

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**PARÂMETROS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA EM SOLOS
COM DIFERENTES ANOS DE ADOÇÃO DO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO**

**Michael Mazurana
(Tese de Doutorado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**PARÂMETROS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA EM SOLOS
COM DIFERENTES ANOS DE ADOÇÃO DO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO**

MICHAEL MAZURANA
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

**Tese apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de Doutor
em Ciência do Solo**

Porto Alegre (RS) Brasil
Maio de 2015

CIP - Catalogação na Publicação

Mazurana, Michael

Parâmetros de capacidade de suporte de carga em solos com diferentes anos de adoção do sistema de plantio direto / Michael Mazurana. -- 2015.

122 f.

Orientador: Renato Levien.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

1. Pressão de pré-consolidação. 2. Curvas de compressão. 3. Permeabilidade ao ar. 4. Crescimento de raízes. 5. Densidade do solo. I. Levien, Renato, orient. II. Título.

MICHAEL MAZURANA

**“PARÂMETROS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA EM SOLOS
COM DIFERENTES ANOS DE ADOÇÃO DO SISTEMA DE PLANTIO
DIRETO”**

**Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência do solo da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção do título de Doutor em
Ciência do Solo – Aprovada com Louvor**

**Aprovada em 22 de maio de 2015
Homologada em 08 de julho de 2015**

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Paulo César do Nascimento
Departamento de Solos/UFRGS**

**Prof. Alberto Kazushi Nagaoka
Centro de Ciências Agrárias/UFSC**

**Prof. Sidinei Leandro Klöckner Stürmer
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Catarinense**

**Orientador - Prof. Renato Levien
UFRGS**

**“ Faça cada coisa ao seu tempo, e tudo
ao mesmo tempo”**

**“ Cada ponto de vista é visto de
um ponto”**

**Frases que ouvi durante parte da caminhada,
que me fizeram e me farão refletir
sempre.**

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado paciência nos momentos difíceis e por ter permitido chegar até aqui;

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do Doutorado;

Ao professor, orientador, amigo e “Pai” Renato Levien, agradeço por toda a caminhada desde a graduação até o momento, por ter transferido muito além de conhecimento técnico, mas sim por ter oportunizado e transferido valores humanos que ultrapassam qualquer nível de conhecimento;

A todos os professores deste e de outros departamentos que tive contato e que contribuíram para minha formação;

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos;

Aos meus pais, Maximino e Melânia, os quais além de acreditar no meu sonho, sempre me deram força para continuar e, aos meus irmãos, Tobias e Sara, por todo o carinho e atenção durante este período;

À minha esposa, Mirla Weber, que com palavras não posso descrever o quão importante foi e tem sido nesta caminhada;

Aos meus colegas, amigos e companheiros de todas as horas, de forma especial ao Jefferson, Gabrielle, Macgaiver, Hyran, Jessé, Jovana, Osmar, Maocir, Lucas, Altamir, Caroline, Thais, Thaiane, Julio, Paulo Ricardo....e a todos os outros que não menciono pois não caberiam em uma só página. A todos vocês, os meus sinceros agradecimentos, por todas as vezes que, sem medir esforços, contribuíram na realização deste trabalho e pela amizade;

À Estação Experimental Agronômica da UFRGS, à FAPA/PR e ao Sr. José Fink por permitirem a coleta de material para que fosse possível a realização deste trabalho.

A todos, MUITO OBRIGADO.

PARÂMETROS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA EM SOLOS COM DIFERENTES ANOS DE ADOÇÃO DO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO¹

