**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactação e qualidade física do solo

Karina Maria Vieira Cavalieri

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

Piracicaba

2007

Karina Maria Vieira Cavalieri
Engenheiro Agrônomo

Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactação do solo e qualidade física

Orientador:
Prof. Dr. ALVARO PIRES DA SILVA

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

Piracicaba

2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Cavalieri, Karina Maria Vieira

Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactação e qualidade física do solo / Karina Maria Vieira. - - Piracicaba, 2007.
72 p.: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Compactação do solo 2. Compressibilidade dos solos 3. Física do solo
4. Solos – Propriedades físicas I. Título

CDD 631.43

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

*“Nunca lhe dão um desejo sem também lhe darem o poder de realizá-lo...
você tem de trabalhar por ele, porém”* (Richard Bach)

Aos meus pais

João B. Cavaliere & Adinir V. Cavaliere

Aos meus irmãos

Gláucia M. V. Cavaliere & Flávio A. V. Cavaliere

DEDICO

**A um grande homem, amigo, companheiro e muito determinado, que esteve
comigo e me ajudou a enfrentar desafios nesta etapa da minha vida.**

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À **DEUS** por ter me dado a vida, uma família maravilhosa e proporcionado a realização dos meus objetivos nestes anos de doutorado.

À **USP/ESALQ**, por meio do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade da realização do doutorado.

Ao meu orientador **Alvaro Pires da Silva**, pelo apoio e orientação.

Ao professor e amigo Dr. Cássio A. Tormena, por todo apoio e amizade desde o mestrado.

À CAPES pelo auxílio financeiro no Brasil e no exterior.

À Prof. Dra. Neide F. B. Giarola da Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG, por ter cedido, juntamente com a Universidade, uma área experimental para o desenvolvimento de um dos trabalhos.

À Prof. Dra. Sílvia Del Carmen Imhoff, pelo apoio e a amizade no início do doutorado.

Ao Department of Soil Science na Swedish University of Agricultural Science, que me recebeu com toda infraestrutura de trabalho e proporcionou momentos marcantes na minha vida.

Ao orientador na Suécia Johan Arvidsson e aos colegas que conheci durante o doutorado *Sanduíche*, Thomas Keller, Elizabeth Bölenius, Åsa Myrbech, pela amizade e orientação.

Aos amigos e companheiros nas coletas de campo e laboratório, Brivaldo Almeida, Cláudia M. N. Neves, Tairone P. Leão e, em especial meu colega de sala Afrânio Neves Junior.

Às amigas de república Lílían P. Firme (Liloka), Líliam A. Oliveira (Lili), Lúcia P. Firmee Juliana A. Galvão, por todos os momentos que passamos juntas e que construímos nossa amizade.

À Eduardo Polizeli, pelo incentivo para fazer o doutorado e a amizade em tantos momentos vividos ao longo desses anos.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, em especial a Nancy C. Amaral e Flávia Morales.

À todos os colegas de pós-graduação e àqueles que de alguma forma me ajudaram direta e indiretamente nestes anos na ESALQ.

MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	10
Referências	13
2 QUANTIFICAÇÃO DE CARGAS NO SOLO E SEUS EFEITOS SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS	16
Resumo	16
Abstract	16
2.2 Material e Métodos	19
2.2.1 Descrição do experimento e execução	19
2.2.2 Medidas de estresse no solo	20
2.2.3 Determinação das propriedades físicas do solo: resistência do solo à penetração e densidade do solo	23
2.3.4 Análises estatísticas	23
2.3 Resultados.....	23
2.4 Discussão	29
2.5 Conclusões.....	32
Referências	33
3 PROPRIEDADES FÍSICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS NUM SOLO SOB PLANTIO DIRETO	36
Resumo.....	36
Abstract	36
3.2 Material e Métodos	39
3.2.1 Área experimental e amostragem	39
3.2.2 Condutividade hidráulica saturada	40
3.2.3 Permeabilidade intrínseca ao ar (K_a)	41
3.2.4 Densidade do solo e porosidade	42
3.2.5 Parâmetro S.....	42
3.4 Discussão	47
3.5 Conclusões.....	50
Referências	51

4 DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO ATRAVÉS DE TESTES

COMPRESSÃO UNIAXIAL	55
Resumo	55
Abstract	56
4.2 Material e Métodos	59
4.3 Resultados.....	62
4.4 Discussão	66
4.5 Conclusões.....	69
Referências	70

RESUMO

Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactação e qualidade física do solo

A compactação do solo tem sido objeto de estudo devido a utilização mais freqüente e intensa da mecanização e devido a sua influência negativa na qualidade física do solo às culturas. Os efeitos da compactação sobre a deterioração da estrutura do solo dependem de vários fatores, como, a textura, o conteúdo de carbono orgânico, o conteúdo de água no solo durante as operações de campo e a freqüência e intensidade da carga aplicada pelas máquinas e implementos utilizados no campo. Estes fatores são os responsáveis pelos diferentes níveis de compactação encontrados nos solos agrícolas, sendo que a influência destes é de importância fundamental para o desenvolvimento de estratégias que evitem ou pelo menos amenizem a compactação no perfil do solo. Neste sentido, este trabalho teve por objetivos (i) analisar os efeitos de diferentes níveis de carga de máquinas aplicados no solo sobre as propriedades físicas do solo; (ii) determinar propriedades físicas do solo em camadas superficiais e subsuperficiais de um solo cultivado por longo prazo em sistema de plantio direto; (iii) avaliar a qualidade física do solo através do parâmetro S ; (iv) comparar as predições da pressão de preconsolidação estimada por diferentes métodos de ajuste com uma ampla variação textural do solo. Para isso, foi realizado um estudo de campo, conduzido em quatro experimentos na Suécia com tráfego de máquinas, onde diferentes pressões foram detectadas por sensores colocados em diferentes profundidades no solo, assim como a análise da densidade do solo e da resistência à penetração. Em outro estudo, propriedades dinâmicas e estáticas foram determinadas em diferentes camadas de um solo cultivado sob sistema de plantio direto há 14 anos, analisando a qualidade física do solo. E por final, a análise comparando diferentes métodos de ajuste para pressão de preconsolidação foi realizada. As propriedades físicas do solo refletiram os efeitos das cargas aplicadas no solo, demonstrando aumento da densidade do solo e da resistência à penetração. As propriedades estáticas do solo demonstraram a existência de uma camada mais densa no perfil do solo, porém as propriedades dinâmicas apresentaram resultados satisfatórios na mesma camada. A qualidade do solo avaliada pelo parâmetro S indicou que o solo possui boa estrutura física em todas as camadas estudadas. As comparações entre métodos de ajuste para a pressão de preconsolidação indicaram que superestimativas e subestimativas podem ocorrer quando se usa métodos diferentes, tornando difícil o uso de um valor absoluto de pressão de preconsolidação como um limite para as pressões exercidas no solo a fim de evitar a compactação do mesmo.

Palavras-chave: Compactação; Propriedades físicas do solo; Qualidade física do solo; Pressão de preconsolidação

ABSTRACT

Methodological aspects of the research about soil compaction and soil physical quality

Soil compaction has been the subject of study for many years due to its implications for crop yield. Its effect on the deterioration of the soil structure depend on several factors, such as, soil texture, organic carbon content, water content during the field operations as well, the frequency and intensity of the load applied by the machines and implements used in the field. These factors are the responsible for the different levels of compaction found in the soil agricultural, and their effects are very importance for the development of strategies to avoid or to ameliorate the soil compaction in the soil profile. In this sense, this work took as objectives (i) to analyse the effects of different levels of load machines applied on the soil physical properties; (ii) to determine soil physical properties on topsoil and subsoil layers cultivated under no-tillage system; (iii) to evaluate the soil physical quality by S parameter; (iv) to compare the predictions of the precompression stress fitted by different methods ranging several soil textural classes. Then, it was carried out a field study, performed in four experiments in Sweden with machine traffic. Different load pressures were detected by sensors put in different depths in the soil, and also the bulk density and penetration resistance were determined. Another study, dynamic and static properties were determined in different soil layers under no-tillage. Besides that the soil physical quality was verified. Finally, comparisons between precompression stress fitted by different methods was done. The soil physical properties reflected the effects of loads applied on soil, demonstrating increase of the soil bulk density and of the penetration resistance. The soil static properties demonstrated to exist a denser layer in the soil profile, however the dynamic properties presented satisfactory results in the same layer. Soil physical quality evaluated by the S parameter indicated a good soil physical structure in all the studied layers. The comparisons showed that the choice of method had a significant influence on the precompression stress values, becoming difficult the use of an absolute value of it, as a limit for the load pressures applied on soil to avoid the soil compaction.

Keywords: Soil compaction; Soil physical properties; Soil physical quality; Precompression stress

1 INTRODUÇÃO

A compactação do solo tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores há um longo tempo, sendo constatado que os seus efeitos sobre a estrutura física do solo acarretam, na maioria das vezes, na redução da produtividade das culturas. Sob condições onde a compactação anual é intensa e os processos naturais de descompactação, como ciclos de umedecimento e secamento são insignificantes, há um grande risco de que os efeitos da compactação sejam acumulados durante anos (HEINONEN, 1986). Isto se traduz em efeitos detrimenais no solo, reduzindo o crescimento radicular devido à alta resistência à penetração das raízes. A infiltração de água no solo é reduzida e a absorção de nutrientes pelas plantas através das raízes é afetada. Ademais, é comum a prática de aumentar o suprimento de nutrientes e água (irrigação), e o consumo de combustível, para compensar os efeitos adversos da compactação do solo sobre a produtividade das culturas, o que resulta num aumento do custo de produção, além de levar ao rebaixamento dos níveis do lençol freático e poluir o meio ambiente (HÅKANSSON; VOORHEES, 1998; VAN DEN AKKER et al., 2003).

Nas últimas décadas verificou-se, em todo o mundo, o aumento da utilização de máquinas agrícolas, assim como da carga aplicada pelas mesmas, o que tem colaborado para a degradação física, principalmente na subsuperfície do solo (HORN et al., 2000). Pode-se citar que a compactação no perfil do solo se dá de forma diferenciada, onde a incidência de compactação no horizonte superficial do solo é determinada pela pressão de contato entre o solo e as rodas, enquanto que em subsuperfície a carga do eixo torna-se o fator mais importante (HÅKANSSON; VOORHEES, 1998). Além disso, a compactação depende de outros fatores destacando-se a textura do solo (LARSON et al., 1980; IMHOFF et al 2004), o conteúdo de carbono orgânico (STONE; EKWUE, 1995), o teor de água do solo durante as operações de campo (HORN et al., 1995) e a frequência e intensidade com que a carga é aplicada no solo pelas máquinas e implementos (HORN et al., 1995; CHAMEN et al., 2003). Desta forma o estudo da compactação do solo torna-se abrangente e complexo em todo cenário agrícola.

A agricultura em todo o mundo utiliza diversas formas de preparo do solo de acordo com a cada região. Neste sentido, o Brasil se destaca na grande área agrícola sob sistema de plantio direto, no qual em 2003/2004 este sistema ocupava aproximadamente 23 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2006). Entretanto, o tráfego repetido de máquinas e a ausência de revolvimento do

solo têm acarretado o adensamento do solo, formando camadas compactadas. Isto tem sido verificado em diferentes solos e condições climáticas (TEBRÜGGE; DÜRING, 1999; OLIVER et al., 2002; FABRIZZI et al., 2005). Por outro lado, alguns estudos têm evidenciado que o sistema de plantio direto promove melhorias significativas na retenção de água, na estabilidade de agregados e no controle da temperatura, em comparação com sistemas convencionais de preparo do solo (KEMPER; DERPSCH, 1981; SIDIRAS; PAVAN 1986; RHOTON, 2000).

Isto indica que mesmo que ocorra compactação solo sob plantio direto, a mesma nem sempre implica em redução da produtividade das culturas, o que pode ser ressaltado através dos estudos realizados por Cardoso et al. (2006). Estes autores indicaram que camadas mais compactadas no solo não afetaram a produtividade de grãos e a acumulação de matéria seca na cultura da soja. No entanto, os estudos de Ferreras et al. (2000) verificaram redução no crescimento de raízes de trigo, no acúmulo de matéria seca e em seu rendimento, em consequência da compactação do solo sob sistema de plantio direto.

A análise das modificações na estrutura do solo decorrentes da compactação pode ser feita por propriedades físicas do solo que traduzem as modificações na distribuição do tamanho de poros. Essas modificações resultam no rearranjo das partículas e/ou agregados em função da pressão aplicada ao solo (SOANE et al., 1981). As propriedades físicas do solo mais frequentemente utilizadas nestes estudos são a densidade do solo, a porosidade do solo, a resistência mecânica do solo à penetração de raízes, a condutividade hidráulica, a permeabilidade do solo ao ar entre outros (SHAFER-LANDEFELD et al., 2004; YAVUSCAN et al., 2005; SWEENEY et al., 2006). Além das propriedades físicas do solo citadas, os índices ou parâmetros de qualidade física do solo contribuem para a análise de sua estrutura em propiciar o crescimento e desenvolvimento de raízes de plantas.

O parâmetro S foi proposto como uma ferramenta para indicar o estado de degradação da estrutura do solo. Conforme Dexter (2004) um valor de S igual a 0,035 foi estipulado como limite entre uma estrutura física do solo degradada e não-degradada, sendo que valores abaixo de 0,020 estão associados a um solo com estrutura extremamente degradada. Este parâmetro utiliza como base a curva de retenção de água no solo e é calculado através da equação de van Genuchten (1980) utilizada no ajuste da curva de retenção. Esta equação é provavelmente a mais usada no mundo e, funções de pedotransferência estão disponíveis para a estimativa de seus parâmetros. Sendo que o seu uso fornece um método consistente e objetivo para a análise de dados.

Um outro parâmetro utilizado principalmente para indicar a capacidade de suporte de carga do solo, e conseqüentemente, o risco de compactação do mesmo, é a pressão de preconsolidação (VEENHOF; MCBRIDE, 1996; HORN; FLEIGE, 2003; IMHOFF et al., 2004; RUCKNAGEL et al., 2007). Este parâmetro é baseado na curva de compactação do solo e foi desenvolvido por Casagrande (1936). Conforme Håkansson e Voorhees (1998) a pressão de preconsolidação é um parâmetro que pode permitir conclusões valiosas sobre as influências cumulativas de pressões de compactação prévia, ou seja, o histórico de pressões no qual o solo foi submetido no passado, bem como indicar mudanças nas propriedades físicas do solo causadas por tal compactação.

Pesquisadores no mundo todo têm utilizado este parâmetro na determinação da capacidade de suporte de carga do solo (VEENHOF; MCBRIDE, 1996; HORN; FLEIGE, 2003; IMHOFF et al., 2004; RUCKNAGEL et al., 2007). Entretanto, a busca por melhores formas de obtenção da pressão de preconsolidação tem levado alguns pesquisadores a desenvolver diferentes métodos de ajuste de pressão de preconsolidação assim como, utilizarem as funções de pedotransferência denominadas FPT (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1995; HORN; FLEIGE, 2003; IMHOFF et al., 2004; BAUMGARTL; KÖCK, 2004; GREGORY et al., 2006). Estudos investigando diferenças entre os métodos de ajuste da pressão de preconsolidação têm sido desempenhados por Dias Júnior e Pierce (1995), Arvidsson e Keller (2004), Baumgartl e Köck (2004) e Gregory et al. (2006).

Essa tese procurou contribuir para a ampliação do nível de conhecimento na área de compactação do solo e foi desenvolvida em forma de capítulos. Cada capítulo refere-se a um estudo individualizado. Porém os temas de cada um seguem uma seqüência lógica dos processos envolvidos na compactação do solo. Isto foi realizado para um melhor entendimento dos aspectos metodológicos da pesquisa sobre a compactação do solo.

No primeiro capítulo foi realizada uma avaliação das cargas aplicadas por máquinas durante o tráfego nas operações de campo, sobre propriedades físicas do solo. Isto serve como base da ocorrência de compactação em solos agrícolas. Posteriormente, no segundo capítulo, estudou-se um solo sob sistema de plantio direto, o qual tem sofrido tráfego de máquinas repetidamente com ausência de revolvimento do solo, porém com o estabelecimento da estrutura do solo, através de uma rede de poros desenvolvida ao longo do tempo. E por último, no terceiro capítulo, foi realizado um estudo de diferentes métodos de ajuste para a pressão de

preconsolidação, que é dada como parâmetro indicativo da capacidade de suporte de carga do solo, ou seja, do estado de compactação do mesmo.

