior a D_{si} , menor a compressibilidade do solo (Figura 6-D), o que concorda com Horn (1988) visto que as amostras avaliadas possuem o mesmo teor de argila. Dessa forma, como esperado, os aumentos no grau de compactação corresponderam a reduções da deformação do solo e do IC (Figuras 6-A e D) bem como incrementos da σ_p (Figura 6-B). Vários autores também encontraram correlações negativas entre a D_{si} e o IC ou a deformação do solo (IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004; SUZUKI et al., 2008; SAFFIH-HDADI et al., 2009) e positivas com a σ_p (CANARACHE; HORN; COLIBAS, 2000; IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004; SAFFIH-HDADI et al., 2009).

Os ajustes dos coeficientes das regressões lineares para a σ_p e o IC apresentaram valores associados a D_{si} iguais a 357,14 e -1,03, respectivamente (Figuras 6-B e D), sendo concordantes com as faixas de valores obtidas em outros trabalhos: para a σ_p , as estimativas variaram de 114 a 508 (CANARACHE; HORN; COLIBAS, 2000; IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004; SAFFIH-HDADI et al., 2009) e, para o IC, de -0,12 a -1,59 (SALIRE; HAMMEL; HARDCASTLE, 1994; IMHOFF; SILVA; FALLOW, 2004; SAFFIH-HDADI et al., 2009). Resumidamente, as amplitudes das faixas de valores obtidas por estes autores se devem aos diferentes procedimentos

Figura 6 - Relação entre as variáveis obtidas da curva de compressão do solo para o conjunto de amostras ($N = 16$), sendo Dsi a densidade do solo inicial, σ_p a pressão de preconsolidação, IC o índice de compressão. Todos os valores de R^2 foram significativos ($p < 0,0001$)

utilizados para a compressão das amostras de solo. Ademais, as relações entre a deformação do solo e a σ_p e o IC (Figuras 6-C e E) apresentaram comportamentos distintos, ou seja, quanto maior sua compressibilidade, menor capacidade de suporte de carga e maior susceptibilidade à compactação lhe são conferidas, o que concorda com Suzuki et al. (2008). Os resultados experimentais obtidos neste trabalho evidenciam que o desempenho do consolidômetro foi satisfatório para ensaios de compressão uniaxial, uma vez que produziu resultados coerentes a literatura.

O potencial de utilização do equipamento de propulsão pneumática nas determinações da resistência do solo à penetração (RP) e da resistência tênsil de agregados (RT) também foi avaliado. Dessa forma, foi verificada a possibilidade de medições de um maior número de indicadores da qualidade físico-estrutural de solos em um único equipamento. Os resultados de RP em função da profundidade na amostra de solo são mostrados na Figura 7. Houve uma diferença de apenas 8,0 s no tempo total do ensaio entre as amostras. Isso provavelmente ocorreu devido à característica dos gases em mudar de volume quando comprimido, mas não comprometeu os resultados obtidos. Foram observadas medidas crescentes de RP para os primeiros centímetros, sendo que, em geral, houve tendência à estabilização a partir de 0,5 cm de profundidade, com notável ausência de valores discrepantes ao longo das medições. Isto significa que os dados obtidos apresentaram distribuição de valores típicos e condizentes com as argumentações de Bradford (1986) sobre o final do efeito da bordadura nos valores de RP, que comumente ocorre entre 0,5 e 1,0 cm da superfície da amostra de solo. Ademais, quando a densidade do solo (D_s) foi de $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ e o teor de água (θ) igual a $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o valor médio de RP correspondeu a 1,86 MPa, com coeficiente de variação (CV) de 3,63 %. Para a outra amostra ($D_s = 1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ e $\theta = 0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), o valor médio de RP foi de 4,46 MPa e o CV igual a 5,39 %. Aumentos de RP com o decréscimo do θ é um processo que ocorre devido ao incremento no estresse efetivo (SNYDER; MILLER, 1985), sendo intensificado positivamente pela D_s , que promove maior força de fricção entre as partículas e o aumento da coesão do solo (VEPRASKAS, 1984). Estes resultados evidenciam que a qualidade dos dados de RP obtidos utilizando propulsão pneumática foi satisfatória.

Figura 7 - Distribuição da resistência à penetração em duas amostras indeformadas do solo (5 cm de diâmetro e altura) de classe textural franco-arenosa. ($N \approx 230$)

Para os dados de RT, a diferença entre os valores da média e da mediana não foi acentuada (Tabela 3). Isto indica que provavelmente os dados foram distribuídos simetricamente em torno destas medidas de posição, fato confirmado pelo teste de Shapiro-Wilk. Por outro lado, os valores da amplitude ou do coeficiente de variação mostram que esta propriedade física apresenta variabilidade entre média e alta (WARRICK; NIELSEN, 1980). Isto justifica uma amostragem mais intensa, mas também requer uma metodologia analítica adequada para não somar-se à variabilidade espacial a influência da velocidade de compressão dos agregados de solo. A não interferência do usuário neste processo torna o equipamento proposto apropriado.

Tabela 3 - Resumo estatístico* da resistência tênsil de agregados para os solos analisados em duas máquinas de ensaio. ($N = 30$)

Solo	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Desvio-padrão	CV
Penetrômetro eletro-mecânico automatizado						
Coeso	28,10	83,36	59,60	60,74	13,529	22,27
Não coeso	4,40	60,19	25,10	26,84	16,974	63,25
Consolidômetro pneumático						
Coeso	34,55	84,93	60,96	60,17	14,611	24,28
Não coeso	5,54	63,39	22,20	25,95	15,858	61,11

*: Média, mínimo, máximo e desvio-padrão (kPa); CV, coeficiente de variação (%).

A análise de variância dos dados (Tabela 4) indicou que a RT não foi influenciada pelos tipos de máquinas de ensaio utilizadas ($F=0,07$; $p>0,796$). Em relação aos outros fatores em estudo, a interação (Solo*Máquina de ensaio) não foi significativa, apresentando o valor nulo do teste de Fischer e com $p>0,954$. Apenas o fator (Solo) foi altamente significativo ($F=148,74$; $p<0,0001$). Dessa forma, os valores médios de RT apresentaram comportamento similar àqueles obtidos por outros autores. Lima et al. (2005) e Almeida (2008) estudaram o mesmo solo coeso desta pesquisa e encontraram valores médios de RT iguais a 76,65 e 62,91 kPa, respectivamente. Ainda, Lima et al. (2005) encontrou para o solo não coeso estudado um valor médio de RT igual a 18,88 kPa. As diferenças entre os resultados obtidos pelos autores citados e os da presente pesquisa (Tabela 3) se devem principalmente à variabilidade dos pontos experimentais. Isto significa que, embora o ar ao ser comprimido seja altamente compressível e possa influir na velocidade de deslocamento do atuador linear do consolidômetro, a propulsão pneumática foi adequada para determinações de RT na condição de pressão de ar utilizada (8 bars).