Autor: Michael Mazurana

Orientador: Prof. Dr. Renato Levien

RESUMO

As mudanças ocorridas na agricultura nos últimos 40 anos tiveram grande impacto na forma de se fazer agricultura em todo o mundo. Os principais marcos desta mudança foram a introdução de sistemas conservacionistas de solos, a revolução verde no âmbito do melhoramento de plantas e o incremento do grau de mecanização nas propriedades. Destes, o primeiro e o último são abordados, em parte, neste trabalho. A introdução do sistema de plantio direto (SPD) associado ao uso intenso de mecanização tem aumentado os problemas de ordem física como a compactação dos solos agrícolas em algum grau que compromete o desenvolvimento das plantas. Diante disso o objetivo deste trabalho foi estudar como o tempo de adoção de SPD e o tempo de aplicação de carga afetam a dinâmica de alguns atributos físicos e mecânicos em três classes de solos e relacioná-los com variáveis de plantas. Para isso foram escolhidas três classes de solos de maior expressão para uso agrícola no Sul do Brasil e, dentro de cada classe, lavouras com diferentes tempos de adoção do sistema e que tivesse o histórico de uso e manejo do solo conhecido. Os resultados mostram que variáveis físicas ou mecânicas isoladas não conseguiram captar diferenças na estrutura do solo, independentemente da classe estudada, ao passo que variáveis que medem fluxos conseguiram captar diferenças significativas entre os tempos de adoção do SPD. Além disso, os resultados apontam que a diminuição no tempo de aplicação de carga no solo não altera os valores de pressão de pré-consolidação, mas sim o índice de compressibilidade, indicando que é possível reduzir o tempo de aplicação de carga em laboratório sem comprometer os resultados. Para a condição de Argissolo, foi observado o efeito do tráfego de máquinas nos atributos de plantas medidos somente se manifestam para as condições de déficit hídrico, indicando que em condições normais de precipitação ou uso de irrigação os efeitos da compactação são de difícil observação na planta.

¹ Tese de Doutorado em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (129p). Maio, 2015. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq e Fapergs.

LOAD BEARING CAPACITY PARAMETERS IN SOILS WITH DIFERENT YEARS OF NO-TILLAGE SYSTEM ADOPTION²

Author: Michael Mazurana

Adviser: Prof. Dr. Renato Levien

ABSTRACT

The changes in agriculture over the last 40 years had great impact on the way of making agriculture worldwide. Three were the principal marks: the introduction of soil conservation systems, the green revolution in the plant breeding and increase the degree of mechanization in the properties. Of these, the first and the last are presenting in this work. The introduction of the no-tillage system (NT) associated with intensive mechanization has increased reports of physical problems such as agricultural soils compaction in to degree that development of plants are proven. In this sense, the aim was study in different soil classes as the time of NT adoption and application load time affect the dynamics of physical and mechanical properties of these soils and relates with plant variables. Since, we choose three soil classes of greatest expression for agricultural use in southern Brazil and, within each class, with different crops adoption time system and you had the history of use and management of the known soil. The results show that physical or mechanical variables isolated failed to grasp differences in the soil structure, regardless of class studied, while variables measuring flows able to capture significant differences between NT adoptions of times. In addition, the results indicate that the decrease in load application time on the ground does not change the values of pre-compression stress mechanical variable but the compressibility index, indicating that we can cut down on laboratory load application without compromising the results. For Paleudalf condition, the effect of machinery traffic in plant attributes measured only for drought conditions observed, indicating that in normal use of rainfall or irrigation signals compaction problems are difficult to observe in plant conditions.

² Doctoral Thesis in Soil Science, Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Federal University of Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (129p). Mai, 2015. Research supported by CNPq and Fapergs.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. CAPÍTULO I – O ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO NA DINÂMICA DA RELAÇÃO SOLO-MÁQUINA EM SOLOS AGRÍCOLAS.....	6
2.1. Compactação do solo em áreas agrícolas	6
2.2. Tensão-deformação e o processo de compressibilidade do solo: natureza da deformação	7
2.3. Relação solo-máquina: fatores que interferem no grau de compactação do solo em sistema de plantio direto.....	9
2.3.1. Estado de agregação do solo e conteúdo de água	9
2.3.2. Mineralogia do solo e sua relação com parâmetros físicos e mecânicos que atuam na sua capacidade de suporte de carga	14
2.3.3. Parâmetros de máquina.....	18
2.4. Problemas decorrentes da compactação do solo em áreas sob sistema de plantio direto	21
2.5. Indicadores físicos do estado de compactação de solos agrícolas em sistema de plantio direto	23
3. CAPÍTULO II – DINÂMICA DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS EM LATOSSOLO E ARGISSOLO FRENTE A TEMPOS DE ADOÇÃO DO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO	28
3.1. INTRODUÇÃO	28
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.2.1. Argissolo Vermelho Distrófico típico.....	30
3.2.2. Latossolo Bruno Alumínico câmbico	33
3.2.3. Latossolo Vermelho Distrófico típico	36
3.2.4. Análises.....	38