Referências

ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, p. 85-95, 2004.

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

CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J.L.; TORRES, E.; SARAIVA, O.F.; GUIMARÃES, M.F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 493-501, 2006.

CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMERD, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 2. Equipment and field practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 161-174, 2003.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3, p. 201-214, 2004.

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

FABRIZZI, K.P.; GARCIA, F.O.; COSTA, J.L.; PICONE, L.I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, p. 57-69, 2005.

FEDERACÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/historico.htm>. Acesso em: 11 jan. 2006.

FERRERAS, L.A.; COSTA, J.L.; GARCIA, F.O.; PECORARI, C. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern “Pampa” of Argentina. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 31-39, 2000.

GREGORY, A.S.; WHALLEY W.R.; WATTS C.W.; BIRD, N.R.A.; HALLETT, P.D.; WHITMORE, A.P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 45-57, 2006.

HÅKANSSON, 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. (Advances in Soil Science).

HEINONEN, R. Alleviation of soil compaction by natural forces and cultural practices. In: LAL, R.; SANCHEZ, P.A.; CUMMININGS, R.W. JR. **Land clearing and development in the tropics**. Rotterdam: Balkema Publishers, 1986. p.324.

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

HORN, R.; VAN DEN AKKER, J.J.H.; ARVIDSSON, J. (Ed.). **Subsoil compaction: distribution, processes and consequences**. Reiskirchen: Catena Verlag, 2000. 462 p.

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 Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 23-36, 1995.

IMHOFF, S.; DA 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.

KEMPER, B.; DERPSCH, R. Soil compaction and root growth in Paraná. In: RUSSEL, R.S. (Ed.). **The soil/root system in relation to brazilian agriculture**. Londrina: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1981. p. 81-101.

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

OLIVER, R.; DOUZET, J.M.; SCOPEL, E.; BLANCHART, E.; CURMI, P.; ALVES MOREIRA, J. A.; MINETTE, S.; GUERIN, P.; FORTIER, M.; MARAUX, F. Medium term impact of no tillage on some physical properties of a Brazilian oxisol of Cerrados (tropical humid savannah of central Brazil). In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 17.; CONFRONTING NEWREALITIES IN THE 21ST CENTURY, 2002, Bangkok. **Proceedings ...** Bangkok: Kasetsart University, 2002. p. 930-1 – 930-9.

RHOTON, F.E. Influence of time on soil response to no-till practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 700-709, 2000.

RUCKNAGEL, J.; HOFMANN, B.; PAUL, R.; CHRISTEN, O.; HU*LSBERGEN, K.-J. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 213-220, 2007.

SCHÄFER-LANDEFELD, L.; BRANDHUBER, R.; FENNER, S.; KOCH, H.-J.; STOCKFISCH, N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 75, p. 75-86, 2004.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo na temperatura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, p. 181-184, 1986.

SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W.; PAINTER, DJ. Compaction by agricultural vehicles: a review. II. Compaction under tyres and other running gear. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 1, p. 373-400, 1981.

STONE, R.J.; EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v. 60, p. 15-24, 1995.

SWEENEY, D.W.; KIRKHAM, M.B.; SISSON, J.B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 637-643, 2006.

TEBRÜGGE, F.; DÜRING, R.A. Reducing tillage intensity: a review of results from a long-term study in Germany. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 15-28, 1999.

VAN DEN AKKER, J.J.H.; ARVIDSSON, J.; HORN, R. Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 1-8, 2003.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal** Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

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.

YAVUZCAN, H.G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 200-215, 2005.

2 QUANTIFICAÇÃO DE CARGAS NO SOLO E SEUS EFEITOS SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS

Resumo

Em um estudo de campo, conduzido em quatro experimentos na Suécia foram analisados os efeitos de diferentes pressões exercidas por máquinas usadas na semeadura e no preparo do solo sobre as propriedades físicas do solo. A classe textural compreendeu de Franco arenoso a Franco argilo arenoso. Três locais foram anualmente preparados sob sistema convencional e um local sob preparo reduzido. Foram medidas a pressão (kPa) detectada por sensores em diferentes camadas no solo durante o tráfego de máquinas, a densidade do solo (Ds) em superfície e a resistência à penetração (RP) média, na linha e na entrelinha, até a profundidade de 0,30 m. Os tratamentos foram: (SC) sem pressão extra exercida pela semeadora, considerado Sem Compactação; (BC) pressão exercida pela semeadora considerada de Baixa Carga; (AC) pressão exercida pela semeadora considerada de Alta Carga e; (CT) pressão exercida pelas rodas do trator usado no preparo do leito de semeadura, Carga do trator. A camada de 0-0,10 m apresentou valores de pressão no solo acima de 120 kPa. O incremento de pressão do tratamento SC para AC foi maior nesta camada quando comparada à camada de 0,10-0,20m. A Carga do trator (CT) produziu valores de pressão no solo maiores que os demais tratamentos na camada de 0,10-0,20m. Os efeitos da pressão no solo acarretaram em aumento da densidade do solo (Ds) em superfície, que em geral, ocorreu na sequência SC<BC<AC<CT. A RP variou em profundidade e apresentou valores limitantes de RP na camada de 0,10 e 0,15 m sob preparo convencional para a Carga do trator. Sob preparo reduzido a RP obteve valores acima de 1,5 MPa em todos os tratamentos desde a superfície alcançando valores em torno de 2,5 MPa na camada abaixo de 0,25 m. A RP tendeu a diminuir em profundidade abaixo de 0,20 m sob preparo convencional, no entanto, o contrário foi verificado para Vagrérup 2 sob preparo reduzido. Diferenças entre a linha e a entrelinha puderam ser observadas claramente nos tratamentos SC, BC e AC, entre a profundidade de 0,10 a 0,25 m, onde os valores de RP são mais acentuados sob a linha de plantio. As propriedades físicas estudadas refletiram os efeitos das cargas aplicadas no solo. Geralmente, as diferenças ficaram entre Sem Compactação e Carga do trator. O incremento de carga na semeadora entre os tratamentos Baixa Carga e Alta Carga foram intermediários.

Palavras-chave: Compactação; Pressão no solo; Densidade do solo; Resistência à penetração

QUANTIFICATION OF TRAFFIC LOAD ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES

Abstract

A field study was conducted on four experiments in Sweden for evaluating the effects of machine load on soil physical properties, specifically bulk density and resistance to penetration. Soil load (kPa) was measured in situ by field sensors. The treatments were: (SC) without extra load pressure exerted by the sowing machine, No-Compaction; (BC) load pressure exerted by the sowing machine, Low Load; (AC) load pressure exerted the sowing machine, High Load, and

(CT) load pressure exerted by the tractor wheels used in the seedbed tillage, Tractor Load. The increase on soil pressure from treatment SC to AC was greater on topsoil than in the 0,10-0,20 m depth. The load effects caused an increase on soil bulk density and resistance to penetration. The treatment effect varied according to depth. The RP varied in depth and showed critical values in the 0,10 and 0,15 layer of depth under conventional tillage for the Tractor Load. Under minimum tillage the RP got values above of 1,5 MPa in all the treatments since the surface reaching values around 2,5 MPa in the layer below of 0,25 m. The RP tended to diminish in depth below of 0,20 m under conventional tillage, however, the opposite was verified for Vagrerup 2 under minimum tillage. Differences between the row and the interrow could have been observed clearly in the treatments, BC and AC, between 0,10 and 0,25 m of depth. The highest RP values were under the planting row. The soil physical properties studied demonstrated the load effects applied on soil. En general, the greatest differences were between No-compaction and Tractor Load. The load increment in the sowing machine between the Low Load and High Load treatments was intermediate.

Keywords: Soil compaction; Soil load pressure; Bulk density; Resistance to penetration

2.1 Introdução

Vários são os fatores que influenciam a produtividade das culturas. Entre estes, as propriedades físicas do solo se destacam por serem modificadas pelo uso de máquinas e implementos e por afetarem positiva ou negativamente o crescimento das plantas bem como processos químicos e biológicos no solo. As modificações nas propriedades físicas do solo decorrentes do tráfego de máquinas nas operações agrícolas têm sido amplamente estudados (HORN et al., 2003; SHAFER-LANDEFELD et al., 2004; YAVUSCAN et al., 2005; CHAN et al., 2006; SHAFFER et al., 2007), ressaltando-se os efeitos negativos da compactação do solo sobre a produtividade das culturas. Contudo, nas últimas décadas, a mecanização das operações agrícolas tem-se intensificado, resultando num aumento na carga aplicada pelas máquinas, provocando na maioria dos casos a degradação física do solo em superfície e subsuperfície (HORN et al., 2000).

A deterioração da estrutura do solo devido à compactação depende de vários fatores, destacando-se a textura do solo (LARSON et al., 1980; IMHOFF et al 2004), o conteúdo de carbono orgânico (STONE; EKWUE, 1995), o teor de água do solo durante as operações de campo (HORN et al., 1995) e a frequência e intensidade com que a carga é aplicada no solo pelas máquinas e implementos (HORN et al., 1995; CHAMEN et al., 2003). Por outro lado, verifica-se o aumento na área de contato dos pneus em função da carga dos veículos agrícolas, o que poderia atenuar a compactação superficial do solo pelo tráfego das máquinas. Adicionalmente, a pressão

de inflação, o tamanho e a resistência da carcaça do pneu controlam a distribuição dos estresses no solo (SOANE, 1986). A pressão aplicada ao solo é transmitida às camadas mais profundas em função da carga por eixo e pode alterar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo se a resistência mecânica interna dos elementos estruturais do solo for excedida (HORN; ROSTEK, 2000).

Os estresses decorrentes da carga aplicada ao solo e a compactabilidade do solo, traduzida pela capacidade de deformar ou rearranjar suas partículas quando uma carga é aplicada em sua superfície, determinam o tipo e a quantidade da deformação do solo (SOANE, 1981; HORN et al., 1995). Estes fatores são os responsáveis pelos diferentes níveis de compactação encontrados nos solos agrícolas, sendo que a influência destes é de importância fundamental para o desenvolvimento de estratégias para o controle da compactação em profundidade.

As diferentes cargas aplicadas ao solo através das máquinas influenciam a estrutura do solo que, além da sua variabilidade natural, adiciona os efeitos negativos decorrentes do aumento da densidade do solo, ou alternativamente redução da porosidade do solo com conseqüente mudança na distribuição do tamanho de poro, tanto espacialmente quanto em profundidade. No entanto, em função das oscilações climáticas que determinam a disponibilidade temporal de água no solo, nem sempre se verifica efeitos detrimenais da compactação na produtividade das culturas. Entretanto, Arvidsson e Hakansson (1996) encontraram uma correlação linear negativa entre a perda de produtividade e a intensidade de tráfego de até 300-400 Mg km ha⁻¹. Os autores comentam que em geral foi difícil explicar detalhada e consistentemente a resposta das culturas em função do tráfego.

A análise das modificações na estrutura do solo decorrentes da compactação pode ser monitorada por propriedades físicas do solo que traduzem as modificações na distribuição do tamanho de poros resultante do rearranjo das partículas e/ou agregados em função da pressão aplicada ao solo (SOANE et al., 1981). As propriedades físicas do solo mais frequentemente utilizadas nestes estudos são a densidade do solo, a porosidade do solo, a resistência mecânica do solo à penetração de raízes, a condutividade hidráulica, a permeabilidade ao ar (SHAFFER-LANDEFELD et al., 2004; YAVUSCAN et al., 2005; SWEENEY et al., 2006).

A distribuição espacial e em profundidade da pressão exercida pelas máquinas é complexa (ALAKUKKU et al., 2003). Entretanto, é importante saber se estas pressões podem ou não acarretar alterações deletérias na estrutura do solo nas diferentes camadas, especialmente onde as

raízes irão se desenvolver. Segundo Keller et al. (2002) os efeitos detrimenais na camada superficial do solo podem ser considerados de menor importância, uma vez que esta compactação pode ser removida por ocasião do preparo do solo. A maior preocupação deve estar focada na compactação subsuperficial, uma vez que a remoção da compactação no subsolo demanda altos custos bem como também implica em reduções na produtividade das culturas (ALAKUKKU et al., 2003; CHAMEN et al., 2003).

O uso de diferentes cargas aplicadas ao solo primeiramente é devido ao intuito de melhorar o fechamento do sulco de plantio e o contato solo-semente. Entretanto faz-se necessário a avaliação das propriedades físicas do solo em decorrência do tráfego de máquinas durante o preparo e a semeadura, uma vez que pode ocorrer compactação do solo e a mesma interferir negativamente na produtividade da cultura. A hipótese deste trabalho é de que as propriedades físicas do solo são alteradas de acordo com a carga aplicada sobre o mesmo. O objetivo deste trabalho foi comparar os efeitos de diferentes níveis de carga de máquinas aplicados no solo, no preparo e semeadura da beterraba açucareira, sobre algumas propriedades físicas do solo. Especificamente, foram analisados: (a) as pressões máximas detectadas no solo em diferentes camadas; (b) a densidade do solo em superfície; (c) a resistência à penetração média em profundidade, na linha e na entrelinha de semeadura.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Descrição do experimento e execução

Quatro experimentos foram conduzidos em Skåne, Sudoeste de Lund, Suécia, com a cultura da beterraba açucareira. Três locais foram usados para a instalação dos experimentos, sendo um dos locais com preparo convencional (Vragerup 1) e com preparo reduzido (Vragerup 2) e outros dois locais com preparo convencional (Stävie e Ädelholm). O preparo convencional consta de uma aração até 0,30 m no outono, seguida de uma aração mais rasa (0,20 m) e gradagem (0,03 m) na primavera, enquanto que o preparo reduzido consta apenas de gradagem a 0,03 m para o preparo do leito de semeadura. Estes locais foram cultivados nos últimos anos com beterraba açucareira e cereais (trigo, centeio, cevada, aveia, etc). Os solos foram classificados como Eutric Cambisols (FAO, 1988) ou Cambissolo Háplico (Embrapa, 2006). As características dos solos são mostradas na Tabela 2.1. O delineamento estatístico foi de blocos casualizados com

quatro repetições em que os tratamentos foram diferentes níveis de compactação exercidos pela semeadora e pneu do trator usado no preparo do leito de semeadura. A área de cada parcela correspondeu à 300 metros quadrados (20 m de comprimento e 15 m de largura). Entre os blocos havia uma bordadura com cerca de 15 m de largura para a manobra das máquinas.

Tabela 2.1 - Propriedades do solo nos locais estudados, média de textura e umidade

<i>Tipo de solo</i>	<i>Local</i>	<i>Textura</i>	<i>Argila (g g⁻¹)</i>	<i>Silte (g g⁻¹)</i>	<i>Areia (g g⁻¹)</i>	<i>Umidade (g g⁻¹)</i>
Cambissolo Háplico (Embrapa, 2006)	Vragerup 1	Franco argilo arenoso	21	26	53	0,21
	Vragerup 2	Franco argilo arenoso	24	30	46	0,15
	Stävie	Franco argilo arenoso	21	31	48	Não determinado
	Ädelholm	Franco arenoso	20	28	52	0,16

Os tratamentos foram: (SC) sem pressão extra exercida pela semeadora, considerado Sem Compactação; (BC) pressão exercida pela semeadora considerada de Baixa Carga; (AC) pressão exercida pela semeadora considerada de Alta Carga e; (CT) pressão exercida pelas rodas do trator usado no preparo do leito de semeadura, Carga do trator. A semeadura da beterraba açucareira ocorreu no fim de abril e sua colheita em setembro. As propriedades físicas do solo como medidas de estresse no solo foram determinadas durante a semeadura, enquanto que a resistência à penetração e a densidade do solo foram determinados 45 dias após a semeadura.

2.2.2 Medidas de estresse no solo

As medidas de estresse no solo foram realizadas em Vragerup. As máquinas usadas foram um trator New Holland TVT190, com massa de cerca de 6760 kg com uma semeadora Advancer Edenhall, que foi ajustada de acordo com a carga desejada nos tratamentos A, B, C; um trator Massey Ferguson 6290 com massa aproximada de 4745 kg e pressão de inflação do pneu de 120 kPa, para a avaliação do tratamento CT.