Tabela 4 - Análise de variância e teste F dos dados de resistência tênsil de agregados obtidos para os dois solos analisados em máquinas de ensaio eletro-mecânica e pneumática

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio	F	P > F
Solo	1	34809,32	148,74	< 0,0001
Máquina de ensaio	1	15,77	0,07	0,7956
Solo*Máquina de ensaio	1	0,79	0,00	0,9538

Tendo em vista o custo relativamente mais baixo ($\approx$ R\$ 15.000,00) e que o potencial de utilização da propulsão pneumática para determinações da RP e da RT foi confirmado, sugere-se que em estudos futuros sejam avaliadas a aplicação de diferentes pressões de ar para a alimentação do sistema pneumático e sua influência na velocidade de deslocamento do atuador linear e nos resultados de RP e de RT. Dessa forma, caso a pressão de ar possa ser menor que a utilizada nesta pesquisa, a regulação da velocidade de deslocamento para os ensaios de RP e de RT será mais fácil. Além disso, a utilização de pressões menores que 8 bars tornará mais econômica as análises laboratoriais.

5.4 Conclusões

1 - O consolidômetro pneumático desenvolvido neste trabalho obteve desempenho satisfatório nos ensaios de compressão uniaxial e permitiu estimar a curva de compactação, o índice de compressão e a pressão de preconsolidação em amostras indeformadas de solo, possibilitando detectar com elevada acurácia os diferentes graus de consolidação bem como as distintas histórias de tensão da estrutura do solo em função da posição de amostragem;

2 - A resistência do solo à penetração e a resistência tênsil de agregados apresentaram valores coerentes com as recomendações da literatura, sendo possível determinar essas propriedades físicas utilizando unicamente o consolidômetro proposto;

3 - O custo relativamente mais baixo do consolidômetro proposto é um atrativo ao desenvolvimento de estudos mais detalhados sobre o potencial de utilização da propulsão pneumática nas determinações de resistência do solo à penetração e de resistência tênsil de agregados.

Referências

ALMEIDA, B.G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 2008. 103 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

BALL, B.C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 1141-1158.

BAUMGARTL, T.; KOCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 57-65, 2004.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil physics**. 4th ed. New York: John Wiley, 1972. 498 p.

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, n. 5, p. 787-794, 2006.

BHARATI, L.; LEE, K.H.; ISENHART, T.M.; SCHULTZ, R.C. Soil water infiltration under crops, pasture, and established riparian buffer in Midwest USA. **Agroforestry System**, New York, v. 56, p. 249-257, 2002.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 363-375.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 463-478.

CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 56, p. 185-196, 2000.

CASAGRANDE, A. Determination of the preconsolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: Harvard University, 1936. v. 3, p. 60-64.

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Parana, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 158-164, 2009.

CAVENAGE, A.; MORES, K.L.T.; ALVES, M.C.; CARVALHO, M.A.C.; FREITAS, M.L.M.; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 997-1003, 1999.

COREY, A.T. Air permeability. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 1121-1136.

CULLEY, J.L.B.; LARSON, W.E. Susceptibility to compression of a clay loam Haplaquoll. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 3, p. 562-567, 1987.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth: Part 1. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 31, p. 139-147, 1985.

DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A.; GATE, O.P. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 185-189, 2004.

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 175-182, 1996.

DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAUJO JUNIOR, C.F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to Eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, 2005.

DORAN, J.W.; JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: SSSA, 1996. 410 p. (SSSA. Special Publication, 49).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Brasília: Sistema de Produção de Informação, 2006. 306 p.

FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a Molic Ochraqualf in Northwest. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, p. 21-35, 1998.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v. 6, p. 65-100, 1987.

HARTE, K.K. The effect of soil deformation on physical soil properties: A discourse on the common background. **Advances GeoEcology**, Reiskirchen, v. 32, p. 22-31, 2000.

HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H.; SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 34, n. 4, p. 535-546, 1988.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, Amsterdam, suppl. 11, p. 53-71, 1988.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 89-99, 2003.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 23-36, 1995.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strenght and friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.1656-1661, 2002.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 17-24, 2004.

KIRKEGAARD, J.A.; MUNNS, R.; JAMES, R.A.; GARDNER, P.A.; ANGUS, J.F. Reduced growth and yield of wheat with conservation cropping II: Soil biological factors limit growth under direct drilling. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 46, p. 75-88, 1995.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: _____. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 635-662.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 211-218, 1999.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 275-286, 1991.

LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; ROMERO, R.E.; JACOMINE, P.T.K. Comportamento físico de um Argissolo Acinzentado Coeso no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 33-40, 2005.

MATHSOFT. **Mathcad professional reference manual**. Cambridge, 2000. 180 p.

McBRIDE, R.A.; JOOSSE, P.J. Overconsolidation in agricultural soils: II. Pedotransfer functions for estimating preconsolidation stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 2, p. 373-380, 1996.

MOLDRUP, P.; OLESEN, T.; KOMATSU, T.; SCHJONNING, P.; ROLSTON, D.E. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 613-623, 2001.

MOSADDEGHI, M.R.; HEMMATB, A.; HAJABBASIA, M.A.; ALEXANDROUC, A. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 70, p. 53-64, 2003.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; RESCK, D.V.S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 773-781, 2003.

ROSEBERG, R.J.; McCOY, E.L. Tillage- and traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: air permeability assessment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 1261-1267, 1992.

SAFFIH-HDADI, K.; DÉFOSSEZ, P.; RICHARD, G.; CUI, Y.J.; TANG, A.M.; CHAPLAIN, V. A method to predict the soil susceptibility to compaction of surface layers as function of water content and bulk density. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 96-103, 2009.

SALIRE, E.V.; HAMMEL, J.E.; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, p. 235-248, 1994.