3.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
3.3.1.	Resultados	42
3.3.2.	Discussão.....	49
3.4.	CONCLUSÕES	55
4.	CAPÍTULO III – DINÂMICA DA CURVA DE PRESSÃO-DEFORMAÇÃO EM ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL FRENTE A DISTINTOS TEMPOS DE CARREGAMENTO	57
4.1.	INTRODUÇÃO	57
4.2.	MATERIAL E MÉTODOS	59
4.2.1.	Análise estatística	60
4.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.4.	CONCLUSÕES	73
5.	CAPÍTULO IV – PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO E CRESCIMENTO DE RAÍZES DE MILHO EM UM ARGISSOLO VERMELHO SOB TRÁFEGO CONTROLADO DE MÁQUINAS	75
5.1.	INTRODUÇÃO	75
5.2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	77
5.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
5.3.1.	Características físicas do solo afetadas pela cobertura de inverno e tráfego	79
5.3.2.	Parâmetros de planta afetados pelo tráfego e disponibilidade hídrica	87
5.3.3.	Correlações entre parâmetros avaliados.....	90
5.4.	CONCLUSÕES	91
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise granulométrica do Argissolo Vermelho (g kg^{-1}) das áreas sob diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto	31
Tabela 2. Histórico do sistema de rotação/sucessão de culturas na área em SPD 20 anos.....	33
Tabela 3. Análise granulométrica do Latossolo Bruno (g kg^{-1}) das áreas sob diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto	34
Tabela 4. Histórico do sistema de rotação/sucessão de culturas da área	34
Tabela 5. Pressão de inflação dos pneus e área de contato pneu-solo das máquinas que trafegam na área de solo Latossolo Bruno	36
Tabela 6. Análise granulométrica do Latossolo Vermelho (g kg^{-1}) das áreas sob diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto	36
Tabela 7. Histórico do sistema de rotação/sucessão de culturas da área	37
Tabela 8. Quociente entre densidade de agregados e densidade do solo (D_a/D_s) nos diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto dentro de cada classe de solo.....	48
Tabela 9. Síntese da matriz de correlação entre variáveis físicas e mecânicas	49
Tabela 10. Pressão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressibilidade (IC) e índice de recompressão (IR) frente a dois tempos de carregamento, em Argissolo Vermelho Distrófico típico, para diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto	69
Tabela 11. Pressão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressibilidade (IC) e índice de recompressão (IR) frente a dois tempos de carregamento, em um Latossolo Bruno Alumínico câmbico, para diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto	70
Tabela 12. Pressão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressibilidade (IC) e índice de recompressão (IR) frente a dois tempos de carregamento, em um Latossolo Vermelho Distrófico típico, para diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto	71
Tabela 13. Distribuição granulométrica das partículas de solo em diferentes camadas em função das coberturas de inverno	78
Tabela 14. Pressão de pré-consolidação comparando sistemas de manejo em cada camada e tráfego	83
Tabela 15. Massa de raízes das camadas estratificadas, parte aérea, área foliar, relação entre parte aérea/raízes do milho e teor de umidade para os tratamentos de restrição hídrica (CRH e SRH) e tráfego controlado (AT e DT).....	89

Tabela 16. Coeficientes de correlação de Pearson e nível de significância entre parâmetros avaliados.....	90
---	----