A distribuição do estresse vertical, abaixo da área de contato da roda com o solo, foi medida por sensores (DS Europe Series BC302) instalados no perfil do solo, na camada de 0-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade para SC, BC e AC (semeadora) e CT (trator). Cada sensor foi anexado a um disco de alumínio (diâmetro: 17,5 mm, altura: 5,5 mm) colocados no centro de

outro disco de alumínio maior (diâmetro: 70 mm, altura: 15 mm). As leituras foram obtidas em Volts (V) e convertidas para kilopascal (kPa). A pressão vertical obtida foi calculada conforme Keller e Arvidsson (2004). Os sensores foram colocados perpendicularmente à rota de tráfego (Figura 2.1), aproximadamente no centro das rodas das máquinas.

Figura 2.1 - Ilustração do posicionamento dos sensores instalados no solo sob a roda do trator e da semeadora

Um sensor foi colocado no centro do rodado e outros dois nas laterais para a semeadora. Para o rodado do trator os cinco sensores foram colocados de tal forma que o sensor II ficou no centro e os outros, nas laterais (Figura 2.1). Esta operação foi realizada em média quatro vezes em cada tratamento. Em cada instalação, as máquinas passaram pelo menos duas vezes no mesmo local, onde no mínimo dois sensores quantificaram as pressões máximas exercidas no solo. A média composta pelos sensores e passadas compôs o valor médio da carga aplicada ao solo em cada repetição.

Cada passada realizada pela semeadora ou pelo trator sobre os sensores instalados no solo produziu picos de pressão de onde foram obtidas as pressões máximas exercidas no solo. Exemplos gráficos da obtenção das pressões no solo durante o tráfego estão apresentados na Figura 2.2. Em geral os sensores localizados no centro do rodado obtiveram a pressão máxima em cada passada. Salienta-se que estes exemplos correspondem a uma única passada e ao sensor instalado na profundidade de 0,20 m.

Figura 2.2 – Medidas de pressão no solo em função do tempo de passagem da máquina sobre a área. **(a)** sensores instalados para as medições do pneu do trator e **(b)** sensores instalados para as medições da linha da semeadora

2.2.3 Determinação das propriedades físicas do solo: resistência do solo à penetração e densidade do solo

As medidas de resistência do solo foram feitas no campo com um penetrômetro digital Eijkelkamp Agrisearch Equipament, nos tratamentos SC, BC, AC e CT. As medidas de resistência do solo à penetração corresponderam a sete inserções perpendiculares aos rodados, com cinco repetições para SC, BC, AC e três repetições para CT, em cada parcela, perfazendo 72 medidas em cada experimento. O conteúdo de água no momento das medidas de RP estava próximo a capacidade de campo. A distância entre inserções foi ao redor 0,05 m e a profundidade de penetração alcançou até 0,30 m. A resistência à penetração (RP) média das inserções em 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25 e 0,30 m foram comparados entre tratamentos para cada experimento e a RP na linha e entrelinha também foram analisadas nos experimentos sob preparo convencional (Adelholm, Vagrerup 1 e Stavie).

Amostras de solo indeformadas foram obtidas em anéis metálicos com 5 cm de altura e 7,2 cm de diâmetro, os quais foram usados para determinar a densidade do solo. Quatro amostras foram coletadas na superfície do solo em cada parcela, perfazendo 64 anéis por experimento. Os mesmos foram acondicionados em filme plástico para o transporte até o laboratório. Posteriormente, as amostras de solo contidas nos anéis foram preparadas e pesadas para a obtenção do conteúdo de água (g) e depois levadas a estufa à 105°C por 48 h para a obtenção da massa seca (g). A densidade do solo foi determinada conforme (BLAKE; HARTGE, 1986). A umidade gravimétrica foi determinada em cada amostra através da relação entre a massa de água e a massa de solo seco de cada amostra.

2.3.4 Análises estatísticas

Todas as análises de regressão foram executadas usando o software SAS/STAT (SAS INSTITUTE, 2000) e os resultados submetidos à análise de variância (Anova) Para a densidade do solo optou-se por usar o LSD (Least Significance Difference) para comparação entre médias e para a resistência à penetração avaliada em profundidade foi usado erro padrão da média.

2.3 Resultados

Os valores médios das pressões verticais ou estresses exercidos no solo, detectados pelos sensores, estão apresentados na Tabela 2.2. Os resultados indicam um aumento da pressão

média do tratamento Sem Compactação (SC) para Alta Carga (AC) na camada de 0-0,10m e de Sem compactação (SC) para Carga do trator (CT) na camada de 0,10-0,20 m.

Tabela 2.2 – Pressão (kPa) exercida no solo nos diferentes tratamentos e nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m

<i>Tratamentos</i>	<i>Pressão</i>
-----0-0,10 m-----	
Sem compactação (SC)	124,17
Baixa carga (BC)	201,90
Alta carga (AC)	260,84
Carga do trator (CT)	247,44
-----0,10-0,20 m-----	
Sem compactação (SC)	71,38
Baixa carga (BC)	78,82
Alta carga (AC)	105,09
Carga do trator (CT)	151,34

Figura 2.3 – Médias das pressões máximas obtidas em diferentes camadas no solo em função dos diferentes níveis de pressão exercida no solo

As pressões detectadas em Sem Compactação (SC), Baixa Carga (BC), Alta Carga (AC) e Carga do trator (CT) na camada de 0-0,10 m foram respectivamente 57, 39, 40 e 61 % superiores às da camada 0,10-0,20 m. Além disso, a Carga do trator para a camada de 0-0,10 m foi ligeiramente mais baixa em comparação com o Alta Carga. Com relação a camada de 0,10-0,20 m houve uma aumento crescente do tratamento SC para CT, entretanto o incremento entre os tratamentos foi menor que na camada de 0-0,10 m.

Os experimentos em Stavie e Vagrurup 1 e 2 apresentaram valores médios de densidade do solo (Ds) acima de $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto que em Adelholm os valores foram entre 1,35 e $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 2.4). No experimento solo Adelholm, os valores médios de Ds foram menores, não apresentando diferença significativa entre os tratamentos.

Figura 2.4 – Média da densidade do solo em cada local em função dos tratamentos com diferentes níveis de pressão exercida no solo. Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos para cada local

Os resultados de densidade do solo mostraram um aumento na sequência $SC < BC < AC < CT$, com exceção de Vagrurup 2 onde o tratamento Baixa Carga apresentou Ds maior que no tratamento Alta Carga ($SC < BC > AC < CT$). Estatisticamente, Stavie e Vagrurup 2

apresentaram os menores valores de Ds para o tratamento Sem Compactação (SC) e maiores valores para Carga do trator (CT), enquanto que os tratamentos Baixa Carga (BC) e Alta Carga (AC) resultaram em valores de Ds intermediários. No experimento de Vagrurup 1 os tratamentos SC, BC e AC foram significativamente iguais diferindo de CT que obteve a maior Ds. O coeficiente de variação da Ds não ultrapassou 7% nos tratamentos estudados.

A resistência do solo à penetração (RP) foi avaliada da superfície do solo até a profundidade de 0,30 m e em geral apresentou valores não impeditivos ($>2\text{MPa}$) ao crescimento e desenvolvimento de raízes (Figura 2.5). Nos locais onde foi realizado o preparo convencional (Stavie, Adelholm e Vagrurup 1), verificaram-se valores de RP $<1,0\text{ MPa}$ em superfície (0,05m), havendo um aumento da RP em subsuperfície. Em Vagrurup 2, único local sob preparo reduzido, os valores de RP em superfície foram superiores a 1 MPa e o incremento da RP se deu abaixo dos 0,25 m.

Os resultados de RP em cada camada analisada demonstram que na camada superficial de 0-0,05 m em Adelholm e Vagrurup 2, constatarem-se diferenças significativas entre o tratamento Carga do trator (CT) e os demais tratamentos. Em Stavie e Vagrurup 2, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Todos os locais sob preparo convencional apresentaram um maior incremento de RP na camada de 0,10 m comparado com as demais camadas. Além disso, nesta mesma camada houve diferença significativa entre o tratamento Carga do trator (CT) e os demais tratamentos. Em Vagrurup 1, o tratamento Sem Compactação (SC) diferiu estatisticamente ($p<0,05$) do tratamento Baixa Carga (BC) entretanto não apresentou diferença do Alta Carga (AC).

Na camada de 0,15 m observou-se que a RP apresentou diferenças significativas entre tratamentos, apesar de que tais diferenças foram distintas entre os locais. A partir da profundidade de 0,20 m os experimentos sob preparo convencional apresentaram uma redução da RP em profundidade enquanto que o contrário pode ser observado para Vagrurup 2 sob preparo reduzido. Nesta profundidade foram constatadas diferenças similares à camada de 0,15 m para Stavie e Vagrurup 1. Contudo, Vagrurup 2 obteve menores valores de RP no tratamento Sem Compactação (SC) e Adelholm não indicou diferença significativa entre os tratamentos. Abaixo dos 0,20 m a RP foi significativamente igual entre os tratamentos em todos os experimentos.

Figura 2.5 – Resistência à penetração do solo (RP) em um perfil de 0-0,30 m de profundidade. As barras dos erros indicam o $\pm$ SE ($n=35$ para SC, BC e AC e $n=21$ para CT) entre tratamentos

As diferenças estatisticamente significativas de RP entre tratamentos foram mais pronunciadas entre Sem Compactação (SC) e Carga do trator (CT) e principalmente na camada de 0,10 e 0,15 m. O comportamento da RP sob preparo convencional foi semelhante para todos os

tratamentos sem diferenças significativas entre os locais dos experimentos ($p < 0,05$). Assim os dados dos três experimentos foram reunidos com o intuito de analisar o comportamento da RP de cada tratamento, na linha de plantio e na sua entrelinha. Estes resultados estão plotados na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Resistência à penetração do solo média, em profundidade, na linha e entrelinha de plantio. -■- Sem Compactação, -▲- Baixa Carga, -●- Alta Carga e -◆- Carga do trator

Observa-se nos primeiros centímetros (0-0,12 m) de profundidade que a Carga do trator (CT) obteve, tanto na Linha de plantio quanto na Entrelinha, valores de RP maiores daqueles encontrados nos demais tratamentos e que estes foram muito similares comparando-se Linha e Entrelinha até 0,06 m. Contudo, diferenças entre a Linha e a Entrelinha podem ser observadas claramente nos outros tratamentos entre a profundidade de 0,10 a 0,25 m, onde os valores de RP

são mais acentuados sob a Linha de plantio. Nesta camada, os valores de RP entre os tratamentos variam de 1,5 a 2,5 MPa. Quando são comparados de forma isolada os tratamentos na Linha e os tratamentos na Entrelinha o tratamento Sem Compactação (SC) obteve os menores valores de RP abaixo dos 0,12 m. Os valores de RP em cada tratamento abaixo dos 0,12 m variam pouco na Entrelinha. Contudo, na Linha de plantio os mesmos sofrem um aumento contínuo até a camada em torno de 0,15 m, mas logo depois voltam a diminuir com o aumento da profundidade.

2.4 Discussão

Os resultados das pressões verticais exercidas no solo (Tabela 2.2) indicam que houve um aumento da pressão no solo conforme o aumento da carga da semeadora, na seqüência Sem Compactação (SC), Baixa Carga (BC) e Alta Carga (AC), na camada superficial (0-0,10 m), e em todos os tratamentos em subsuperfície (0,10-0,20 m). Vale salientar que este tipo de avaliação sofre a influência de vários fatores e que as pressões máximas exercidas pelas máquinas podem ser dissipadas. Como exemplo, tem-se a variação da posição exata entre o eixo que concentra a maior carga da máquina e a célula de carga do sensor que detecta a pressão exercida pela máquina, que pode ocorrer durante o tráfego. Um pequeno deslocamento lateral do sensor durante o tráfego pode interferir na medida de pressão, produzindo um valor maior ou menor que aquele exercido pela máquina, resultando numa ampla variabilidade dos dados.

Alakukku et al. (2003) salienta que a pressão não é uniformemente distribuída sobre a área de contato do pneu e que esta distribuição é complexa. Os mesmos autores descrevem ainda que, a distribuição do peso das máquinas durante as operações de campo, pode facilmente variar entre eixos e, rodas sobre o mesmo eixo de carga, dependendo da magnitude da carga ou da transferência de massa durante as operações de preparo do solo. De acordo com Horn et al. (2003), quanto mais o solo é trafegado, mais intenso é o rearranjo dos agregados do solo ou partículas. Assim sendo, pressões na interface pneu/rodado-solo são uma função das características do pneu/rodado e das características da carga aplicada bem como das condições do solo (KELLER, 2004).

Em relação a camada de 0,10-0,20 m, as menores cargas aplicadas ao solo (Sem Compactação e Baixa Carga) tiveram apenas um pequeno incremento de uma para a outra. Entretanto, quando comparadas com a Carga do trator, esta foi cerca de 50% mais elevada. Os

valores de pressão no solo foram bem maiores na camada superficial indicando que a distribuição da pressão no solo foi mais concentrada em superfície. Por outro lado, a Carga do trator obteve valores altos na camada de 0,10-0,20 m.

Apesar de haver um maior incremento da pressão na superfície do solo comparado à camada 0,10-0,20 m no tratamento Sem Compactação (SC) do que para o tratamento Alta Carga (AC), os mesmos apresentarem valores acima de 150 kPa e seus efeitos sobre o solo podem ser de menor importância. Segundo Keller et al. (2002) tal consideração é embasada no fato de que a camada superficial do solo é subsequentemente preparada e, portanto desestruturada, desfazendo possíveis indícios de compactação. A maior preocupação, no entanto, se dá em subsuperfície uma vez que a remoção da compactação no subsolo demanda altos custos (CHAMEN et al. 2003).

O valor médio da pressão detectada na camada de 0,10-0,20 m para a Carga do trator foi 151 kPa, acima dos valores encontrados por Horn et al. (2003) na camada de 0,15 m (116 kPa). A influência do tráfego da roda do trator sobre as propriedades do solo pode ser amplamente dissipada na camada de 0,15-0,30 m (LIEBIG et al., 1993) o que torna difícil a comparação desse tipo de resultado.

Os resultados da densidade do solo (Ds) apresentaram valores coerentes com a textura do solo dos diferentes locais estudados, considerando o tratamento Sem Compactação (SC) (Figura 4.3) e portanto sem indícios de compactação do solo em superfície. Em geral, a Ds média, após 45 dias da semeadura e conseqüentemente, da aplicação das cargas, conforme os tratamentos estudados, refletiu consistentemente os efeitos das pressões exercidas no solo, havendo um aumento do tratamento Sem Compactação (SC) para o tratamento Carga do pneu do trator (CT), apesar da pressão média na camada superficial do solo para o tratamento Carga do trator (CT) ter sido inferior ao tratamento de Alta Carga (AC).

Shafer-Landefeld et al. (2004) investigaram o efeito de maquinarias pesadas, como colhedora de beterraba açucareira, em propriedades físicas de solos com ampla variação de classe textura sob preparo convencional e verificaram um incremento significativo da Ds após a passagem das máquinas em seis dos 10 locais amostrados. Sweeney et al. (2006) estudaram o efeito da compactação em um solo franco siltoso na linha e entrelinha do rodado do trator usado no preparo do solo e constataram que no rodado do pneu do trator a Ds média foi acima de 1,65 Mg m⁻³. Estes valores são mais elevados dos que os encontrados no presente estudo, para o tratamento Carga do trator (CT).

Apesar da alta variabilidade dos resultados da pressão exercida no solo durante o tráfego, os efeitos da mesma no solo sobre a Ds podem ter sido mais intensos (e irrecuperáveis) em 45 dias, proporcionando valores mais elevados de Ds para o tratamento carga do trator (CT). Além disso, os efeitos de uma única passada de uma máquina pesada no campo podem ser pequenos, contudo estas pequenas mudanças podem ser aditivas (SHAFER-LANDEFELD et al., 2004).