SÁNCHEZ-GIRÓN, ANDREU, V.E.; HERNANZ, J.L. Stress relaxation of five different soil samples when uniaxially compacted at different water contents. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 62, p. 85-99, 2001.

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 253-260, 2001.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 239-249, 2000.

SNYDER, V.A.; MILLER, R.D. Tensile strength of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 1, p. 58-65, 1985.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 963-973, 2008.

TANG, A.; CUI, Y.; ESLAMI, J.; DÉFOSSEZ, P. Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 148, p. 282-290, 2009.

TAYLOR, D.W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley, 1948. 700 p.

TEIXEIRA, M.A.; MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O.A. Equipamento para extração de amostras indeformadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 693-699, 2000.

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.

US DEPARTMENT OF THE ARMY. **Laboratory soils testing**. Washington: Army Corps of Engineers, 1970. 406 p. (Engineer Manual, EM 1110-2-1906).

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 6, p. 1220-1225, 1984.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 4, p. 242-246, 1966.

ZHANG, S.; GRIP, H.; LOVDAHL, L. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 90, p. 117-125, 2006.

6 PERMEABILIDADE DO SOLO AO AR: AVANÇOS METODOLÓGICOS E MELHORIAS INSTRUMENTAIS DE UM PERMEÂMETRO

Resumo

A permeabilidade do solo ao ar (k_a) é definida como a sua capacidade de transmissão de gases em resposta a um gradiente de pressão. O movimento de gases é bastante sensível às mudanças ocorridas no espaço poroso e, portanto, a k_a constitui uma importante indicadora da qualidade estrutural do solo. O objetivo deste trabalho foi construir um permeâmetro de carga constante de ar para determinações da k_a tanto no campo quanto em laboratório e com alta portabilidade. O desempenho do permeâmetro proposto foi avaliado determinando-se a k_a , *in situ* e *ex situ* (em laboratório), em pontos de amostragem na linha e entrelinha da cultura da aveia-preta em um solo de classe textural argilo-arenosa. Adicionalmente, foram determinados o teor de água (θ), a densidade do solo (D_s), a porosidade de aeração (α) e a continuidade de poros, expressa pelo parâmetro N determinado a partir da relação entre a k_a e a α . O maior grau de compactação do solo foi detectado em amostras da entrelinha da cultura, conforme indicado pelos maiores valores médios da D_s e do θ e menores da α e da k_a ($p < 0,05$). Os valores do parâmetro N não apresentaram diferenças ($p > 0,05$) para medidas de k_a *in situ* e *ex situ*. Os resultados demonstram que o permeâmetro proposto permite avaliar com rapidez as mudanças na funcionalidade do sistema poroso do solo em função da posição de amostragem a partir de medições da k_a no campo (*in situ*) ou em amostras extraídas do solo.

Palavras-chave: Aeração; Fluxo convectivo de gases; Qualidade do solo

Abstract

The soil permeability to air (k_a) is defined as the capacity of soil to transmit gas in response to a pressure gradient. The movement of gases is very sensitive to changes in the soil pore space and, therefore, the k_a is an important indicator of soil structural quality. The objective of this study was to propose and build a highly portable constant head air permeameter for determinations of k_a in both field and laboratory conditions. The performance of the proposed permeameter was evaluated by determining the k_a , *in situ* and *ex situ* (in laboratory), in sampling points corresponding to the row and inter-row of oats on a sandy clay soil. Additionally, soil water content (θ), bulk density (B_d), air-filled porosity (α) and the continuity of pores, expressed by the parameter N determined from the relationship between k_a and α , were also determined. The highest degree of soil compaction was detected in samples from the inter-row position, as indicated by higher average values of B_d and θ and smaller average values of α and k_a ($p < 0.05$). The values of the parameter N did not differ ($p > 0.05$) for measurements of k_a *in situ* and *ex situ*. The results show that the proposed permeameter allows expedite evaluation of changes in the functionality of the soil pore system related to sampling position from measurements of k_a in the field (*in situ*) or on samples collected from the soil.

Keywords: Aeration; Convective gas flux; Soil quality

6.1 Introdução

A permeabilidade do solo ao ar (k_a) é definida como a capacidade de transmissão de gases através de poros interconectados em resposta a um gradiente de pressão (KIRKHAM, 1946). Além da importância agrônômica, vários autores têm considerado a k_a como um importante parâmetro na remediação de solos contaminados mediante sua utilização em modelos que estimam a capacidade de extração de vapor de compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis presentes no meio poroso (POULSEN et al., 1998; FAHRAN; HOLSEN; BUDIMAN, 2001). As medições de k_a , realizadas em equilíbrio hidráulico com um determinado potencial mátrico, podem fornecer informações mais rápidas sobre a condutividade hidráulica saturada do solo (ALJIBURY; EVANS, 1965; LOLL et al., 1999; IVERSEN et al., 2001a; CHIEF; FERRÉ; NIJSSEN, 2008), a geometria do espaço poroso (BALL, 1981; BLACKWELL et al., 1990; GRANOVSKY; McCOY, 1997; BALL; SCHJØNNING, 2002) e sobre a heterogeneidade e o grau de estrutura do solo (REEVE, 1953; MOLDRUP et al., 2001).

O movimento de gases no solo é bastante sensível às mudanças ocorridas no espaço poroso (ROSEBERG; McCOY, 1990) de modo que a k_a é uma importante indicadora da qualidade estrutural do solo em resposta ao sistemas de uso e manejo e às propriedades intrínsecas das diferentes classes de solo (ROSEBERG; McCOY, 1992; MOLDRUP et al., 2001; CAVALIERI et al., 2009). Dessa forma, para quantificá-la, são utilizados equipamentos denominados de permeâmetros. Estes equipamentos promovem a movimentação de ar através de uma coluna de solo, gerando um gradiente de pressão em relação à atmosfera. As condições experimentais relacionadas ao fluxo de ar na coluna de solo podem ser sob equilíbrio dinâmico ou não, sendo preferível a primeira situação (BALL; SCHJØNNING, 2002). Vários equipamentos têm sido propostos e possibilitam medições da k_a *in situ* e/ou *ex situ* (KIRKHAM, 1946; IVERSEN et al., 2001b; CHIEF; FERRÉ; NIJSSEN, 2006).