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Fases de implantação do sistema de plantio direto (Anghinoni, 2008).3
- Figura 2. Permeâmetro de carga constante desenvolvido para medição da permeabilidade ao ar das amostras de solo. 39
- Figura 3. Valores de macroporosidade e microporosidade na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a, b), Latossolo Bruno (c, d) e Latossolo Vermelho (e, f).. 43
- Figura 4. Valores de densidade do solo e conteúdo volumétrico de água, na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a, b), Latossolo Bruno (c, d) e Latossolo Vermelho (e, f).. 44
- Figura 5. Valores de espaço aéreo na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a), Latossolo Bruno (b) e Latossolo Vermelho (c).. 45
- Figura 6. Valores de condutividade ao ar, na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a), Latossolo Bruno (b) e Latossolo Vermelho (c). 45
- Figura 7. Valores de pressão de pré-consolidação e índice de compressibilidade, na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a, b), Latossolo Bruno (c, d) e Latossolo Vermelho (e, f).. 46
- Figura 8. Resistência de agregados à desagregação, na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a), Latossolo Bruno (b) e Latossolo Vermelho (c). 47
- Figura 9. Principais formas das curvas em ensaios de compressão uniaxial: (a) modelo elasto-plástico ou curva bi-linear; (b) modelo em formato “S”. Adaptado de Tang et al. (2009). 61
- Figura 10. Ensaios de compressão uniaxial em diferentes profundidades e tempo de adoção do sistema de plantio direto (sete, 12 e 22 anos) em Argissolo Vermelho Distrófico típico. Conteúdo de água no solo em base de massa de 0,19, 0,14 e 0,18 kg kg⁻¹ para a condição de sistema de plantio direto de sete, 12 e 22 anos, respectivamente.. 64
- Figura 11. Ensaios de compressão uniaxial em diferentes profundidades e tempo de adoção do sistema de plantio direto (seis e 30 anos) em Latossolo Bruno Alumínico câmbico. Conteúdo de água no solo em base de massa de 0,36 e 0,33 kg kg⁻¹ para a condição de sistema de plantio direto de seis e 30 anos, respectivamente.. 65

- Figura 12. Ensaios de compressão uniaxial em diferentes profundidades e tempo de adoção do sistema de plantio direto (cinco, 10 e 15 anos) em Latossolo Vermelho Distrófico típico. Conteúdo de água no solo em base de massa de 0,27, 0,20 e 0,22 kg kg⁻¹ para a condição de sistema de plantio direto de cinco, 10 e 15 anos, respectivamente..66
- Figura 13. Densidade do solo nos sistemas de manejo pousio (A) e aveia + ervilhaca (B), nas condições de sem tráfego (ST), antes do tráfego (AT) e depois do tráfego (DT), em camadas..... 80
- Figura 14. Porosidade do solo nos sistemas de manejo pousio (A) e aveia mais ervilhaca (B), nas condições de sem tráfego (ST), antes do tráfego (AT) e depois do tráfego (DT), em camadas..... 81
- Figura 15. Distribuição de agregados por classes de tamanhos nos sistemas de manejo e condições de tráfego, nas profundidades 0,0-0,05 (A), 0,05-0,10 (B), 0,10-0,15 (C) e 0,15-0,20 m (D)..... 82
- Figura 16. Pressão de pré-consolidação nos sistemas de manejo pousio (A) e aveia + ervilhaca (B), nas condições de sem tráfego (ST), antes do tráfego (AT) e depois do tráfego (DT), em camadas..... 85
- Figura 17. Resistência mecânica do solo à penetração, densidade e conteúdo gravimétrico de água no solo na condição de pousio (A) e aveia + ervilhaca (B). Números sobre os marcadores indicam camadas no solo 0,0-0,05 (1), 0,05-0,10 (2), 0,10-0,15 (3) e 0,15-0,20 m (4)..... 86

ANEXOS

Anexo 1. Conteúdo gravimétrico de água no solo no limite de plasticidade para as classes de solos	105
Anexo 2. Teor de carbono orgânico (g kg ⁻¹) em duas profundidades para as três classes de solos.....	105
Anexo 3. Correlação de Spearman para todas as variáveis físicas e mecânicas para o Argissolo Vermelho Distrófico típico	106
Anexo 4. Correlação de Spearman para todas as variáveis físicas e mecânicas para o Latossolo Bruno Alumínico câmbico	107
Anexo 5. Correlação de Spearman para todas as variáveis físicas e mecânicas para o Latossolo Vermelho Distrófico típico.....	107

1. INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira tem passado por diversas modificações, especialmente nas últimas quatro décadas, dentre elas o aumento do número e potência de tratores e colhedoras nas principais operações agrícolas, mudança no de manejo do solo e na fertilidade do solo e na genética de plantas. No quesito manejo do solo houve uma redução do emprego do preparo convencional e aumento na adoção de sistemas conservacionistas, como o sistema de plantio direto (SPD) que, atualmente, abrange em torno de 32 milhões de hectares.