Os resultados da RP demonstraram que na camada de 0-0,05 m sob preparo convencional (Adelholm, Stavie e Vagrerup 1) não há restrições para o crescimento e desenvolvimento das raízes. Entretanto, em Vagrerup 2 onde o sistema de preparo é reduzido, valores acima de 2 MPa considerado limitante (TAYLOR et al., 1966), foram verificados no tratamento Carga do trator (CT) (Figura 2.5). A camada de 0,10 e 0,15 m apresentaram os valores mais elevados de RP no tratamento D em relação aos demais, indicando uma possível camada compactada em decorrência da carga exercida pelo trator. Assim como as outras propriedades estudadas, o tratamento Sem Compactação (SC) apresentou valores mais reduzidos quando comparados aos demais, embora diferenças estatisticamente significativas tenham sido encontradas apenas em algumas camadas em Adelholm e Vagrerup 2 (Figura 2.5).

Apesar de não haver diferença significativa entre os tratamentos abaixo da camada de 0,20 m, há uma tendência de redução da RP para todos os tratamentos sob preparo convencional. Por outro lado, sob preparo reduzido, há uma tendência de aumento da RP que aos 0,30 m fica em torno de 2,5 MPa. Stone e Da Silveira (1999) verificaram valores limitantes de RP (>2 MPa) na camada abaixo de 0,10 m de profundidade em um Latossolo Vermelho escuro, e concluiu que a grade aradora usada no preparo do solo propiciou uma camada mais compacta entre 0,10 e 0,24 m de profundidade. Resultados similares também foram obtidos por Sweeney et al. (2006).

Por outro lado, em outro estudo com implementos pesados, a camada compactada, denominada de pé de arado, identificada através da RP, esteve a 0,27-0,32 m (SHAFER-LANDEFELD et al., 2004). Valores de densidade do solo relativamente altos na camada de 0,23-0,27 m quando comparados às camadas adjacentes sob preparo convencional foram constatados por Riley et al. (2004). O peso das máquinas e a pressão que as mesmas exercem no solo influenciam diretamente na profundidade e distribuição desta camada mais compactada, que geralmente faz parte do subsolo segundo Alakukku et al. (2003).

Quando analisadas a linha e entrelinha da cultura da beterraba açucareira, os tratamentos sob preparo convencional obtiveram valores reduzidos de RP nos primeiros centímetros (Figura

4.6) que pode ser devido, principalmente, ao preparo do solo pré-semeadura que é feito até 0,03 m de profundidade. A maior diferença entre a linha e entrelinha para todos os tratamentos se inicia aos 0,10 m de profundidade e se estende até 0,20 m. Os valores de RP na linha em Baixa Carga (BC), Alta Carga (AC) e Carga do trator (CT) chegam a ultrapassar 2 MPa, indicando que as pressões aplicadas no solo pelo rodado da semeadora ou do trator, tendem a se concentrar nesta camada, se dissipando na entrelinha. Os resultados de Da Veiga et al. (2007) não indicam diferenças entre a Linha e Entrelinha para o preparo convencional com os valores de RP menores que 2 MPa, entretanto o trator utilizado nas operações de campo pesava 4 Mg.

Os resultados para o tratamento Carga do trator (CT) na entrelinha apresentaram valores bem de RP elevados, superando os tratamentos SC, BC e AC na Linha até 0,13 m e depois se mantiveram próximo do tratamento Sem Compactação na Linha. Resultados obtidos por Sweeney et al. (2006) analisando o rodado do trator em um solo franco siltoso, demonstram que a RP na Linha esteve acima de 2 MPa na profundidade de 0,10 m, enquanto que na Entrelinha a RP ficou em torno de 1,2 MPa. Os valores de RP tanto na Linha quanto na Entrelinha demonstram que a Carga do trator (CT) tem causado efeitos detrimenais na estrutura do solo, principalmente abaixo da camada de 0,10 m, sinalizando por maiores cuidados com as operações de campo realizadas com o trator.

As cargas aplicadas pela semeadora (Baixa Carga e Alta Carga) proporcionaram valores de RP na camada entre 0,10 e 0,20 m em torno de 2 MPa, sugerindo que a aplicação destas cargas pela semeadora pode resultar em problemas no crescimento de raízes e consequentemente na produtividade da cultura. Entretanto, outros fatores, como as condições climáticas durante o ciclo da cultura, o tipo de cultura, etc., podem ter influência na magnitude dos efeitos negativos causados por estes valores limitantes de RP nesta camada.

2.5 Conclusões

A hipótese do trabalho foi confirmada onde as propriedades físicas do solo apresentaram alterações de acordo com a carga aplicada sobre o solo. Os efeitos da pressão no solo acarretaram em aumento da densidade do solo (Ds) em superfície, ocasionando em geral, aumento na sequência $CT < BC < AC < CT$. A resistência à penetração (RP) variou em profundidade. A Carga do trator apresentou os maiores valores de RP enquanto que Sem Compactação apresentou os

menores valores ou não diferiu dos demais (Alta Carga e Baixa Carga). O incremento de carga na semeadora entre os tratamentos Baixa Carga e Alta Carga foram intermediários.

Referências

- ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; VAN DER LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 145-160, 2003.
- ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 39, p.175-197, 1996.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. chap.13, p. 363-375.
- CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 2. Equipment and field practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 161-174, 2003.
- CHAN, K.Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R.C.; DEAR, B.S.; PEOPLES, M.B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 13-21, 2006.
- DA VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.; REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 104-113, 2007.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 2006. 306 p.
- FAO. **FAO/UNESCO soil map of the world, revised legend**. Rome: FAO; ISRIC, 1988. 138 p. (World Resources Report 60).
- GRAVETTER, F.J.; WALLNAU, L.B. **Statistics for the behavioral sciences**. 2nd ed. St. Paul: West Publishing, 1995. 429 p.
- HORN, R.; ROSTEK, J. Subsoil compaction processes – state of knowledge. In: HORN, R.; VAN DEN AKKER, J.J.H.; ARVIDSSON, J. (Ed.). **Subsoil compaction: distribution, processes and consequences**. Reiskirchen: Catena Verlag, 2000. p. 44-54.

- HORN, R.; VAN DEN AKKER, J.J.H.; ARVIDSSON, J. (Ed.). **Subsoil compaction: distribution, processes and consequences**. Reiskirchen: Catena Verlag, 2000. 462 p.
- HORN, R.; WAY, T.; ROSTEK, J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 101-106, 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 Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 23-36, 1995.
- IMHOFF, S.; DA 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.
- KELLER, T.; TRAUTNER, A.; ARVIDSSON, J. Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, p. 39-47, 2002.
- KELLER, T. **Soil compaction and soil tillage: studies in agricultural soil mechanics**. 2004. Thesis (PhD in Soil Science) – Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 2004.
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 450-457, 1980.
- LIEBIG, M.A.; JONES, A.J.; MIELKE, L.N.; DORAN, J.W. Controlled wheel traffic effects on soil properties in ridge tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 1061–1066, 1993.
- PAYTON, M.E.; MILLER, A.E.; RAUM, W.R. Testing statistical hypotheses using standard errors bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, p. 547-551, 2000.
- RILEY, H.C.F.; BLEKEN, M.A.; ABRAHAMSEN, S.; BERGJORD, A.K.; BAKKEN, A.K. Effects of alternative tillage systems on soil quality and yield of spring cereals on silty clay loam and sandy loam soils in the cool, wet climate of central Norway. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 80, p. 79-93, 2005.
- SAS INSTITUTE. **SAS/GRAPH® 2000 software: reference**, version 8. Cary, 2000. v. 2, 1272 p.
- SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery—Soil physical and mechanical aspects. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, p. 28-43, 2007.

SCHÄFER-LANDEFELD, L.; BRANDHUBER, R.; FENNER, S.; KOCH, H-J.; STOCKFISCH, N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 75, p. 75-86, 2004.

SOANE, G.C.; GODWIN, R.J.; SPOOR, G. Influence of deep loosening techniques and subsequent wheel traffic on soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 8, p. 231-237, 1986.

SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W.; PAINTER, DJ. Compaction by agricultural vehicles: a review. II. Compaction under tyres and other running gear. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 1, p. 373-400, 1981.

STONE, L.F.; DA SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 83-91, 1999.

STONE, R.J.; EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v. 60, p. 15-24, 1995.

SWEENEY, D.W.; KIRKHAM, M.B.; SISSON, J.B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 637-643, 2006.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relations to coarse textured materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, n.1, p. 18-22, 1966.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 301-309, 1998.

YAVUZCAN, H.G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 200-215, 2005.

3 PROPRIEDADES FÍSICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS NUM SOLO SOB PLANTIO DIRETO

Resumo

O sistema de plantio direto tem sido adotado como uma das estratégias mais eficientes para o controle da erosão e da degradação dos solos. Entretanto, a ausência de revolvimento em associação com o tráfego contínuo de máquinas e equipamentos pode resultar em efeitos detrimental na estrutura do solo, causando perdas na sua qualidade para a produção agrícola. Com isto, a análise dos processos responsáveis pelo funcionamento físico do solo torna-se importante para a tomada de decisões a respeito do manejo do solo em sistema de plantio direto a longo prazo. O objetivo deste estudo foi avaliar algumas propriedades dinâmicas e estáticas em diferentes camadas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado em sistema de plantio direto há 14 anos, no município de Ponta Grossa, Paraná. Amostras de solo foram coletadas em diferentes camadas a 0,10, 0,20-0,30, 0,40-0,50 e 0,60-0,70 m de profundidade para a determinação das propriedades físicas do solo. A densidade do solo (D_s), a porosidade total (P_t) e a macroporosidade foram quantificadas como propriedades estáticas; adicionalmente, a qualidade física do solo foi também avaliada pelo parâmetro S em cada camada estudada. A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e a permeabilidade intrínseca ao ar (K_a) foram quantificadas como determinantes dos processos relacionados à dinâmica dos fluidos ar e água. As propriedades estáticas do solo demonstraram a existência de uma camada mais densa na profundidade de 0,20-0,30 m, sendo que para D_s e P_t os valores nesta camada foram significativamente diferentes das demais camadas. Quanto as propriedades dinâmicas, verificaram-se maiores valores de K_{sat} e K_a em superfície. Os valores de K_{sat} foram de $7,79 \times 10^{-5}$, $2,76 \times 10^{-5}$, $1,58 \times 10^{-5}$ e $1,91 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ para as camadas relativas às profundidades de camadas a 0,10, 0,20-0,30, 0,40-0,50 e 0,60-0,70 m de profundidade enquanto que, nestas profundidades, os valores de K_a foram de $3,70 \times 10^{-11}$, $2,04 \times 10^{-11}$, $7,69 \times 10^{-12}$ e $1,10 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, indicando uma melhor troca de gases e água nas camadas acima de 0,30 m. O parâmetro S , indicou que o solo boa qualidade física em todas as camadas estudadas. O incremento de D_s na camada de 0,20-0,30 m pode resultar em perda da qualidade física e estrutural do solo.

Palavras-chave: Plantio direto; Propriedades físicas do solo; Qualidade física do solo; Parâmetro S

STATIC AND DYNAMIC PROPERTIES IN SURFACE AND SUBSURFACE UNDER NO-TILLAGE SYSTEM

Abstract

The no-tillage system has been adopted in worldwide mainly as strategy to reduce the negative effect from the conventional systems of soil tillage. However, the no-tillage can cause detrimental effects on the soil structure leading to the soil compaction and the reduction of crop yield. Moreover, the functionality of the system by soil physical properties becomes important for the taking of decisions on the implantation and the management of the no-tillage system. The objective of this study was to evaluate dynamic and static properties under a long term of no-

tillage system in surface and subsurface. Bulk density (Ds), total porosity (Pt) and the macroporosity were determined and analyzed, as static properties, the soil physical quality was evaluated by the *S* parameter in each studied depth, whereas, saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) and intrinsic air permeability (K_a) were the dynamic properties. The study was carried out in a dark red Latossol under no-tillage system with 14 years old, in Ponta Grossa, Paraná, Brazil. Soil samples were collected at different depths to 0.10, 0.20-0.30, 0.40-0.50 and 0.60-0.70 m for the determination of the soil physical properties to be studied. The soil static properties demonstrated the existence of a denser layer in the depth of 0.20-0.30 m, being that for Ds and Pt the values in this layer were significantly different of the other layers. However, the values of Ds, Pt and macroporosity, had revealed adequate for the growth and development of roots. The soil dynamic properties presented greater values for K_{sat} e K_a in surface. K_{sat} values were $7,79 \times 10^{-5}$, $2,76 \times 10^{-5}$, $1,58 \times 10^{-5}$ e $1,91 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, for the respective depths, and for K_a were $3,70 \times 10^{-11}$, $2,04 \times 10^{-11}$, $7,69 \times 10^{-12}$ e $1,10 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, indicating that the exchange of gases and water at the layers above of 0.30 m is better. The *S* parameter indicated that the soil has a good structure in all the studied layers, but that a small increment in the Ds at the layer of 0.20-0.30 m can lead to the detriment of the soil structure.

Keywords: No-tillage; Soil physical properties; Soil physical quality; *S* Parameter

3.1 Introdução

O sistema de plantio direto tem sido amplamente utilizado em diversas regiões do mundo como uma estratégia eficiente para o controle das perdas de solo e água devido a erosão, ocupando cerca de 95 milhões de hectares de terras (NO-TILLAGE, 2006). No Brasil, em 2003/2004 este sistema ocupava aproximadamente 23 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2006). A região Sul do Brasil foi a pioneira na introdução do sistema de plantio direto no Brasil e, especificamente, o estado do Paraná tem uma área significativa sob o sistema de plantio direto, onde diversos estudos foram realizados desde o começo dos anos 70 (IAPAR, 1981; BORGES FILHO, 2001; SÁ et al., 2001).

Vários fatores contribuem para a qualidade do sistema de plantio direto, destacando-se o domínio da tecnologia pelos agricultores, a grau de degradação do solo antes da sua implantação, a produção de cobertura, o sistema de manejo cultural, dentre outros (RHOTON, 2000; FERRERAS et al., 2000). No entanto, são poucos os estudos que quantificam os processos ligados a funcionalidade física do solo do ponto de vista agronômico.

As propriedades físicas do solo relacionadas à forma e estabilidade estrutural do solo em sistemas de plantio direto têm sido cada vez mais estudadas. O aumento da compactação do solo em sistemas de plantio direto tem sido verificado em diferentes solos e condições climáticas

(TEBRÜGGE; DÜRING, 1999; OLIVER et al., 2002; FABRIZZI et al., 2005), apesar de alguns estudos indicarem a ausência de compactação do solo (LOGSDON; KARLEN, 2004; FILIPOVIC et al., 2006). Destaca-se que a maioria destes estudos levou em consideração apenas as camadas superficiais.

Alguns estudos têm evidenciado que o sistema de plantio direto promove melhorias significativas na retenção de água, na estabilidade de agregados, no controle da temperatura, em comparação com sistemas convencionais de preparo do solo (KEMPER; DERPSCH, 1981; SIDIRAS; PAVAN 1986; RHOTON, 2000). A maior atividade biológica no sistema de plantio direto incrementa a estabilidade estrutural no solo e proporciona a formação de rede de poros contínuos e interconectados, que atuam como rotas alternativas para o crescimento das raízes e para o transporte de fluídos no solo (OSUNBITAM et al., 2005), apesar de uma matriz do solo mais densa. Fabrizzi et al. (2005) argumenta que embora a compactação do solo possa ocorrer, nem sempre a mesma reflete em efeitos detrimenais para culturas sob o sistema de plantio direto.

A densidade do solo é a propriedade física do solo mais utilizada como indicadora da compactação e do impedimento mecânico do solo às plantas. Resultados de diversos estudos revelam maiores valores de densidade do solo até 0,30 m (GOMEZ et al., 1999; OLIVER et al., 2002; DAM et al., 2005; SINGH; MALHI, 2006) em relação ao preparo convencional do solo, apesar da similaridade da densidade entre eles (XU; MERMOUD, 2001; ANKEN et al., 2004). Cardoso et al. (2006) indicam que camadas mais compactadas no solo não afetam a produtividade de grãos e a acumulação de matéria seca na cultura da soja, desde que não ocorram restrições de água para as plantas. Contudo, Ferreras et al. (2000) indicam redução no crescimento de raízes de trigo, no acúmulo de matéria seca e em seu rendimento em consequência da compactação do solo verificada no sistema de plantio direto, independentemente de haver restrição de água ou não.

A influência da compactação do solo sob plantio direto sobre o rendimento das culturas pode estar mais associado as propriedades que controlam os processos dinâmicos do solo como, a aeração e a transmissão de água que as propriedades estáticas, como densidade do solo, textura, etc. Além disso, as propriedades físicas do solo variam em profundidade, afetando a qualidade do solo de maneiras diferentes conforme a profundidade, o que pode interferir de maneira distinta nas plantas cultivadas (Shukla et al., 2005).