Dentre os tipos de permeâmetro encontrados na literatura, aquele proposto por Chief, Ferré e Nijssen (2006) se assemelha ao desenvolvido neste trabalho. Dessa forma, objetivou-se construir um permeâmetro de carga constante de ar com alta

portabilidade e útil para determinações da k_a , tanto no campo quanto em laboratório, a partir da implementação de instrumentos dedicados à eliminação de oscilações durante as medições do gradiente de pressão bem como a otimização da seleção de diferentes níveis de vazão mássica de ar, visando tornar mais simples a sua operação.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Equipamento para medição da permeabilidade do solo ao ar

O permeâmetro proposto foi desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba - SP. O seu princípio de funcionamento consiste na utilização de uma amostra de solo, confinada lateralmente em um anel volumétrico e com livre fluxo de gases em suas extremidades, a qual é submetida a incrementos sucessivos e constantes de taxas de fluxo de ar para gerar distintos gradientes de pressão, semelhante aos equipamentos desenvolvidos por Ball, Harris e Burford (1981) e Chief, Ferré e Nijssen (2006). Para tanto, foi desenvolvido um equipamento que consiste no aprimoramento instrumental do sistema de controle do fluxo de ar que atravessa uma coluna de solo, sendo composto basicamente por uma válvula eletro-pneumática com um sistema de controle eletrônico externo ajustável e um estabilizador das condições ambientais de pressão e de fluxo de ar. O equipamento foi idealizado para ter alta portabilidade (Figura 1), sendo os seus principais componentes sumarizados na Figura 2 e descritos a seguir:

- a) Um reservatório de ar comprimido cuja finalidade é fornecer gás sob pressão maior que a atmosférica ao sistema pneumático do permeâmetro (Figura 1-A,a);
- b) Um controlador de vazão mássica de gases com medidor eletrônico do processo (Aalborg®, modelo GFC17). Este componente mantém uma vazão de ar constante e pré-definida entre 0 e 20 mL min⁻¹ que atravessa uma determinada coluna de solo (Figura 1-A,b);

Figura 1 - Permeômetro de carga constante de ar: (A) maleta de 60 x 20 x 12 cm de comprimento, largura e altura, respectivamente, (A,a) reservatório de ar comprimido, (A,b) controlador e medidor de vazão mássica de ar, (A,c) manômetro eletrônico, (A,d) cabo de recepção de energia elétrica (110-240V), (A,e) e (E) conjunto composto por adaptador, amostra de solo e assento, (A,f) e (B) bomba de ar manual, (C,a) regulador e seletor eletrônico de níveis de vazão mássica de ar, (C,b) atenuador de distúrbios atmosféricos, (C,c) inversor de tensão elétrica de 12 VCC para 110 VCA, (C,d) bateria de 12 V, (D,a) adaptador com anéis de vedação tipo O'ring, (D,b) assento para a amostra de solo, (D,c) anel volumétrico, (D,d) conexão tipo engate-rápido, (D,e) linha de pressão, (E,a) válvula de descarga

Figura 2 - Esquema de montagem dos componentes elétricos e pneumáticos do permeômetro de carga constante de ar

- c) Um regulador e seletor eletrônico de níveis de vazão mássica de ar. Este componente consiste de uma fonte de tensão elétrica estabilizada com quatro saídas ajustáveis de 0-5 VCC (corrente contínua), selecionadas por uma chave giratória, e uma saída de 12 VCC utilizadas para o fornecimento do sinal de comando e alimentação elétrica do controlador de vazão mássica de ar, respectivamente (Figura 1-C,a);
- d) Um manômetro eletrônico digital para quantificação do gradiente de pressão de ar entre a coluna de solo e a atmosfera, com resolução de 0,01 Pa e escala entre -200 e 2000 Pa (Figura 1-A,c);
- e) Um atenuador de distúrbios atmosféricos causados pelo vento (Vectus[®], modelo 9026.2090). Este componente garante maior precisão das medições do gradiente de pressão de ar (Figura 1-C,b);
- f) Um inversor de tensão elétrica de 12 VCC para 110-240 VCA (tensão em corrente alternada) para permitir seu funcionamento com bateria de 12 V. Pode-se desativá-lo quando opcionalmente for utilizada a rede de energia elétrica (Figura 1-C,c);
- g) Adaptador para acoplamento do sistema de injeção de ar à parte superior da amostra de solo confinada em um anel volumétrico. Duas vedações de borracha (tipo O'ring) são utilizadas para eliminar vazamentos de ar entre a parede externa do anel volumétrico e o adaptador (Figura 1-D,a). Os adaptadores disponíveis servem para anéis com diâmetros de 5,0 ou 7,5 cm;
- h) Uma válvula de descarga de 2 vias (Figura 1-E,a) que permite eliminar o excesso de pressão gerado no sistema de injeção de ar durante o acoplamento do adaptador (item anterior) ao anel volumétrico contendo a amostra de solo. Esta válvula deve ficar aberta à atmosfera apenas durante este procedimento, sendo importante para evitar danos ao manômetro.

6.2.2 Determinação da permeabilidade do solo ao ar com o permeâmetro proposto

O estudo foi desenvolvido em um solo classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2006) de classe textural argilo-arenosa (476, 44 e 480 g kg⁻¹ de argila, silte

e areia, respectivamente), localizado na Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa - PR e sob sistema de plantio direto há mais de 16 anos, com rotação das culturas soja, milho, feijão, trigo, aveia-preta, ervilhaca e tremoço. As dimensões da área experimental foram de 50 x 10 m. As medições de k_a foram realizadas na parte central dessa área, sendo utilizada uma linha e uma entrelinha da cultura de aveia-preta. Para cada posição de amostragem, foram realizadas dez medições de k_a *in situ* mediante a introdução individual de anéis volumétricos (5 cm de diâmetro e altura) na camada superficial de 0-5 cm, sendo utilizando o amostrador elétrico descrito no capítulo 3. Dessa forma, na medida em que cada anel foi introduzido no solo, colocou-se em sua parte superior um adaptador (Figura 1-D,a) para acoplar o sistema de injeção de ar do permeâmetro à superfície superior da amostra. Para tanto, foi necessário retirar cerca de 0,5 cm de solo ao redor ao anel volumétrico a partir da superfície, limpando-se suas paredes externas a fim de facilitar a introdução desse adaptador bem como garantir sua perfeita vedação. Imediatamente após cada medição, foi coletada a amostra indeformada de solo, a qual foi revestida com filme de PVC para evitar perdas de água. No laboratório, à medida que esse filme foi retirado, as amostras foram imediatamente submetidas à determinação da k_a . Em seguida, estas foram secas em estufa a 105 °C por 24 h para a determinação da densidade do solo (D_s), conforme Blake e Hartge (1986). O teor de água (θ) foi determinado pela razão entre as massas de água e de solo seco. A porosidade total e a porosidade de aeração foram obtidas pelas eqs. (1) e (2), respectivamente:

$$PT = 1 - \frac{D_{si}}{D_p}, \quad (1)$$

$$\alpha = PT - \theta, \quad (2)$$

sendo, (PT) a porosidade total do solo [L^3/L^3], (D_p) a densidade de partículas do solo, utilizado um valor médio de 2,6 Mg m⁻³, e (α) a porosidade de aeração do solo [L^3/L^3], estimada considerando a densidade da água igual a 1,0 Mg m⁻³.

A densidade de partículas do solo foi determinada utilizando-se um picnômetro a gás (Hélio), modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation®). Para tanto, nesse equipamento foram processados aproximadamente 8 g de terra fina seca

em estufa de uma amostra composta obtida da quantidade total de solo coletado, com três replicatas.

A partir da Lei de Darcy, a densidade de fluxo de ar (q) pode ser descrita como:

$$q = -\frac{k_a}{\eta} \left(\frac{dP}{dz} + \rho g \right), \quad (3)$$

sendo, (q) [L/T], k_a [L^2], (P) a pressão de ar [M/LT^2], (z) a distância [L] na direção do movimento de ar no sistema poroso, (η) a viscosidade do ar [M/LT], (ρ) a densidade do ar [M/L^3] e (g) a aceleração da gravidade [L/T^2].

A densidade de fluxo corresponde à vazão de ar (Q) [L^3/T] por área perpendicular ao movimento do fluido (A_s) [L^2] e, considerando como desprezível a influência da densidade do ar (SPRINGER et al., 1995), a eq. (4) foi utilizada para as estimativas da k_a obtidas em laboratório (*ex situ*):

$$k_a = \frac{Q\eta}{A_s} \left(\frac{dz}{dP} \right), \quad (4)$$

Por outro lado, as medições de k_a sob condições de contorno experimentais em campo (*in situ*) diferem daquelas *ex situ*. Dessa forma, para estimativas de k_a *in situ*, é necessário utilizar um fator de ajuste (A) como substituto do termo A_s/dz na eq. (4). Este fator corrige as estimativas de k_a visto que o ar aplicado pelo permeâmetro, ao sair na extremidade inferior da amostra contida no anel volumétrico, também deve fluir através do solo não confinado até atingir a atmosfera. Assim, as medidas de k_a *in situ* foram obtidas pela eq. (5):

$$k_a = \frac{Q\eta}{A} \frac{dP}{dz} \quad (5)$$

Para estimar o fator de ajuste (A) [L], foi utilizado o modelo proposto por Jalbert e Dane (2003), descrito pela eq. (6):

$$A = D \left(\frac{\pi}{4} + \frac{D}{H} \right) \left(1 + \frac{D}{H} \right)^{-1} \ln \left(1 + \frac{D}{H} \right), \quad (6)$$

sendo, (D) e (H) o diâmetro e a altura da amostra de solo, respectivamente [L].

A continuidade de poros do solo foi avaliada pela relação entre as propriedades físicas k_a e α , sendo utilizada a equação de Kozeny-Carman, conforme Ball, Sullivan e Hunter (1988):

$$k_a = M(\alpha)^N \quad (7)$$

sendo, M e N os coeficientes de ajuste do modelo.

Os valores do parâmetro N, utilizado como um índice de continuidade de poros (BALL; SULLIVAN; HUNTER, 1988; ROSEBERG; McCOY, 1990), foram estimados mediante a linearização da equação de Kozeny-Carman:

$$\log(k_a) = \log(M) + N \log(\alpha) \quad (8)$$

Os dados de D_s , θ , α e k_a foram submetidos à análise de variância, sendo as médias entre as posições de amostragem comparadas pelo teste t ($p < 0,05$). O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado para verificar se os dados experimentais foram extraídos de uma população com distribuição normal. Para as medidas de k_a *in situ* e *ex situ*, os valores do parâmetro N foram comparados pelo teste t ($p < 0,05$).

6.3 Resultados e Discussão

Aspectos construtivos do permeâmetro proposto

O permeâmetro proposto apresentou alta portabilidade devido ser construído e acondicionado no interior de uma maleta com dimensões reduzidas. Isso refletiu em vantagens tanto para seu transporte por longas distâncias quanto para sua locomoção em trabalhos no campo. A utilização do atenuador de distúrbios atmosféricos causados pelo vento (Figura 1-C,b) estabilizou mais rapidamente as medições do gradiente de pressão durante as determinações da permeabilidade do solo ao ar (k_a), permitindo maior rendimento dos trabalhos realizados, principalmente no campo. O inversor de tensão elétrica de 12 VCC para 110-240 VCA (Figura 1-C,c) também permitiu que o permeâmetro opcionalmente funcionasse a partir de uma bateria de 12V x 7 Ah (Ampères-hora), com capacidade operacional de aproximadamente 4 h. Uma bomba de ar com acionamento manual (Figura 1-B) facilitou a obtenção de gás sob pressão maior que a atmosférica num reservatório de ar de tamanho reduzido (Figura 1-A,a), corroborando uma maior portabilidade do permeâmetro. Além disso, o ajuste dos níveis pré-estabelecidos de vazão mássica de ar, obtido a partir do regulador e seletor eletrônico (Figura 1-C,a), foi rápido e altamente preciso. Considerando estes aspectos,

pode-se afirmar que a instrumentação do permeâmetro proposto é simples, robusta e de fácil operação.