A mudança na forma de manejo do solo, difundida e incorporada pelos produtores, juntamente com o aumento das pesquisas nas demais áreas, permitiu e vem permitindo a melhor exploração do solo, bem como a expansão da agricultura para novas áreas, antes tidas como impróprias para essa finalidade. Entretanto, apesar do expressivo conhecimento acumulado por pesquisadores, técnicos e produtores sobre esse sistema de manejo do solo, permanecem alguns dos “velhos problemas” como perda de solo, água e insumos agrícolas por erosão hídrica, e surgimento de “novos problemas” como resistência de plantas indesejáveis à ação de herbicidas e a compactação do solo (foco central desta tese), carecendo de mais pesquisas que visem o entendimento e convirjam para uma solução ou mitigação dos mesmos.

Estudos da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) estimam que os problemas de degradação física do solo no mundo (dentre os quais se encontra a compactação) são da ordem de 4,2% das terras agricultáveis, o que equivaleria a totalidade da área agrícola atualmente cultivada no Brasil.

As principais causas da compactação dos solos agrícolas têm sido relacionadas ao tráfego de veículos ou animais sobre o solo sem respeitar as condições de umidade ideal do mesmo, ou ainda o intenso uso do solo com monocultivos, mesmo em condição de umidade adequada, não permitindo condições de melhorias em sua estrutura, resultando por acelerar o processo de degradação física.

No que tange ao tráfego de veículos, cuidados com tipo de pneus, tipo de garras, intensidade de tráfego, pressão de inflação, carga sobre o pneu, lastragem, velocidade de operação e distribuição dinâmica do peso, são pontos

importantes a serem observados e relativamente fáceis de serem ajustados, a fim de reduzir o risco de compactação dos solos. Por outro lado, fatores intrínsecos ao manejo como tipo de solo, potencial de água e mineralogia não são passíveis de modificação.

Pesquisas visando prever, identificar e encontrar alternativas para solucionar o problema têm sido desenvolvidas. Estes estudos envolvem o entendimento do comportamento mecânico do solo quando submetido a carregamentos e descarregamentos, bem como a intensidade e tipo de manejo do solo.

No que tange ao comportamento mecânico do solo sobre carregamento e descarregamento, tem aumentado o uso da tensão de pré-consolidação e do índice de compressibilidade como ferramentas para identificar qual a máxima carga que um solo pode suportar, sem implicar compactação adicional ao mesmo. Entretanto, questionamentos sobre a eficácia desta ferramenta e destes indicadores têm sido realizados. No mesmo âmbito da discussão segue a questão de manejo do solo, visto que este é o meio de estudo de onde são retiradas e abastecidas as informações para os parâmetros mecânicos que compõe os modelos de previsão do estado de compactação do solo. Não há um consenso entre os pesquisadores sobre quando, de fato, um sistema pode ser chamado de SPD estabilizado, fator importante para a sua compreensão. A falta de consenso sobre o tema está ligada ao fato de o solo ser um corpo natural que troca energia e matéria com o meio, atingindo, desta forma, diferentes estados de energia, ora em níveis mais elevados (maior organização do sistema), ora em níveis menos elevados (menor organização do sistema).

Anghinoni apresenta uma proposta no qual estabelece um modelo de escala de tempo que permite dividir o SPD em diferentes fases, conforme esquema apresentado na Figura 1. Embora esta proposta esteja mais voltada para a compreensão de processos químicos que ocorrem no sistema, a base conceitual pode ser utilizada e estendida para outras áreas do conhecimento, como é o caso das relações solo-máquina.