A hipótese deste trabalho é de que mesmo havendo indícios de compactação sob sistema de plantio direto, as propriedades que controlam os processos dinâmicos mantém a funcionalidade

do sistema para o desenvolvimento das culturas. O objetivo deste estudo foi avaliar propriedades físicas dinâmicas e estáticas nas camadas superficiais e subsuperficiais de um solo cultivado por longo prazo em sistema de plantio direto. A densidade do solo, a porosidade total e a macroporosidade, drenada no potencial de -10kPa, foram quantificadas como propriedades estáticas assim como, a qualidade física do solo foi avaliada pelo parâmetro S em cada profundidade estudada, enquanto que a condutividade hidráulica saturada e a permeabilidade intrínseca ao ar definiram as propriedades dinâmicas.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área experimental e amostragem

O estudo foi realizado no município de Ponta Grossa, Estado do Paraná, (25°05' 52" S, 50°02' 43" O) na Fazenda Escola da Universidade de Ponta Grossa – UEPG. O solo foi identificado como Latossolo Vermelho distrófico (Embrapa, 1999), com teores de médios de 430, 70 e 500 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente, apresentando textura argilo arenosa com acréscimo do conteúdo de argila em profundidade (Tabela 3.1). O clima local foi classificado de acordo com o sistema de Koppen como mesotérmico, subtropical úmido do tipo Cfb, com precipitação média anual de 1545 mm e temperatura média anual 18,7° C a 1024 m de altitude. A área tem sido manejada sob sistema de plantio direto há 14 anos, e neste período a mesma vem sendo submetida à rotação de culturas com soja, milho, feijão, trigo, aveia-preta, ervilhaca e tremoço.

Tabela 3.1 - Dados de granulometria, carbono orgânico, densidade de partícula (Dp) e densidade do solo (Ds)

<i>Profundidade (m)</i>	<i>Argila <0,002 (g/kg)</i>	<i>Silte 0,002 (g/kg)</i>	<i>0,05- mm</i>	<i>Areia 2-0,05 mm (g/kg)</i>	<i>Carbono orgânico (g/kg)</i>	<i>Dp (g/cm³)</i>	<i>Ds (g/cm³)</i>
0-0,10	393	67		540	20,0	2,57	1,16
0,20-0,30	421	54		525	14,3	2,57	1,23
0,40-0,50	445	74		481	12,8	2,61	1,17
0,60-0,70	471	81		448	11,6	2,62	1,12

A amostragem foi realizada em julho de 2005. Três trincheiras (1 x 1,5 x 0,80 m) foram abertas e amostras indeformadas de solo foram coletadas nas profundidades de 0-0,10, 0,20-0,30,

0,40-0,50, 0,60-0,70 m usando anéis volumétricos com diâmetro interno e altura de 0,05 m. Amostras deformadas também foram coletadas para as análises granulométrica (GEE; BAUDER, 1986), densidade de partículas (BLAKE; HARTGE, 1986) e retenção de água em baixos potenciais. A amostragem foi feita utilizando nove repetições por profundidade, totalizando 36 amostras de solo.

3.2.2 Condutividade hidráulica saturada

Condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) foi obtida de acordo com método da carga decrescente (REYNOLDS; ELRICK, 2002). As amostras em anéis volumétricos foram saturadas com água e colocadas em um equipamento para a aplicação de carga hidráulica ilustrado na Figura 3.1. Este equipamento é composto de um recipiente com um orifício, no qual ao se abrir permite que a água escoe estabelecendo um fluxo de água através da amostra de solo dentro do recipiente. O deslocamento de água sobre a amostra de solo, de altura L , no tempo t , corresponde a um deslocamento de água entre duas alturas (h_0 e h_1), e a K_{sat} pode então ser calculada através da Equação 1:

$$K_{sat} = (L/t) \ln (h_0/h_1) \quad (1)$$

Onde L , h_0 e h_1 são alturas dadas em metros (m), t é o tempo em segundos (s) e, K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada mm h^{-1} .

Figura 3.1 – Ilustração do instrumento utilizado para determinar a condutividade hidráulica saturada pelo método Falling-Head

3.2.3 Permeabilidade intrínseca ao ar (K_a)

Depois de medido a condutividade hidráulica saturada as amostras foram drenadas no potencial de -10 kPa, equivalente à capacidade de campo, em placas porosas (Klute, 1986). Depois de atingir o equilíbrio as amostras foram colocadas num equipamento ilustrado na Figura 3.2, para quantificar o fluxo de ar conforme McKenzie e Dexter (1996).

Figura 3.2 – Ilustração do instrumento usado para medir a permeabilidade intrínseca ao ar de amostras indeformadas de solo

Segundo McKenzie e Dexter (1996) a permeabilidade ao ar, K_a , de amostras indeformadas pode ser determinada no laboratório conhecendo-se o decréscimo da pressão do ar no interior do reservatório em função do tempo. O ar flui através da amostra e a pressão do interior do reservatório diminui exponencialmente. Esta redução de pressão no interior do reservatório foi registrada por um sistema de aquisição de dados, em intervalos de um segundo, até que todo ar contido no reservatório passasse pela amostra. A inclinação (S) da equação obtida é composta por variáveis que se mantêm constantes e por K_a , fazendo com que a permeabilidade intrínseca ao ar da amostra possa ser facilmente isolada da inclinação S da curva de ajuste (Eq. 2).

$$K_a = \frac{\mu L V}{A P_a} \cdot |S| \quad (2)$$

Sendo, μ a viscosidade dinâmica do ar (kg m^{-1}), L o comprimento da amostra (m), V o volume do reservatório (m^3), A a área da amostra do solo exposta ao fluxo de ar (m^2), P_a a pressão do ar atmosférico (kPa) e $|S|$ o módulo da inclinação (linearizada pelo decréscimo da pressão com o tempo) e K_a é a permeabilidade ao ar, dada em m^2 .

3.2.4 Densidade do solo e porosidade

As amostras indeformadas depois de utilizadas na determinação da CRA, da K_{sat} e da K_a foram secas em estufa a 105°C por 24 h para a obtenção da massa seca do solo. A densidade do solo foi determinada conforme Blake e Hartge (1986). A porosidade total do solo foi calculada considerando o volume de água (densidade = 1 Mg m^{-3}) contida nas amostras quando saturadas, uma vez que este é o mesmo que o volume de poros da amostra. A macroporosidade foi calculada pela diferença entre o volume do conteúdo de água na capacidade do campo (-10 kPa) e a porosidade total.

Todas as análises estatísticas foram executadas usando o software estatístico SAS/STAT (SAS INSTITUTE, 2000). A comparação entre médias em cada profundidade foi feita usando o modelo matemático ($\hat{y} = m \pm \xi$), onde o $\hat{y}$ é valor estimado em função da média aritmética (m) e do erro padrão da média (ξ) de acordo com Gravetter and Wallnau (1995).

3.2.5 Parâmetro S

Para determinar o parâmetro S , as amostras indeformadas foram saturadas com água por 24 horas e submetidas aos seguintes potenciais -1, -2, -4, -8, -10 e -25 kPa. Para isto, foram utilizadas câmeras de baixa pressão ligadas a um manômetro digital para verificar a pressão aplicada. Os blocos de solo foram manualmente destorroados em agregados com diâmetro médio de cerca de 4 mm, os quais foram submetidas aos potenciais de -100, -200, -400, -800 e -1500 kPa em placas porosas, conforme Klute (1986). Em seguida, as amostras foram secadas em estufa a 105°C por 24 h para a determinação do conteúdo de água (θ) em cada potencial (ψ).

A curva de retenção de água do solo (CRA) foi ajustada por meio da equação de Van Genuchten (1980). O parâmetro S foi calculado como o valor da inclinação, em módulo, da tangente à curva de retenção no seu ponto de inflexão. A qualidade física do solo foi então

avaliada de acordo com Dexter (2004), comparando valores de S obtidos com as classes de valores de S associados as diferentes categorias de qualidade física do solo.

3.3 Resultados

Diferenças estatísticas entre profundidades foram encontradas em relação à densidade de partículas, densidade do solo, porosidade total e macroporosidade do solo. O maior valor médio de densidade do solo foi de $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$ e o menor $1,12 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 3.1). O maior valor médio de densidade do solo foi encontrado na camada 0,20-0,30 m, apresentando diferença estatisticamente significativa quando comparado às demais profundidades (Figura 3.3a). Na camada de 0,60-0,70 m verificou-se o menor valor médio de D_s , porém não diferiu estatisticamente da camada (0-0,10 m). Quando analisada a camada de 0,40-0,50 m foi possível verificar que esta apresentou valores de densidade intermediários entre superfície (0-0,10 m) e a camada mais profunda (0,60-0,70 m), sendo significativamente igual a essas duas camadas ($P < 0,05$).

A D_s teve um efeito direto sobre a porosidade total e a macroporosidade. Em relação à porosidade total, os menores valores obtidos foram verificados na camada de 0,20-0,30 m, a qual diferiu estatisticamente das demais camadas (Figura 3.3b). As camadas de 0-0,10 m e 0,60-0,70 m apresentaram a maior porosidade total, sendo estatisticamente iguais. A macroporosidade seguiu a mesma tendência da porosidade total. Entretanto, a camada de 0,20-0,30 m foi estatisticamente diferente comparada a camada superficial e a camada de 0,60-0,70 m, entretanto não diferiu da camada 0,40-0,50 m. Os maiores valores de macroporosidade também ocorreram nas camadas de 0-0,10 e 0,60-0,70 m.

A qualidade física do solo foi estimada pelo parâmetro S . Diferenças estatisticamente significativas foram encontradas entre profundidades, onde a camada de 0,20-0,30 m apresentou o menor valor de S (Figura 3.4). A camada de 0,30-0,40 m também foi diferente da camada de 0,60-0,70m. A Figura 2.5 mostra a relação entre o parâmetro S e densidade do solo, indicando uma boa relação entre estas variáveis. A equação ajustada aos dados obteve um coeficiente de determinação de 61%, em que os valores de S foram negativamente correlacionados com a densidade do solo. A densidade crítica do solo, ou seja, o valor de densidade no qual o solo se encontra no limite entre uma boa estrutura e uma estrutura fraca, foi calculada através da equação

obtida na Figura 3.5. Considerando o valor crítico de S de 0,035, a densidade crítica correspondeu a $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$.

Figura 3.3 - Densidade do solo (a), porosidade total e macroporosidade (b) em diferentes profundidades sob o sistema do plantio direto. As barras dos erros indicam $\pm \text{SE}$ ($n=9$)

Figura 3.4 - Valores médios do parâmetro S em diferentes profundidades. As barras dos erros indicam $\pm$ SE ($n=9$), entre profundidades. A linha tracejada indica o limite de $S=0,035$

Figura 3.5 - Valores de S na função da densidade de maioria do solo

As propriedades dinâmicas, condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e a permeabilidade intrínseca ao ar do solo (K_a), comportaram-se similarmente (Figura 3.6). Tanto a K_{sat} e a K_a obtiveram valores significativamente maiores na camada de 0-0,10 m, em comparação com as outras camadas. Não houve diferenças significativas entre as camadas subsuperficiais para K_{sat} , entretanto, na profundidade de 0,40-0,50 m foi verificado o menor valor médio da mesma. Em relação à K_a uma diferença estatisticamente significativa entre 0,20-0,30 m e a camada de 0,30-0,40 m foi verificada. Para K_{sat} o coeficiente de variação (CV) foi de 83,67, 92,54, 60,08 e 88,84% enquanto que para a K_a o CV foi de 25,51, 123,37, 52,40 e 75,67% para as profundidades de 0-0,10, 0,20-0,30, 0,40-0,50 e 0,60-0,70 m respectivamente.

Figura 3.6 - Condutividade hidráulica saturada e permeabilidade intrínseca ao ar em diferentes profundidades. As barras dos erros indicam o $\pm$ SE ($n=9$) entre profundidades.

Os valores de K_{sat} foram de $7,79 \times 10^{-5}$, $2,76 \times 10^{-5}$, $1,58 \times 10^{-5}$ e $1,91 \times 10^{-5} m\ s^{-1}$, respectivamente para as profundidades de 0-0,10, 0,20-0,30, 0,40-0,50 e 0,60-0,70 m. Os valores

médios de K_a foram de $3,70 \times 10^{-11}$, $2,04 \times 10^{-11}$, $7,69 \times 10^{-12}$ e $1,10 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ respectivamente, para as profundidades estudadas.

3.4 Discussão

O conteúdo de carbono decresceu e o de argila cresceu no perfil do solo, em profundidade conforme Tabela 1. Logsdon e Karlen (2004) encontraram a mesma tendência, salientando que quantidades mais elevadas de carbono orgânico podem resultar menores valores de densidade do solo, o que explica os menores valores de D_s verificados nas camadas superficiais.

As propriedades estáticas demonstraram que a 0,20-0,30 m de profundidade, há uma camada mais densa quando comparada com as outras camadas estudadas (Figura 3.3). A redução da porosidade total e da macroporosidade, assim como, o aumento da densidade do solo na camada de 0,20-0,30 m, indicam uma provável ocorrência de compactação do solo nesta profundidade, embora não haja evidências de que esta esteja causando algum efeito prejudicial no rendimento das culturas. Observa-se que a superfície e a camada mais profunda da subsuperfície possuem similaridades, apresentando valores mais reduzidos de densidade do solo e maior porosidade total e macroporosidade. Estes resultados sugerem que a ausência de revolvimento do solo pode ter contribuído para a ocorrência de canais formados por raízes deterioradas e atividade de mesofauna no solo.

A amplitude de valores de densidade do solo encontrados neste estudo é similar aos resultados de Oliver et al. (2002) em um solo semelhante. Entretanto, valores de densidade do solo comparativamente mais altos aos deste estudo foram encontrados por outros pesquisadores (TORMENA et al., 1998; FABRIZZI et al., 2005; CARDOSO et al., 2006). De fato a camada mais densa (0,20-0,30m) pode ser decorrente de compactação pretérita resultante de equipamentos usados no preparo convencional antes da implantação do sistema de plantio direto.

Alguns estudos sobre plantio direto demonstraram que a densidade do solo foi menor na camada de 0-0,10 m do que nas camadas subjacentes (FERRERAS et al., 2000; DAM et al., 2005; FABRIZZI et al., 2005), concordando, em parte, com os resultados obtidos neste estudo. Entretanto, Machado et al. (2001) e Oliver et al. (2002) verificaram que abaixo de 0,30 m, os valores de densidade do solo tendem a tornar-se relativamente menores, corroborando com os menores valores de D_s encontrados neste estudo abaixo da camada de 0,30 m. Contudo, o

comportamento da D_s pode variar conforme as classes texturais apresentando valores de D_s mais altos em camada mais profundas, o que foi verificado por diversos autores (ANKEN et al., 2004; LOGSDON; KARLEN, 2004; FILIPOVIC et al., 2005; BHATTACHARYYA et al., 2006).

Tormena et al. (1998) e Abreu et al. (2004) encontraram menores valores de porosidade total e macroporosidade e maiores para a densidade do solo quando comparados com os resultados obtidos neste estudo, indicando condições mais propícias para o crescimento de raízes neste solo. Por outro lado, em um Latossolo argiloso altamente compactado Cardoso et al. (2006) obtiveram resultados onde a porosidade total foi em torno de 16 e 28% maior, respectivamente para 0-0,10 e 0,20-0,30 m de profundidade, e a macroporosidade foi cerca de 28 e 12% menores nas mesmas profundidades, comparados com os resultados deste estudo. A macroporosidade é responsável pela troca de gases e água no solo, de modo que estes resultados indicam que uma pequena redução na porosidade total pode não afetar a funcionalidade do solo para o crescimento das culturas.