Experimento para validação do permeâmetro proposto

Os índices estatísticos referentes às propriedades físicas avaliadas revelaram diferentes condições estruturais do solo entre as posições de amostragem (Tabela 1). De modo geral, os valores do coeficiente de variação permitem classificar as variabilidades do teor de água no solo (θ) e da densidade do solo (D_s) como baixa enquanto que a porosidade de aeração (α) e a k_a , como média e alta, respectivamente, concordando com Warrick e Nielsen (1980), Ball e Schjønning (2002) e Cavalieri et al. (2009). É notável a proximidade entre os valores mínimos da D_s e do θ na entrelinha da cultura com seus respectivos valores máximos na linha de plantio. Por outro lado, a α e a k_a apresentaram valores mínimo e máximo mais elevados para a linha de plantio. Considerando que as condições de drenagem e a evapotranspiração foram similares entre os pontos experimentais, pode-se inferir que as propriedades físicas diferiram entre as posições de amostragem devido ao efeito do tráfego de máquinas na área avaliada, da abertura dos sulcos de plantio para a semeadura da cultura da aveia-preta, dos efeitos residuais das linhas e entrelinhas das culturas anteriores, resultando em distintos graus de compactação do solo.

A compactação altera a estrutura original do solo devido ao rearranjo dos agregados na matriz e à expulsão de ar (HAKANSSON; VOORHEES, 1998), com redução de seu espaço poroso total devido à transformação de poros de maiores diâmetros em menores (DEXTER, 2004; ZHANG; GRIP; LOVDAHL, 2006). Isto ocasiona incrementos da D_s (HILL, 1990; HAKANSSON; VOORHEES, 1998) e altera a morfologia e a continuidade de poros (ROSEBERG; MCCOY, 1992; MOLDRUP et al., 2001). Entretanto, na linha de plantio, a utilização de máquinas para semeadura promoveu fraturas no solo e, conseqüentemente, gerou uma estrutura menos densa, diminuindo sua compactação em relação à entrelinha da cultura (BAVER; GARDNER; GARDNER, 1972).

A diferença entre o valor médio e mediano das propriedades do solo avaliadas foi

Tabela 1 - Resumo estatístico das propriedades físicas do solo⁽¹⁾ na camada de 0-5 cm para duas posições de amostragem. (N = 10)

Índice estatístico	Ds	θ	α	k_a	
				<i>in situ</i>	<i>ex situ</i>
Linha da cultura					
Mínimo	0,90	0,29	0,26	6,83	13,25
Máximo	1,06	0,33	0,36	65,75	70,15
Desvio-padrão	0,055	0,02	0,035	18,920	22,891
Coeficiente de variação (%)	5,68	5,17	10,75	58,49	50,77
Mediana	0,97	0,30	0,34	38,14	51,44
Média ⁽²⁾	0,97 B	0,30 B	0,33 A	32,35 A	45,09 A
Entrelinha da cultura					
Mínimo	1,04	0,35	0,14	0,12	0,89
Máximo	1,28	0,40	0,23	6,43	10,43
Desvio-padrão	0,076	0,01	0,032	2,142	3,171
Coeficiente de variação (%)	6,69	3,80	16,42	108,15	101,65
Mediana	1,15	0,37	0,20	1,25	1,94
Média ⁽²⁾	1,14 A	0,37 A	0,19 B	1,98 B	3,12 B

(1): Ds, densidade do solo (Mg m^{-3}); θ , teor de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); α , porosidade de aeração do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); k_a , permeabilidade do solo ao ar (μm^2). *In situ* e *ex situ* correspondem às estimativas de k_a obtidas a partir de medidas realizadas no campo e sob condições laboratoriais, respectivamente.

(2): Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem entre si a 5 % de probabilidade pelo teste *t*. O teste de médias para a k_a foi realizado mediante transformação logarítmica dos dados.

pouco expressiva, exceto para a k_a (Tabela 1). Estes resultados indicam que nem todas as observações experimentais foram distribuídas simetricamente em torno destas medidas de posição, o que provavelmente requer prévia transformação dos dados para que os resultados obtidos possam ser analisados e interpretados corretamente (MESQUITA; MORAES; CORRENTE, 2002). Para tanto, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk para verificar se os dados obtidos foram extraídos de uma população com distribuição normal, sendo confirmada a necessidade de realizar transformação logarítmica dos valores de k_a visando estabilizar suas variâncias para adequação aos testes estatísticos paramétricos (McINTYRE; TANNER, 1959; LOGSDON; JAYNES, 1996; MESQUITA, MORAES; CORRENTE, 2002).

Os resultados do teste de médias confirmam que o solo na entrelinha da cultura possui maior grau de compactação, ratificado pelos maiores valores médios da Ds e menores da α e da k_a em relação à linha de plantio (Tabela 1). Nesta mesma posição

de amostragem, constata-se valores mínimos de $k_a < 1 \mu\text{m}^2$, considerado como característico de baixíssima permeabilidade (BALL; SCHJØNNING, 2002). Os valores calculados da estatística t para as propriedades físicas avaliadas foram: D_s (5,79), θ (9,66), α (-8,68), k_a *in situ* (-7,14) e k_a *ex situ* (-8,73). Em termos absolutos, nota-se que o valor t associado à k_a tem magnitude similar aos do θ e da α , principalmente para a k_a *ex situ* devido ao maior controle das condições experimentais obtidas em laboratório, concordando com van Groenewoud (1968). Isto significa que a k_a refletiu sensivelmente os efeitos do manejo nas diferentes posições de amostragem e indica que a avaliação da qualidade física do solo pode ser realizada com elevada acurácia utilizando o permeâmetro proposto para medidas de k_a tanto *in situ* quanto *ex situ*.

Para avaliar o grau de associação entre a k_a e as demais propriedades físicas do solo, foram realizados estudos de correlação, cujos resultados são mostrados na Tabela 2. Observa-se que a k_a foi significativamente correlacionada com a D_s , θ e α , apresentando relação inversamente proporcional apenas com a D_s e o θ . Esses resultados estão de acordo com aqueles obtidos em outros trabalhos (MOLDRUP et al., 2003; TYNER et al., 2005). As propriedades físicas que descrevem o estado da porosidade do solo se correlacionaram com a k_a na seguinte ordem: $D_s < \alpha \approx \theta$. Este fato decorre de que os fluidos ar e água do solo ocupam simultaneamente diferentes porções do sistema poroso, o que influencia a magnitude do movimento de gases. Dessa forma, durante as medições da k_a , o solo não estava completamente seco e ocasionou restrições ao movimento de ar nos poros preenchidos com líquido (BALL; SCHJØNNING, 2002), sendo os poros livres de água, expressos pela α , o caminho preferencial dos gases.