Os valores de K_{sat} e K_a mostraram uma alta variabilidade, em acordo com Tsegaye e Hill (1998) e Warrick e Nielsen (1980), os quais salientam que a variabilidade de K_{sat} é normalmente alta, alcançando valores de CV de até 190%. Maiores valores de K_{sat} e K_a foram encontrados em superfície e podem ser atribuídos ao tipo e à forma dos poros presentes nesta camada e não necessariamente à quantidade deles. Segundo Bhattacharyya et al. (2006) a condutividade hidráulica saturada é altamente dependente do tamanho, da continuidade e do arranjo dos poros. A presença de raízes e a atividade biológica, como minhocas, insetos, etc., na superfície, pode ter fornecido uma melhor conectividade dos poros, melhorando a K_{sat} e a K_a , em superfície. Isto está de acordo com Azooz e Arshed (1996) onde indicam que, canais formados por raízes de plantas quando deterioradas, melhoram tanto a permeabilidade do ar e quanto a condutividade da água. Por outro lado, Schjonning e Rasmussen (2000) concluíram em um estudo com diferentes solos sob semeadura direta que em superfície (0-0,20 m) houve uma reduzida continuidade de poros e, abaixo de 0,20 m foi encontrada uma maior continuidade de macroporos para um solo franco siltoso.

Os resultados de K_{sat} foram em média similares àqueles encontrados por Heard et al. (1988), que avaliou um solo franco argilo siltoso com o 32% de argila sob sistema de plantio direto a longo prazo. Os resultados destes autores apresentaram um valor médio de K_{sat} para a profundidade 0-0,40 m de $4,31 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Os resultados encontrados nesse estudo foram

elevados quando comparados com valores médios de outros estudos em solos sob sistema de plantio direto a longo prazo com 25% de argila ($3,5 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$) (FERRERAS et al., 2000), com 19,3% de argila ($4,2 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$) (BHATTACHARYYA et al., 2006) e com 26% de argila ($3,54 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$) (AZOOZ; ARSHED, 1996). Isto sugere que a transmissão de água no solo estudado está funcional após um longo prazo sob plantio direto, proporcionando o suprimento de água adequadamente às raízes das plantas. Este fato pode ser decorrente da maior distribuição de poros contínuos sob plantio direto em relação à outros sistemas de preparo (OSUNBITAN et al., 2005; WEILL et al., 2004).

Os valores de K_a estão dentro da faixa de valores encontrados por McKenzie e Dexter (1996) em um solo franco arenoso, no potencial de -10 kPa. Schjonning (1989) avaliou a permeabilidade intrínseca ao ar neste mesmo potencial de água, em dois solos, arenoso e franco, sob cultivo mínimo à longo prazo. Os valores encontrados pelo autor foram próximos de $8,1 \times 10^{-12}$ e $1,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, respectivamente para o arenoso e o franco, na profundidade de 0,05-0,10 m, havendo um crescente aumento destes valores em profundidade para ambos os tipos de solo, onde uma tendência de maiores valores de K_a ocorreu na camada de 0,20-0,30 m. Embora, o conteúdo de argila nestes solos seja diferente do solo estudado neste trabalho, os menores valores encontrados pelo autor coincidem com o menor valor de K_a obtido em nosso trabalho, porém, em camadas diferentes. Além disso, Mielke e Wilhelm (1998) encontraram valores ainda menores de K_a comparados aos encontrados neste estudo, em torno de 7×10^{-12} e $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, até 0,30 m de profundidade. Ademais, o solo analisado pelos autores era de textura franca sob plantio direto e em condições mais secas que as utilizadas em nosso experimento. Isto indica que os resultados de K_a em nosso estudo tem proporcionado uma troca gasosa no solo satisfatória.

As propriedades estáticas, como a densidade do solo, a porosidade total e a macroporosidade demonstraram que na camada de 0,20-0,30 m existe algum efeito detrimental na estrutura do solo, devido a mais alta densidade do solo e aos valores mais baixos de porosidade total e macroporosidade (Figura 3.3). Já as propriedades dinâmicas, como a condutividade hidráulica saturada e a permeabilidade intrínseca ao ar demonstraram que na mesma camada há um melhor fluxo de gases e água comparadas as camadas subjacentes. A maior quantidade de poros e macroporos não têm proporcionado a melhor condutividade água e permeabilidade ao ar, corroborando com a hipótese de que a continuidade e a conectividade dos poros pode ser mais importante do que a quantidade de poros e macroporos, em sistemas do plantio direto. Entretanto,

uma conectividade de poros propícia para manter um adequado fluxo de água e ar pode ocorrer após alguns anos da implantação do sistema do plantio direto.

Com relação à qualidade física do solo avaliada pelo parâmetro S , a mesma se mostrou adequada para o solo em questão. Os valores médios do parâmetro S estão acima do limite entre solos com qualidade estrutural boa e pobre ($S = 0,035$) considerado por Dexter (2004). Isto indica que mesmo após anos sem revolver o solo, o mesmo mantém uma boa estrutura. As rotações de culturas e a cobertura do solo com a palhada, provavelmente, foram responsáveis pelo aumento do conteúdo de carbono e pela melhoria na estrutura do solo, resultando em valores de S acima do limite. De acordo com Dexter (2004), geralmente, o valor de S diminui com aumento da densidade do solo, concordando com os dados apresentados aqui, onde o menor valor de S coincide com o maior valor de densidade do solo. Entretanto, o parâmetro S é estimado através da curva da retenção da água do solo, e então, está intimamente ligado com a distribuição de poros que é uma propriedade estática. Com isto, este parâmetro de qualidade física do solo é um parâmetro estático e por isso pode ser insuficiente para explicar se o solo está sendo funcional para as culturas ou não. Machado (2006) estudou a variação de S com densidade do solo em um Latossolo vermelho distrófico sob diferentes sistemas de uso e manejo - floresta, pousio e cultivado - e encontrou que a densidade do solo explicou 92% da variação de S . O autor sugere que diferentes sistemas de manejo promovem aumento da densidade do solo implicando na redução de S , conseqüentemente, na qualidade física do solo.

Ao considerarmos o valor de S de 0,035 como limitante, a densidade crítica obtida é de $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$, isto sugere que incrementos na densidade do solo para a profundidade de 0,20-0,30 m que possui um valor médio de $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$ podem causar efeitos detrimenais nesta camada. Porém a magnitude dos efeitos ocasionados ainda não pode ser esclarecida.

3.5 Conclusões

Os resultados comprovaram a hipótese levantada. Foi verificado indícios de compactação sob sistema de plantio direto, entretanto as propriedades que controlam os processos dinâmicos mantiveram a funcionalidade do sistema, a qual foi verificada através dos resultados de K_{sat} e K_a . Verificou-se também que mesmo com bons resultados para as propriedades estáticas, em subsuperfície, pode haver um comprometimento da funcionalidade do sistema, indicado pelas

propriedades dinâmicas. Em conclusão, o plantio direto por um longo período de tempo pode apresentar efeitos detrimenais em algumas propriedades físicas do solo, como densidade do solo e porosidade total. Entretanto, o sistema solo pode continuar funcional através de melhorias estruturais do solo, provindas do não revolvimento do solo e das rotações de culturas que promoveram o aumento do carbono e a provável conectividade entre poros.

Referências

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 519-531, 2004.
- ANKEN, T.; WEISSKOPF, P.; ZIHLMANN, U.; FORRER, H.; JANS, J.; PERHACOVA, K. Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, p. 171-183, 2004.
- AZOOZ, R.H.; ARSHAD, M.A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 76, p. 143-152, 1996.
- BHATTACHARYYA, R.; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; GUPTA, H. S. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the indian Himalayas. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 129-140, 2006.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. chap.13, p.363-375.
- BORGES FILHO, E.L. **O desenvolvimento do plantio direto no Brasil** – a conjunção de interesses entre agricultores, indústrias e o Estado. 2001. 90 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J.L.; TORRES, E.; SARAIVA, O.F.; GUIMARÃES, M.F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 493-501, 2006.
- DAM, R.F.; MEHDI, B.B.; BURGESS, M.S.E.; MADRAMOOTOO, C.A.; MEHUYS, G.R.; CALLUM, I. R. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 41-53, 2005.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3, p. 201-214, 2004.

FABRIZZI, K.P.; GARCIA, F.O.; COSTA J.L.; PICONE, L.I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, p. 57-69, 2005.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/historico.htm>. Acesso em: 11 jan. 2006.

FERRERAS, L.A.; COSTA, J.L.; GARCIA, F.O.; PECORARI, C. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern “Pampas” of Argentina. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 31-39, 2000.

FILIPOVIC, D.; HUSNJAK, S.; KOSUTIC S.; GOSPODARIC, Z. Effects of tillage systems on compaction and crop yield of Albic Luvisol in Croatia. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v. 43, p. 177-189, 2006.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. chap.15, p. 383-409.

GOMEZ, J.A.; GIRALDEZ, J.V.; PASTOR, M.; FERERES, E.. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, p. 167-175, 1999.

GRAVETTER, F.J.; WALLNAU, L.B. **Statistics for the behavioral sciences**. 2nd ed. St. Paul: West Publishing, 1995. 429 p.

HEARD, J.R.; KLADIVKO, E.J.; MANNERING, J.V. Soil macroporosity, hydraulic conductivity and air permeability of silty soils under long-term conservation tillage in Indiana. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 1-18, 1988.

KEMPER, B.; DERPSCH, R. Soil compaction and root growth in Paraná. In: RUSSEL, R.S. (Ed.). **The soil/root system in relation to brazilian agriculture**. Londrina: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1981. p. 81-101.

KLUTE, A. Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. In: VAN DOREN, D. M.; ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R.; WHISLER, F.D. (Ed.). **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. Madison: ASA, 1982. chap. 3, p. 29-43.

LOGSDON, S.D.; KARLEN, D.L. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, p. 143-149, 2004.

MACHADO, J.L. **Qualidade física de solos em distintos sistemas de uso e manejo quantificada pelo índice S**. 2006. 65 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

MACHADO, P.L.O.A.; SILVA, C.A. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Netherlands, v. 61, p. 119-130, 2001.

MCKENZIE, B.M.; DEXTER, A.R. Methods for Studying the Permeability of Individual Soil Aggregates. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v. 65, p.23-28, 1996.

MIELKE, L.N., WILHELM, W.W. Comparisons of soil physical characteristics in long-term tillage winter wheat-fallow tillage experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, p. 29-35, 1998.

NO-TILLAGE. Disponível em: <http://www.rolf-derpsch.com/notill.htm>> Acesso em: 06 ago. 2006.

OLIVER, R.; DOUZET, J.M.; SCOPEL, E.; BLANCHART, E.; CURMI, P.; ALVES MOREIRA, J.A.; MINETTE, S.; GUERIN, P.; FORTIER, M.; MARAUX, F. Medium term impact of no tillage on some physical properties of a Brazilian oxisol of Cerrados (tropical humid savannah of central Brazil). In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 17.; CONFRONTING NEWREALITIES IN THE 21ST CENTURY, 2002, Bangkok. **Proceedings ...** Bangkok: Kasetsart University, 2002. p. 930-1 – 930-9.

OSUNBITAN, J.A.; OYEDELE, D.J.; ADEKALU, K.O. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sandy soil in southwestern Nigeria. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 57-64, 2005.

RHOTON, F.E. Influence of time on soil response to no-till practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 700-709, 2000.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; FILHO, S.P.V.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1486-1499, 2001.

SAS INSTITUTE. **SAS/GRAPH® software**: reference, version 8. Cary, 2000. v. 2, 1272 p.

SCHJONNING, P. Long-term reduced tillage. II. Soil pore characteristics as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 15, p. 91-103, 1989.

SCHJONNING, P.; RASMUSSEN, K.J. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, p. 69-82, 2000.

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

SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo na temperatura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, p. 181-184, 1986.

SINGH, B.; MALHI, S.S. Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 85, p. 143–153, 2006.

TEBRÜGGE, F; DÜRING, R.A. Reducing tillage intensity: a review of results from a long-term study in Germany. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 15-28, 1999.

TSEGAYE, T.; HILL, R.L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. **Soil Science**, Baltimore, v. 163, p. 143-154, 1998.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

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

XU, D.; MERMOUD, A. Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, p. 11-19, 2001.

4 DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO ATRAVÉS DE TESTES COMPRESSÃO UNIAXIAL

Resumo

O processo de compactação do solo tem sido objeto de estudo devido a utilização mais freqüente e intensa da mecanização e devido a sua influência negativa na qualidade física do solo às culturas. A pressão de preconsolidação é um indicador da capacidade de suporte de carga do solo e portanto, passível de ser utilizada como ferramenta de controle da compactação do solo. Contudo, a pressão de preconsolidação tem sido estimada utilizando diferentes métodos com base na utilização de modelos matemáticos, possibilitando diferentes estimativas para um determinado solo e condição estrutural. O objetivo deste trabalho foi comparar as predições da pressão de preconsolidação estimada por diferentes métodos de ajuste da curva de compressão de solos com ampla variação textural. Também foi estudada a correlação entre a pressão de preconsolidação e outras propriedades físicas dos solos. Amostras indeformadas de solo foram coletadas em diversos solos e diferentes profundidades em locais na Suécia, Dinamarca e Brasil. As amostras foram submetidas a testes de compressão uniaxial para a determinação da curva de compactação do solo. A pressão de preconsolidação do solo foi estimada por meio de cinco diferentes métodos de ajuste: (1) método de Casagrande (1936), utilizando o ajuste de uma função polinomial de quarto grau; (2) o intercepto da reta de compressão virgem (RCV) com a regressão dos três primeiros pontos da curva de compactação; (3) o intercepto da RCV com a regressão dos dois primeiros pontos da curva; (4) Método de Casagrande (1936) por meio do ajuste sigmoidal da equação de van Genuchten e (5) Método do intercepto, utilizando a intersecção da RVC como o eixo-x na deformação zero. Os métodos 2, 3 e 5 foram ajustados conforme Dias Júnior e Pierce (1995), enquanto o método 4 aplicado utilizando o ajuste de uma curva sigmoidal (Eq. 5) similar a equação de van Genuchten, descrito em Baumgartl e Köck (2004). O método 1, usado como padrão, resultou nos maiores valores de pressão de preconsolidação. Entre os cinco métodos estudados, o método 5 diferiu estatisticamente dos outros em todos os locais, e obteve os menores valores de pressão de preconsolidação. Os métodos 1 e 2 estimaram valores semelhantes da pressão de preconsolidação na maioria dos solos estudados. A pressão de preconsolidação média variou de 49,70 a 129,65 kPa entre os diferentes métodos. As equações polinomiais e sigmóides apresentaram um bom ajuste para a curva de compactação ($R^2=0.99$), mas os parâmetros derivados do método de Casagrande, tais como o ponto de máxima curvatura, o slope do mesmo e o slope da RCV, foram significativamente diferentes ($P<0,05$). A densidade do solo, o conteúdo de areia e o teor de matéria orgânica apresentaram reduzida correlação com a pressão de preconsolidação ($R^2=0,20$), apesar de estatisticamente significativa. Os resultados indicaram que incrementos na densidade do solo e no conteúdo de areia propiciam aumento da pressão de preconsolidação enquanto que incrementos no conteúdo de matéria orgânica reduzem a pressão de preconsolidação.

Palavras-chave: Pressão de preconsolidação; Compactação do solo; Compressibilidade do solo; Função de pedotransferência; Densidade do solo

DETERMINATION OF THE PRECOMPRESSION STRESS FROM UNIAXIAL COMPRESSION TESTS

Abstract

Soil compaction has been the subject of study for many years due to its implications for crop yield. In addition the precompression stress has become an important tool to evaluate the soil load capacity and its implications on the soil structure. There are different ways to determinate the precompression stress. The purpose of this paper was to evaluate whether precompression stress fitted by different methods would give rise to different results when a wide range of soils is tested and if there is a correlation between precompression stress and other soil physical properties. Soil cores were collected at 13 sites in Sweden, Denmark and Brazil, at different depths in the soil profile, and subjected to a uniaxial compression test. Soil precompression stress was determined using five different fitting methods: (1) Casagrande (1936) by polynomial fit; (2) the intercept of the virgin compression line (VCL, the straight portion of the preconsolidação-strain curve) and a regression with the first three points of the curve; (3) the intercept of the VCL and a regression with the first two points of the curve; (4) Casagrande (1936) by van Genuchten Eq. fit; (5) the intersection of the VCL with the x-axis at zero strain. In general, method 1, used as standard, obtained the highest precompression stress values. Among the five methods studied at least one (method 5) differed statistically from the others for all sites. For most of the sites method 1 and 2 did not show significantly different values. Mean precompression stress was between 49.70 and 129.65 kPa for the different methods. Polynomial and sigmoidal equations showed a good fitting for the compaction curve in our data set ($R^2=0.99$), but parameters comprising the Casagrande method such as point of maximum curvature, its tangent and slope of virgin compression line were different ($P<0.05$). Bulk density, sand content and organic matter had a poor correlation ($R^2=0.20$) to the precompression stress, although it was statistically significant. The precompression stress was positively correlated to bulk density and sand content and negatively to organic matter content. The study showed that the choice of method had a significant influence on the precompression stress values. Although method 1 and 4 are using the Casagrande method, results were in many cases different. For the range of stresses used in this study (up to 1000 kPa), using the van Genuchten equation was less suitable than a polynomial fitting, since the compaction curve usually did not have a sigmoidal shape, and the inflection point was sometimes outside the observed values.

Keywords: Precompression stress; Soil compaction; Compression characteristic; Polynomial; Sigmoidal

4.1 Introdução

A compactação do solo tem sido estudada há vários anos principalmente devido as suas implicações na qualidade do solo às culturas e ao meio ambiente. Diversos métodos para avaliar os efeitos da compactação sobre a qualidade do solo têm sido desenvolvidos (ALAKUKKU et al., 2003; LIPIEC; HATANO, 2003) havendo grande interesse em melhorar a exatidão dos

indicadores de compactação para futuras recomendações de controle, tanto em pequena ou grande escala. A pressão de preconsolidação é um parâmetro freqüentemente utilizado para indicar a capacidade de suporte de carga do solo, e conseqüentemente o risco de compactação do mesmo (VEENHOF; MCBRIDE, 1996; HORN; FLEIGE, 2003; IMHOFF et al., 2004; RUCKNAGEL et al., 2007). Este indicador é baseado na curva de compactação do solo e foi desenvolvido por Casagrande (1936). Por definição, a pressão de preconsolidação é o ponto que divide a curva de compactação em duas porções - a reta de compressão virgem (RCV) e a curva de recompactação. Quando o solo for submetido à pressões menores do que a pressão de preconsolidação o solo se deforma e se recupera elasticamente ao longo da curva do recompactação. Porém nas pressões maiores que a pressão de preconsolidação, a deformação do solo é plástica e irreversível (LEBERT; HORN, 1991).

Diferentes métodos de ajuste de pressão de preconsolidação têm sido utilizados por diversos pesquisadores buscando melhores formas de obtenção do mesmo. Estudos investigando diferenças entre os métodos de ajuste da pressão de preconsolidação foram desempenhados por Dias Júnior e Pierce (1995), Arvidsson e Keller (2004), Baumgartl e Köck (2004) e Gregory et al. (2006). As características do solo podem interferir nas estimativas da pressão de preconsolidação, e assim, alguns métodos podem ser mais propícios para determinados solos. Por exemplo, Gregory et al. (2006) relatou que o modelo polinomial para ajustar a curva de compactação e estimar a pressão de preconsolidação foi menos exato para solos com baixos conteúdos de argila.

Equações não-lineares para ajustar a curva de compactação do solo, o qual proporciona mais flexibilidade no ajuste, foram sugeridas por Fritton (2001), Assouline (2002) e Fritton (2006). Suas respectivas equações são mostradas abaixo:

$$\rho = \rho_m - (\rho_m - \rho_0) \{1 + [\alpha (\sigma + 1)]^n\}^m \quad (1)$$

$$\rho = \rho_0 - (\rho_m - \rho_0) [1 - e^{-\Omega (de K \sigma)}] \quad (2)$$

$$\rho = \rho_m - (\rho_m - \rho_0) [1 + \{\alpha \sigma\}^{(n1+n2/m)}]^{-m} \quad (3)$$

onde ρ é a densidade do solo final ($Mg\ m^{-3}$), ρ_0 é a densidade do solo inicial, ou seja densidade do solo para o valor de pressão zero (0 kPa), ρ_m é a densidade do solo máxima ou a densidade de partículas, σ é a pressão aplicada (kPa) e α , n , $n1$, $n2$, m , K , ω são os parâmetros empíricos determinados pelo ajuste. Contudo não é realístico considerar a densidade de partículas

como a máxima densidade do solo, mesmo quando pressões elevadas forem aplicadas. Baumgartl e Köck (2004) citam que a mínima (residual) razão de vazios é dependente da máxima densidade resultante do empacotamento das partículas do solo, o qual leva em consideração o volume de espaços que não podem ser preenchidos pelas partículas. Os autores sugeriram usar a equação de van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980) para ajustar os dados, tendo em vista o fato de que informações mecânicas do solo podem ser incluídas nesta função contínua.

A busca de métodos mais práticos para determinar a pressão de preconsolidação tem levado pesquisadores a utilizarem as funções de pedotransferência denominadas FPT (HORN; FLEIGE, 2003; IMHOFF et al., 2004; BAUMGARTL; KÖCK, 2004; GREGORY et al., 2006). Algumas propriedades do solo tais como a textura e a resistência à penetração de raízes podem ser usadas em funções de pedotransferência para estimar a pressão de preconsolidação (HORN; FLEIGE, 2003; LIMA et al., 2006). Funções de pedotransferência utilizadas para estimar a pressão de preconsolidação a partir de outras propriedades físicas do solo têm sido publicadas (CANARACHE et al., 2000; HORN; FLEIGE, 2003; IMHOFF et al., 2004; RUCKNAGEL et al., 2007). No entanto, o trabalho de Arvidsson e Keller (2004) não indicam a possibilidade de estimativa da pressão de preconsolidação a partir de outras propriedades do solo mais facilmente e rotineiramente determinadas. A densidade do solo, o tipo de estrutura e o grau de agregação do solo, a textura e o teor de água do solo são as propriedades físicas mais frequentemente utilizadas pelos autores nestas FPT. A resistência à penetração foi usada nos estudos de Canarache et al. (2000) e Lima et al. (2006) e Dias Júnior et al. (2006) e explicou até 96% da pressão de preconsolidação. Imhoff et al. (2004) encontraram $R^2=0,70$ para regressão múltipla considerando a densidade do solo, o conteúdo de argila e o conteúdo de água.

A hipótese deste trabalho foi de que a pressão de preconsolidação ajustada por diferentes métodos apresentam valores similares, onde a escolha do método não influencia significativamente os resultados. O objetivo deste trabalho foi comparar as predições da pressão de preconsolidação estimada por diferentes métodos de ajuste com uma ampla variação textural do solo bem como correlacionar a pressão de preconsolidação determinada pelo método 1 (Casagrande por polinomial) com outras propriedades físicas do solo.

4.2 Material e Métodos

As amostras de solo utilizadas para estudo foram obtidas em diferentes locais na Suécia, no Brasil e na Dinamarca (Krenkerup). Os locais, os solos e as profundidades em que foram realizadas as coletas são apresentados na Tabela 4.1. Os solos investigados variaram consideravelmente na textura (Figura 4.1), com conteúdos de argila alcançando de 69 a 800 g kg⁻¹ e conteúdo de areia de 26 a 818 g kg⁻¹. A granulometria destes solos foi determinada usando o método da pipeta (ROBINSON, 1922), a exceção do solo brasileiro em que foi utilizado o método do densímetro (Gee; Bauder, 1986). De acordo com Tiberg (1998), os solos suecos e dinamarquês foram classificados geralmente como Eutric Cambisols. O solo amostrado no Brasil foi identificado como Latossolo Vermelho distrófico (Orthic ou Acric Ferralsol em acordo com FAO, 1988). O conteúdo de água do solo correspondeu ao conteúdo de água no campo durante a amostragem (Tabela 4.1). O conteúdo de água em base de massa (θ) foi determinado no início do teste de compressão aplicado às amostras.

As amostras de solos suecos e dinamarquês foram coletadas em anéis de 25 mm de altura e 72 mm de diâmetro e submetidas a testes de compressão uniaxial em um oedômetro descrito por Eriksson (1982), com pressões sequenciais de 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600 e 800 kPa. As amostras do solo brasileiro (dimensões similares) foram submetidas também a testes de compressão uniaxial, porém usando um sistema automatizado Satron MCT-2000 consolidation system (MIRAE Engineering Inc., Bussan, Coréia), com pressões de 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800 e 1000 kPa. Para este dispositivo o deslocamento ocorrido em cada pressão ou carga aplicada foi medido por meio de um sensor conectado a um sistema de aquisição de dados. Em todas as amostras a carga foi aplicada por 30 minutos. Para os solos europeus, o deslocamento foi medido ao final da aplicação de cada carga, com uma precisão de 0,01 mm. Após a aplicação da última carga, todas as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24 h e determinou-se a massa seca dos sólidos.

Tabela 4.1 - Propriedades físicas dos solo nos locais estudados. Médias da composição textural, matéria orgânica (MO), densidade do solo (ρ) e conteúdo de água (θ). N = 272 amostras

<i>Local</i>	<i>N</i>	<i>Profund., m</i>	<i>Argila g kg⁻¹</i>	<i>Silte g kg⁻¹</i>	<i>Areia g kg⁻¹</i>	<i>MO g kg⁻¹</i>	<i>Valores iniciais</i>	
							$\rho, \text{Mg m}^{-3}$	$\theta, \text{g g}^{-1}$
Ponta Grossa	9	0,10	393	68	540	34	1,28	0,26
	9	0,20	421	54	525	25	1,20	0,26
	9	0,40	445	74	481	22	1,16	0,26
	9	0,60	471	81	448	20	1,16	0,27
Krenkerup	5	0,20	127	317	556	19	1,41	0,19
	4	0,50	115	325	560	9	1,51	0,16
Ultuna 1	15	0,15	590	275	135	38	1,38	0,31
	15	0,30	621	200	179	8	1,45	0,28
	14	0,50	621	200	179	8	1,30	0,35
Ultuna 2	10	0,15	590	275	135	38	1,44	0,28
	10	0,40	621	200	179	8	1,52	0,26
Tolfors 1a	5	0,10	281	528	191	25	1,39	0,27
	5	0,30	292	523	185	18	1,62	0,21
	4	0,50	336	591	73	2	1,49	0,22
	5	0,70	258	632	110	0	1,57	0,22
Tolfors 1b	20	0,50	336	591	73	2	1,47	0,26
Tolfors 2a	5	0,10	522	344	135	30	1,33	0,35
	5	0,30	571	359	69	7	1,39	0,33
	5	0,70	408	543	50	0	1,31	0,36
	5	0,50	521	418	61	1	1,39	0,31
Tolfors 2b	20	0,50	521	418	61	1	1,33	0,36
Strangnas	5	0,30	514	370	116	16	1,48	0,29
	5	0,50	665	286	49	0	1,41	0,32
	5	0,70	800	174	26	0	1,28	0,39
Staby Sateri	5	0,05	547	334	119	22	1,11	0,37
	5	0,15	547	334	119	22	1,46	0,26
	5	0,30	606	349	45	2	1,52	0,26
	5	0,50	640	333	27	0	1,45	0,26
	5	0,70	639	334	27	0	1,49	0,27
Lövsta	4	0,01	473	409	118	53	1,28	0,35
	4	0,10	473	409	118	53	1,20	0,37
	4	0,20	473	409	118	53	1,26	0,33
	4	0,30	473	409	118	53	1,45	0,28
Kungagården 1	3	0,10	185	199	616	66	1,19	0,31
	4	0,30	141	197	662	20	1,60	0,22
	5	0,50	118	166	716	0	1,53	0,20
	3	0,70	69	113	818	0	1,43	0,32
Kungagården 2	5	0,30	571	258	171	8	1,65	0,18
	4	0,50	646	263	91	0	1,54	0,25
	4	0,70	626	274	100	0	1,43	0,30

A densidade do solo (ρ) foi determinada com base na massa seca do solo e no volume da amostra calculada após cada pressão aplicada tendo em conta o decréscimo de volume do solo. A

densidade do solo antes do teste de compressão foi definida como a densidade do solo inicial. A razão de vazios (e) foi calculada para cada amostra baseada na densidade do solo (ρ) e na densidade de partículas (ρ_p) considerando $e = [(\rho_p/\rho) - 1]$ (McBRIDE; JOOSSE, 1996).

Figura 4.1 - Distribuição de tamanho de partículas nos locais estudados (pontos pretos)

Uma curva de compactação do solo foi construída para cada amostra. Esta curva representa graficamente a relação entre o logaritmo (base 10) da pressão aplicada em kPa e a razão de vazios. A pressão de preconsolidação do solo foi determinada através da deformação do solo em função do logaritmo da pressão aplicada, usando cinco métodos de ajustes diferentes: (1) Casagrande (1936), através do ajuste polinomial de quarto grau; (2) o intercepto da reta de compressão virgem (RCV, a porção reta no final da curva de compactação) e regressão com os primeiros três pontos da curva; (3) o intercepto da RCV e a regressão com os primeiros dois pontos da curva; (4) Casagrande (1936) por meio do ajuste sigmoidal da equação de van Genuchten e (5) a interseção da RCV com o eixo-x na deformação zero. Os métodos 1 e 5 utilizaram uma curva polinomial de quarto grau (Eq. 4) para o ajuste das curvas, a exemplo de Arvidsson e Keller (2004), por meio do software Excel®. Os métodos 2, 3 e 5 foram ajustados conforme Dias Júnior e Pierce (1995), enquanto o método 4 aplicado utilizando o ajuste de uma curva sigmoidal (Eq. 5) similar a equação de van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980),

descrito em Baumgartl e Köck (2004). Os ajustes destas funções foram realizados com o pacote estatístico SAS/STAT (SAS Institute, 2000). Os métodos 1 e 4 estão de acordo com Casagrande (1936), diferindo somente no ajuste da curva de compactação. O ponto da máxima curvatura, a tangente neste ponto e a inclinação ou slope da RCV foram calculados para cada um destes dois métodos.

$$e = a(\log_{10} \sigma)^4 + b(\log_{10} \sigma)^3 + c(\log_{10} \sigma)^2 + d(\log_{10} \sigma) + g \quad (4)$$

$$e = (e_s - e_r) [1 + (\alpha\sigma)^n]^{-(1-1/n)} + e_s \quad (5)$$

sendo e é a razão de vazios, σ a pressão aplicada (kPa) e α , a , b , c , d , e_s , e_r e n são os parâmetros de ajuste. Além disso, $e_r = 0,27$ foi usado como uma razão de vazios mínima ou residual (BAUMGARTL; KÖCK, 2004) quando o parâmetro não foi ajustado.

O método de Casagrande (1936) é dado graficamente pela interseção da RCV, a bissetriz de uma tangente e de uma reta horizontal que passa através do ponto de máxima curvatura. Entretanto, a determinação do ponto de máxima curvatura e as estimativas em que o alcance de pressões determina a RCV são frequentemente subjetivas. Neste estudo, a determinação da pressão de preconsolidação foi realizada matematicamente em todos os métodos, assim evitando a subjetividade do método manual conforme preconizam Arvidsson e Keller (2004).

Os métodos foram analisados através de análises de regressão entre o método de Casagrande por ajuste polinomial, dado como padrão (Método 1) e os demais, e pelo teste “t” para comparação de médias de pressão de preconsolidação entre métodos em cada local estudado. Também foram feitas correlações entre o Método 1 e o Método 4, ambos segundo Casagrande (1936) mas com ajuste da curva de compactação através de equação polinomial e sigmoidal, respectivamente. Tais análises foram desempenhadas usando o pacote estatístico SAS/STAT (SAS INSTITUTE, 2000). Os coeficientes da curva sigmoidal foram considerados estatisticamente significativos pelo intervalo de confiança, no qual o valor zero não é incluído (GLANTZ; SLINKER, 1990).

4.3 Resultados

Os valores médios e a variabilidade na pressão de preconsolidação para os diferentes métodos de ajuste estão apresentados na Tabela 4.2. A grande variabilidade nos resultados é

devido às diferenças na textura do solo e no conteúdo de água de cada amostra submetida ao teste de compressão uniaxial. O método 1 proporcionou o maior coeficiente de variação (CV) da pressão de préconsolidação enquanto que o menor CV foi obtido com Método 2.