Tabela 2 - Coeficientes de correlação de Pearson⁽¹⁾ entre a permeabilidade do solo ao ar e as demais propriedades físicas do solo avaliadas⁽²⁾, considerando as medições realizadas no campo (*in situ*) e em laboratório (*ex situ*). (N = 20)

Condição experimental	D_s	α	θ
<i>In situ</i>	-0,72	0,82	-0,85
<i>Ex situ</i>	-0,78	0,87	-0,89

(1): significativo a $< 0,1$ % de probabilidade pelo teste t .

(2): D_s , densidade do solo; θ , teor de água no solo (base volumétrica); α , porosidade de aeração do solo.

Ball e Schjønning (2002) descrevem uma metodologia para determinação da k_a , na qual sugerem a aplicação de vazões mássicas de ar entre 1,2 e 12 mL min⁻¹ em solos com permeabilidade baixa e alta, respectivamente, para preservar as condições de fluxo laminar de ar em amostras de solo com diâmetros de 7,3 ou 15 cm. Dessa forma, os autores afirmam que um erro $\leq 10\%$ para a diferença de valor entre pelo menos duas medidas de k_a , obtida com a aplicação de diferentes vazões mássicas de ar em uma determinada amostra, é considerado satisfatório. Nesta pesquisa, as vazões mássicas de ar utilizadas tiveram valores entre 4 e 8 mL min⁻¹, sendo necessário utilizar escalas menores quando a permeabilidade do solo foi relativamente mais baixa, a fim de não gerar elevados gradientes de pressão de ar. Isso foi importante para garantir as condições de fluxo laminar de ar e evitar danos ao manômetro eletrônico utilizado. Portanto, considerando a aplicação de vazão mássica de ar sob distintas escalas, a diferença entre os valores de k_a foi $\leq 8,6\%$, indicando que não houve fluxo turbulento de ar durante as medições realizadas em laboratório ou no campo e, portanto, as eqs. (4) e (5) foram corretamente aplicadas.

Em relação à eq. (5), Ball e Schjønning (2002) sugerem a utilização do fator de ajuste para a correção da estimativa da k_a *in situ* desenvolvido por Liang, Bowers e Bowen (1995). Entretanto, este fator difere daquele proposto por Jalbert e Dane (2003), utilizado nesta pesquisa e descrito pela eq. (6). Apesar disto, os valores de k_a estimados *in situ* foram considerados adequados por serem mais próximos daqueles obtidos em laboratório (Tabela 1), o que concorda com Chief, Ferré e Nijssen (2006). Estes autores avaliaram os modelos desenvolvidos por Liang, Bowers e Bowen (1995) e por Jalbert e Dane (2003) para estimativas do fator de ajuste da magnitude da k_a medida *in situ*, sendo sugerida a utilização do modelo proposto por Jalbert e Dane (2003) principalmente quando a razão entre o diâmetro e a altura do anel volumétrico é mais próxima de zero, fato também constatado na presente pesquisa. A relação entre as estimativas da k_a *in situ* e *ex situ* apresentou comportamento similar (Figura 2), sendo que subestimativas das medições *in situ* também foram constatadas por Chief, Ferré e Nijssen (2006). Estes resultados provavelmente seriam mais concordantes entre si caso as determinações da k_a fossem realizadas no campo considerando amostras pareadas (medidas sucessivas).

Figura 2 - Relação entre a permeabilidade do solo ao ar medida *in situ*, utilizando o fator de ajuste proposto por Jalbert e Dane (2003), e sob condições laboratoriais (*ex situ*)

Entre os potenciais de aplicação das medidas de k_a está a possibilidade de estimar a continuidade do sistema poroso. A Figura 3 mostra a relação entre k_a e α , da qual foi obtido o parâmetro N , que representa o coeficiente angular da equação de Kozeny-Carman (ROSEBERG; McCOY, 1992). Considerando as medidas de k_a *ex situ*, o ajuste dos dados a essa equação apresentou maior valor do R^2 (Tabela 3), provavelmente devido ao maior controle das condições experimentais. Os valores de N obtidos *in situ* e *ex situ* não apresentaram diferença entre si pelo teste t ($p > 0,05$), confirmando a viabilidade do permeâmetro proposto para medidas de k_a sob distintas situações.

Sugestões para melhoramentos do permeâmetro proposto

Pequenas mudanças na magnitude da temperatura do ar influenciam a acurácia das medições de k_a devido à geração de erros sistemáticos (SMITH; ROBIN; ELRICK, 1997; 1998). Alternativamente, esses erros podem ser reduzidos mediante o revestimento do reservatório de ar com material isolante térmico (SMITH; ROBIN; ELRICK, 1998) ou pela inclusão da temperatura do ar na estimativa de sua viscosidade

Figura 3 - Relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar (k_a), medida *in situ* e *ex situ*, e a porosidade de aeração (α) para o solo analisado. Cada ponto representa uma medida de k_a . (N = 20)

Tabela 3 - Parâmetros da regressão* dos valores da permeabilidade do solo ao ar (k_a) *versus* a porosidade de aeração (α), obtidos pela equação $\log(k_a) = \log(M) + N \log(\alpha)$, considerando medidas de k_a *in situ* e *ex situ*. (N = 20)

Condição experimental	$\log(M)$	N	R^2
<i>In situ</i>	3,77***	5,02***	0,68***
<i>Ex situ</i>	3,83***	4,75***	0,78***

*: asteriscos representam $p < 0,0001$ para parâmetros (teste *t*) e R^2 (teste F).

(SMITH; ROBIN; ELRICK, 1997). Atualmente, devido à facilidade de aquisição de medidores de temperatura com elevada acurácia, um possível melhoramento no permeâmetro proposto consiste em associar ao reservatório de ar (Figura 1-A,a) um indicador da temperatura em seu interior. Além disso, seu revestimento com material isolante térmico, como tecidos de fibra de vidro, pode ser bastante útil principalmente para medições de k_a realizadas no campo.