Tabela 4.2 - Parâmetros estatísticos (kPa) dos cinco métodos de ajuste para a pressão de préconsolidação analisada neste estudo. N = 272

<i>Métodos</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de variação %</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Casag.Polinomial	129,65	68,23	52,63	10,72	325,18
Regres. 3 pontos	117,29	43,61	37,18	40,89	291,44
Regres. 2 pontos	95,10	42,21	44,38	13,56	317,03
Casag. Sigmoidal	94,98	45,44	47,84	0,17	343,49
Interseção da RCV - eixo x	49,70	24,80	49,90	7,90	192,31

Os valores da pressão de préconsolidação (PPC) obtidos pelos diferentes métodos de ajuste para cada local estão apresentados na Figura 4.2. Os métodos de ajuste indicaram diferenças estatísticas nos locais estudados (Figura 4.2). O método 1 obteve, na maioria dos locais, os valores mais elevados seguidos pelo método 2, os quais diferiram entre si para os locais Lövsta e Tolefors na Suécia 1a ($P < 0,05$). O método 4 foi estatisticamente diferente dos outros em nove locais estudados. O método 5 propiciou os menores valores de PPC, compreendendo nove dos 13 locais, sendo estatisticamente diferentes em relação aos outros métodos. O método 5 quando comparado com o método 1 (Casagrande por polinomial), apresentou diferenças de até 153,74 kPa na PPC.

Verificou-se um comportamento típico dos valores de pressão de préconsolidação tornarem-se mais baixos do método 1 para o método 5 na maioria dos locais. A pressão de préconsolidação obtida pelos métodos de 2 até 5 foi plotada (Figura 4.3) em relação a PPC obtida pelo método 1 (Casagrande por polinomial) utilizado como método padrão de ajuste da PPC.

Os resultados mostram uma menor dispersão dos dados para o método 3 ($R^2=0,77$) e uma maior para o método 4 ($R^2=0,45$). O método 2 obteve um maior valor do slope ou a inclinação da reta, embora estivesse abaixo da reta 1:1. Devido ao método 4 ter apresentado resultados mais dispersos comparados aos outros métodos, o mesmo foi correlacionado com os demais métodos 1, 2, 3 e 5 (Tabela 4.3). Todas as correlações indicaram um coeficiente de determinação mais baixo em relação ao método 4. O mais alto R^2 foi de 0,54, para os métodos 3 e 5.

Figura 4.2 - Pressão de preconsolidação média obtida por diferentes métodos em diferentes locais na Suécia, (*)Dinamarca e (**)Brasil. Letras diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os valores de PPC estimados pelos diferentes métodos.

Tabela 4.3 - Coeficiente de correlação dos valores de PPC estimados pelos diferentes métodos de ajuste

	Casag. Polinomial	Regres. pontos	3 Regres. pontos	2 Casag. Sigmoidal	Interseção RCV - eixo x
Casag.Polinomial	1,00				
Regres. 3 pontos	0,75	1,00			
Regres. 2 pontos	0,77	0,87	1,00		
Casag. Sigmoidal	0,45	0,41	0,54	1,00	
Interseção RCV - eixo x	0,65	0,68	0,74	0,54	1,00

As curvas de compactação tiveram um bom ajuste por meio da função polinomial de quarto grau e da função sigmóide, com $R^2 \geq 0,99$ para a maioria das amostras de solo. Comparando os métodos 1 e 4, todos os parâmetros analisados que definem a pressão de preconsolidação tiveram diferenças significativas ($P < 0,05$). A inclinação média da RCV, a média do logaritmo no ponto de máxima curvatura e a inclinação média da tangente neste ponto foram respectivamente 0,18, 1,86 e 0,12 para o método 1 e 0,22, 1,80 e 0,14 para o método 4. Como exemplo, duas amostras diferentes, mas providas do mesmo local foram analisadas para mostrar diferenças e similaridades entre a curva de ajuste, o ponto da máxima curvatura, a sua tangente e a reta de compressão virgem (Figura 4.4).

A PPC foi significativamente correlacionada com a densidade do solo (D_s), o conteúdo de areia e a matéria orgânica (MO) ($P < 0,001$), apesar do baixo valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,20$), descrita por meio da equação abaixo:

$$PPC = -118,89 + 171,06 \cdot D_s + 0,94 \cdot \text{areia} - 7,90 \cdot \text{MO} \quad (6)$$

Figura 4.3 - Valores de pressão de preconsolidação estimados pelos métodos 2, 3, 4 e 5 em função dos valores determinados pelo método 1 (Casagrande por polinomial)

Figura 4.4 – Exemplo de diferenças e similaridades entre ponto de máxima curvatura ou a segunda derivada da curva de ajuste (a), parâmetros de ajuste e pressão de preconsolidação (b). Esquerda: amostra à 0,10 m de profundidade em Tolefors 2a; Direita: amostra à 0,30 m no mesmo local

4.4 Discussão

Os dados usados neste estudo compreenderam uma ampla variação de textura do solo e de práticas de manejo, permitindo que diferentes métodos de ajuste para a pressão de preconsolidação fossem comparados. O uso de diferentes métodos para calcular a pressão de preconsolidação pode levar a resultados significativamente diferentes, afetando a estimativa da capacidade de suporte de carga do solo representada pela pressão de preconsolidação. Além disso, superestimativas ou subestimativas podem conduzir a conclusões errôneas em relação ao estabelecimento de estratégias de manejo para o controle da compactação do solo.

Em geral, os resultados da pressão de preconsolidação apresentaram alta variabilidade, em acordo com Baumgartl e Köck (2004), os quais reportaram que a heterogeneidade entre repetições

pode ser elevada, particularmente em amostras estruturadas, e conseqüentemente, a exatidão é reduzida. Para todos os cinco métodos estudados nesse trabalho o coeficiente de variação foi relativamente alto, embora menor que aqueles encontrados por Imhoff et al. (2004) em uma toposequência com uma ampla variação no conteúdo argila.

A pressão de preconsolidação diferiu entre os métodos em cada local estudado, demonstrando que para um dado local é possível obter valores distintos para pressão de preconsolidação. As diferenças entre os métodos de ajuste foram relatadas também em outros estudos (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1995; ARVIDSSON; KELLER, 2004; GREGORY et al., 2006). No presente estudo, os valores da pressão de preconsolidação foram geralmente mais elevados quando obtidos pelo método 1. Em alguns locais, os valores de PPC resultantes do método 4 foram tão elevados quanto aqueles advindos dos métodos 1 e 2 ($P < 0,05$). Por outro lado, o método 5 produziu valores de PPC significativamente diferentes de pelo menos um dos métodos estudados, além de produzir os menores valores de pressão de preconsolidação nestes solos. Resultados similares aos encontrados no método 5 foram relatados por Arvidsson e Keller (2004). Em estimativas da pressão de preconsolidação com valores conhecidos da mesma, Gregory et al. (2006) avaliou diferentes métodos de ajuste para diferentes solos. Os autores encontraram que para os métodos de ajuste da curva de compressão pelas curvas polinomial e sigmoidal, o método de Casagrande geralmente superestimou e o método da interseção da RCV subestimou os valores já conhecidos de pressão de preconsolidação.

Os menores coeficientes de relação entre a PPC foram encontradas comparando aquelas obtidas pelo método de Casagrande ajustado pela curva sigmoidal (método 4) comparada com os outros métodos. Entretanto, Gregory et al. (2006) obtiveram estimativas mais exatas da pressão de preconsolidação quando ajustadas em curvas sigmóides comparada à função polinomial de quarto grau. Além disso, comparado com o método 1, todos os métodos apresentaram a maioria dos valores abaixo da reta 1:1, indicando subestimativas dos valores de PPC, contrastando com estudos de Dias Júnior e Pierce (1995). Estes autores usaram a interseção de retas de regressão nos primeiros dois, três, quatro e cinco pontos da curva de compactação com RCV e o método proposto por Schmertmann (1955), que no caso é o método 5 deste estudo, como método de ajuste para a pressão de preconsolidação.

No método 1 foi empregado uma curva polinomial de quarto grau para ajustar a curva de compactação, enquanto o método 4 utilizou-se do ajuste de uma curva sigmoidal. O efeito do tipo

de curva para ajustar os dados pode influenciar os resultados da pressão de preconsolidação. O ajuste sigmoidal tem duas partes distintas, uma côncava e outra convexa, separadas pelo ponto de inflexão. Para os presentes dados, os quais foram usados uma pressão máxima de 1000 kPa na construção da curva de compactação, as partes da curva sigmoidal não apresentaram simetria e o ponto de inflexão, em alguns casos, pode situar-se fora do alcance observado. Baumgartl e Köck (2004) relataram que a qualidade da pressão de preconsolidação para diferentes métodos (gráfico e estatístico) são muito dependentes do alcance de pressões aplicadas para a construção da curva de compactação, os quais definem a reta de recompressão e a RCV. Estes aspectos podem ter afetado os parâmetros usados para ajustar a pressão de preconsolidação. O formato das curvas geradas, a partir de um alcance de dados de compressão do solo uniaxial, próximos ao de uma linha reta ou com uma curva parcialmente sigmóide, é de difícil ajuste através de equações convencionais. Devido a isto, alguns pesquisadores têm buscado uma equação com flexibilidade suficiente para ajustar completamente o formato do alcance de dados de curvas providas de testes de compressão uniaxial do solo através do uso das equações 1, 2 e 3 (FRITTON, 2001; ASSOULINE, 2002; FRITTON, 2006).

Embora os métodos 1 e 4 usem basicamente o método de Casagrande para ajustar a curva de compressão do solo e estimar a pressão de preconsolidação, pequenas diferenças entre os parâmetros de ajuste da curva de compactação, polinomial e sigmoidal, podem produzir valores distintos para a pressão de preconsolidação (Figura 4.4). Da mesma forma, se a diferença for incrementada os valores de pressão de preconsolidação serão também mais distintos. O ponto de máxima curvatura pela equação de van Genuchten pode ser encontrado através da segunda derivada das equações 4 e 5. Diferentes pontos de máxima curvatura para a mesma curva de compactação produzem diferentes inclinações, os quais afetarão o valor de pressão de preconsolidação. Além disso, a RCV é ajustada por diferentes maneiras nos métodos 1 e 4, considerando os últimos e mais alinhados pontos da curva e ponto de inflexão, respectivamente. Em consequência, os parâmetros usados para o ajuste da pressão de preconsolidação foram significativamente diferentes ($P < 0,05$) para os diferentes métodos.

O método 4 obteve os valores médios mais elevados da inclinação da RCV e inclinação da tangente no ponto de máxima curvatura comparado ao método 1. Inversamente o ponto de máxima curvatura médio mais alto foi encontrado no método 1. A correlação encontrada entre a pressão de preconsolidação, determinado pelo método 1 e as propriedades físicas do solo

demonstrou que a densidade do solo, o conteúdo de areia e o conteúdo de matéria orgânica tiveram efeitos na capacidade de suporte de carga do solo (Eq. 6). A pressão de preconsolidação foi positivamente correlacionada com a densidade do solo e o conteúdo de areia, enquanto que para o conteúdo de matéria orgânica a mesma obteve uma correlação negativa.

Horn e Fleige (2003) estimaram a pressão de preconsolidação através de parâmetros que levam em consideração a textura do solo, a agregação e a umidade, a densidade do solo, a capacidade de disponibilizar ar, a capacidade de água disponível, a água não-disponível para a planta, a condutividade hidráulica saturada, a matéria orgânica, a coesão e o ângulo de fricção interno. Para solos fracamente estruturados (solos arenosos) os autores relatam que a pressão de preconsolidação pode ser estimada principalmente pela densidade do solo e pelo conteúdo de água no solo no $pF > 4.2$. Em solos agregados, a coesão e o ângulo de fricção interno tornam-se importantes, e em solos fortemente agregados, a capacidade de disponibilizar ar e a capacidade de água disponível são as mais importantes. Em um outro estudo, Rücknagel et al. (2007) encontraram boas predições da pressão de preconsolidação a partir da densidade do solo e da razão densidade de agregados/densidade do solo. A última é uma medida do sistema poroso inter-agregado, demonstrando a heterogeneidade da densidade dentro da estrutura do solo. Estes poderiam ser parâmetros razoáveis para predizer a capacidade de suporte de carga do solo.

Neste estudo uma redução no conteúdo de matéria orgânica levou ao aumento da pressão de preconsolidação, diferindo dos resultados obtidos por Imhoff et al. (2004) que não encontraram correlação entre a pressão de preconsolidação e matéria orgânica. No último estudo a pressão de preconsolidação foi correlacionada positivamente com a densidade do solo e com o conteúdo de argila, e negativamente com o conteúdo de água do solo. Para a maioria dos estudos a densidade do solo é um parâmetro importante na predição da capacidade de suporte de carga do solo, mas outros parâmetros tais como o conteúdo de água, a textura do solo, a agregação, etc. podem aumentar a exatidão da predição. Porém em nosso estudo, mesmo com o conteúdo de areia e a matéria orgânica incluídos na predição da pressão de preconsolidação, houve uma fraca correlação com estes parâmetros ($R^2=0,20$).

4.5 Conclusões

A hipótese do trabalho foi rejeitada onde os valores da pressão de preconsolidação diferiram significativamente de acordo com o método do ajuste utilizado. O método 1 e o método

4, ambos baseados no método de Casagrande, contudo usando ajustes polinomial e sigmoidal respectivamente para a curva de compactação, apresentaram valores significativamente diferentes de pressão de preconsolidação. As equações polinomial e sigmoidal produziram um bom ajuste para a curva de compactação nos dados analisados ($R^2=0,99$), mas os parâmetros que compreendem o método de Casagrande, tais como, o ponto de máxima curvatura, sua inclinação e a inclinação da RCV foram diferentes. Uma fraca correlação ($R^2=0,20$) foi encontrada entre a pressão de preconsolidação e outras propriedades físicas do solo (densidade do solo, conteúdo de areia e conteúdo de matéria orgânica).

Em conclusão, o método usado para ajustar a pressão de preconsolidação deve ser cuidadosamente escolhido, desde que superestimativas e subestimativas podem ocorrer quando se usa métodos diferentes. Isto também torna difícil o uso de um valor absoluto de pressão de preconsolidação como um limite para as pressões exercidas no solo a fim de evitar a compactação do mesmo.

Referências

- ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; VAN DER LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMERF, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 145-160, 2003.
- ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, p. 85-95, 2004.
- ASSOULINE, S. Modeling soil compaction under uniaxial compression. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1784-1787, 2002.
- BAUMGARTL, T.; KOCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 57-65, 2004.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. chap.13, p. 363-375.
- CANARACHE A.; HORN R.; COLIBAS I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil & 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. **Proceedings ...**Cambridge: Harvard University Cambridge, 1936. v. 3, p. 60-64.

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

ERIKSSON, J. **Markpackning ock rotmiljö (soil compaction and root environment)**. Uppsala: Swed. Univ. Agric. Sci., Division of Agricultural Hydrotechnics, Department of Soil Sciences, 1982. (Report, 126).

FAO. **FAO/UNESCO soil map of the world, revised legend**. Rome: FAO; ISRIC, 1988. 138 p. (World Resources Report, 60).

FRITTON, D.D. An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, v. 678-684, 2001.

FRITTON, D.D. Fitting uniaxial soil compression using initial bulk density, water content, and matric potential. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, p. 1262-1271, 2006.

GEE G.; BAUDER J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. 2nd ed. Madison: ASA, SSSA, 1986. p. 383-411. (Agronomy Monographs, 9).

GLANTZ, S.A.; SLINKER, B.K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York: McGraw-Hill, 1990.

GREGORY, A.S.; WHALLEY W.R.; WATTS C.W., BIRD, N.R.A.; HALLETT, P.D.; WHITMORE, A.P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 45-57, 2006.

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

IMHOFF, S.; DA 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.

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

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

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, p. 107-136, 2003.

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, p. 373-380, 1996.

ROBINSON, G. W. A new method for the mechanical analyses of soil and other dispersions. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 12, p. 306-321, 1922.

RUCKNAGEL, J.; HOFMANN, B.; PAUL, R.; CHRISTEN, O.; HU^ULSBERGEN, K.-J. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 213-220, 2007.

SAS INSTITUTE. **SAS/GRAPH® 2000 software**: reference, version 8. Cary, 2000. v. 2, 1272 p.

SCHMERTMANN, J.H. The undisturbed consolidation behavior of clay. **Transactions of the ASCE**, New York, v. 120, p. 1201-1233, 1955.

TIBERG, E. **Nordic reference soils**. 1. Characterization and classification of 13 typical nordic soils. Copenhagen: Nordisk Ministerråa, 1998. 573 p. (Tema Nord, 1998).

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

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, p. 362-373, 1996.