O movimento de gases através do sistema poroso do solo também é sensível a outras variáveis, como a umidade relativa do ar (BALL; SCHJØNNING, 2002). Dessa forma, o permeâmetro proposto poderá incluir uma câmara de desumidificação, conforme sugerido por Chief, Ferré e Nissen (2006). Isso pode ser facilmente obtido

pela utilização de compostos dessecantes, como a sílica gel, acondicionados em um recipiente cujas aberturas, contidas em suas extremidades, permitem interligar o reservatório de ar ao controlador/medidor de vazão mássica de ar. A utilização de uma câmara de desumidificação promove a redução de erros sistemáticos nas medições de k_a devido à menor influência do vapor de água atmosférico sobre a viscosidade do ar (BALL; SCHJØNNING, 2002).

As medições de k_a realizadas no campo exigiram a retirada do solo ao redor do anel volumétrico para permitir acoplá-lo ao adaptador do sistema de injeção de ar (Figura 1-D,a). Entretanto, tal procedimento modifica as condições de contorno experimentais originais, podendo gerar valores de k_a menos representativos. Portanto, em estudos futuros, sugere-se que uma parte do anel volumétrico fique externa ao solo o suficiente para permitir o acoplamento do adaptador do sistema de injeção de ar sem a necessidade da prévia retirada do solo ao redor do anel volumétrico. Isso pode ser facilmente obtido utilizando-se um aparato que limite a profundidade de amostragem, deixando uma determinada parte do anel volumétrico fora do solo para o acoplamento do sistema de injeção de ar. Para tanto, a utilização do amostrador elétrico, descrito no capítulo 3, permite uma introdução lenta e controlada do anel volumétrico no solo, podendo ser uma ferramenta bastante útil.

6.4 Conclusões

1 - O permeâmetro proposto foi adequado para determinações da permeabilidade do solo ao ar tanto no campo quanto em laboratório, além de ser altamente portátil;

2 - Os diferentes graus de compactação do solo entre as posições de amostragem foram sensivelmente detectados pelas propriedades físicas medidas, em especial pela permeabilidade do solo ao ar. O permeâmetro proposto pode ser utilizado para avaliar com rapidez e elevada acurácia as diferenças ou mudanças na funcionalidade do sistema poroso do solo;

3 - A operação do conjunto instrumental do permeâmetro proposto foi fácil e simples, sendo necessário realizar poucos ajustes para seu funcionamento.

Referências

BALL, B.C. Modeling of soil pores as tubes using gas permeabilities, gas diffusivities, and water release. **Journal of Soil Science**, London, 32:465-481, 1981.

BALL, B.C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 1141-1158.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil physics**. 4th ed. New York: John Wiley, 1972. 498 p.

BLACKWELL, P.S.; RINGROSE-VOASE, A.J.; JAYAWARDANE, N.S.; OLSSON, K.A.; MCKENZIE, D.C.; MASON, W.K. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **Journal of Soil Science**, London, v. 41, p. 215-228, 1990.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 363-375.

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 158-164, 2009.

CHIEF, K.; FERRÉ, T.P.A.; NIJSSEN, B. Field testing of a soil corer air permeameter (SCAP) in desert soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 5, p. 1257-1263, 2006.

_____. Examination of correlation between air permeability and saturated hydraulic conductivity in unburned and burned desert soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 6, p. 1501-1509, 2008.

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

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Brasília: Sistema de Produção de Informação, 2006. 306 p.

FAHRAN, S.; HOLSEN, T.M.; BUDIMAN, J. Interaction of soil air permeability and soil vapor extraction. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 127, p. 32-37, 2001.

GRANOVSKY, A.V.; McCOY, E.L. Air flow measurements to describe field variation in porosity and permeability of soil macropores. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1569-1576, 1997.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C.; STEWART, B.A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 167-179.

HILL, R.L. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 161-166, 1990.

IVERSEN, B.V.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; LOLL, P. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, p. 643-659, 2001a.

IVERSEN, B.V.; SCHJØNNING, P.; POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P. In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: Boundary conditions and measurement scale. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, p. 97-106, 2001b.

JALBERT, M.; DANE, J.H. A handheld device for intrusive and nonintrusive field measurements of air permeability. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 2, p. 611-617, 2003.

KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, Oxford, v. 11, p. 93-99, 1946.

LIANG, P.; BOWERS Jr., C.G.; BOWEN, H.D. Finite element model to determine the shape factor for soil air permeability measurements. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 38, p. 997-1003, 1995.

LOGSDON, S.D.; JAYNES, D.B. Spatial variability of hydraulic conductivity in a cultivated field at different times. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 3, p. 703-709, 1996.

LOLL, P.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; RILEY, H. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: Application in stochastic water infiltration modeling. **Water Resources Research**, Washington, v. 35, p. 2387-2400, 1999.

McINTYRE, D.S.; TANNER, C.B. Abnormally distributed soil physical measurements and no parametric statistics. **Soil Science**, Madison, v. 88, p. 133-137, 1959.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O.; CORRENTE, J.E. More adequate probability distributions to represent the saturated soil hydraulic conductivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 789-793, 2002.

MOLDRUP, P.; OLESEN, T.; KOMATSU, T.; SCHJONNING, P.; ROLSTON, D.E. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 613-623, 2001.

MOLDRUP, P.; YOSHIKAWA, S.; OLESEN, T.; KOMATSUM, T.; ROLSTON, D.E. Air permeability in undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 32-40, 2003.

POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; MASSMANN, J.W.; HANSEN, J.A. Gas permeability and diffusivity in undisturbed soil: SVE implications. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 124, n. 10, p. 979-986, 1998.

REEVE, R.C. A method for determining the stability of soil structure based upon air and water permeability measurements. **Soil Science Society of America Proceedings**, Oxford, v. 17, p. 324-329, 1953.

ROSEBERG, R.J.; McCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 4, p. 969-974, 1990.

_____. Tillage- and traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: air permeability assessment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 1261-1267, 1992.

SMITH, J.E.; ROBIN, M.J.L.; ELRICK, D.E. A source of systematic error in transient-flow air permeameter measurements. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1563-1568, 1997.

_____. Improved transient-flow air permeameter design: dampening the temperature effects. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1220-1227, 1998.

TYNER, J.S.; WRIGHT, W.C.; LEE, J.; CRENSHAW, A.D. A dynamic air permeameter for coarse-textured soil columns and cores. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 4, p. 428-433, 2005.

VAN GROENEWOUD, H.S. Methods and apparatus for measuring air permeability of the soil. **Soil Science**, Madison, v. 106, p. 275-279, 1968.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

ZHANG, S.; GRIP, H.; LOVDAHL, L. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 90, p. 117-125, 2006.