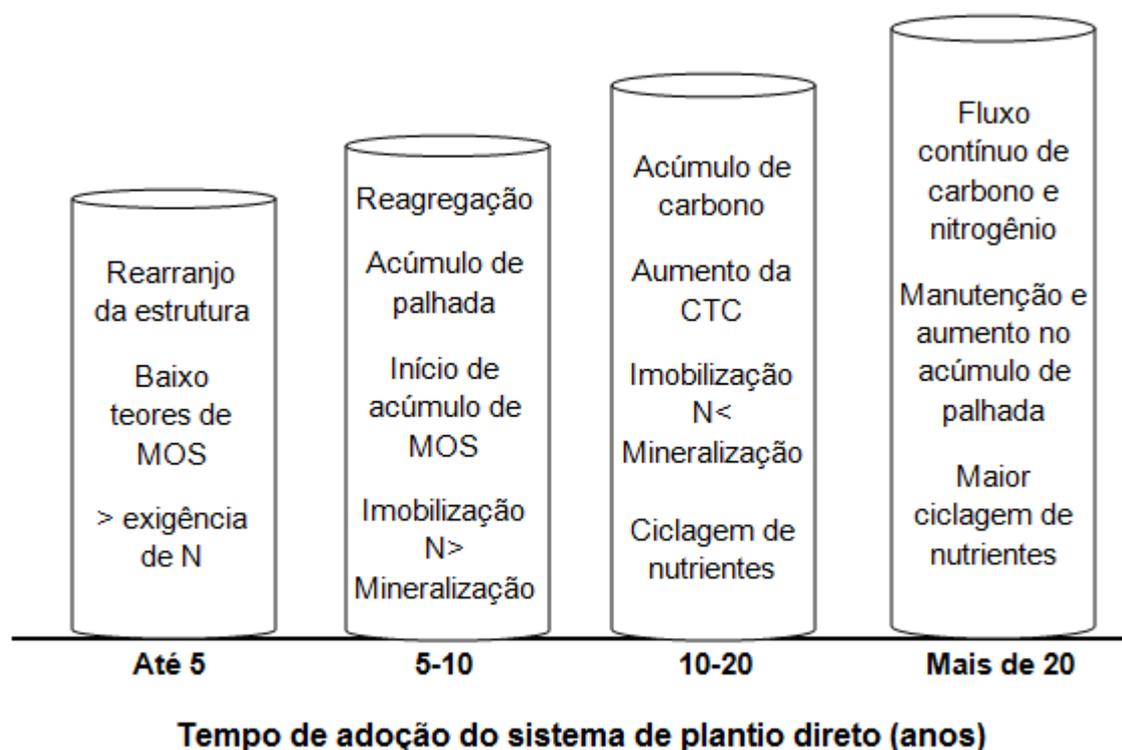


Figura 1. Fases de implantação do sistema de plantio direto (Anghinoni, 2008).

Com base neste modelo, pode-se inferir que à medida em que o tempo de adoção do SPD aumenta, tem-se uma melhoria na qualidade química, física e biológica do solo, com reflexos positivos sobre a produção vegetal (alimentos, fibra e energia). Entretanto, essa perspectiva tem sido questionada, pois, solos sob este tipo de sistema têm apresentado problemas de compactação, especialmente em profundidade, evidenciados em diversos estudos.

Assim, da inter-relação entre a química, a física e biologia (que rege os fluxos de matéria e energia no sistema solo, a fim de se obter a melhor relação para crescimento e desenvolvimento da vida no mesmo), a compactação (física) pode ser vista como a de maior peso. Isso porque, quando presente em um grau acima do que seria o ideal, altera as relações massa/volume no solo, diminuindo os macroporos (responsáveis pelo fluxo de água e gases no solo), a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica e aumentando a densidade do mesmo, juntamente com a sua resistência mecânica. As alterações nas características e nos processos que ocorrem no solo impactam diretamente sobre a microbiologia e as reações

químicas, necessárias para o adequado desenvolvimento das plantas e fluxos de energia do sistema.

Entretanto, há um conflito de interesses quando se discute manejo do solo. Do ponto de vista da produção agrícola, para conservação e qualidade do ambiente, busca-se um solo com um bom estado de agregação, alta capacidade de infiltração, retenção e disponibilidade de água e sem restrição ao crescimento de raízes. Por outro lado, sobre a ótica da mecanização, busca-se um solo mais adensado, compacto, com baixo recalque quando trafegado, a fim de propiciar maior tração dos implementos e aumentar a eficiência dos conjuntos motomecanizados.

Uma das formas de se conciliar ambas as situações seria o uso do tráfego controlado de máquinas na lavoura, o que pouco tem sido observado em nível de campo no Brasil com culturas produtoras de grãos, embora haja inúmeras pesquisas sobre o tema e uma adoção cada vez maior em lavouras cultivadas com cana-de-açúcar. Grande parte dos estudos foca sobre o quesito formas de manejo do solo em SPD para melhorar a estruturação do solo. No entanto, ainda são poucos e divergentes os estudos que avaliam como o tempo de adoção do SPD, bem como o tempo de carregamento, afetam a capacidade de suporte de carga do solo. Está comprovado pela pesquisa que a adoção do SPD melhora as condições físicas do solo para crescimento de plantas. Porém, conforme já salientado, há uma contradição quando o enfoque não é a planta, mas sim a máquina. A melhoria na qualidade física do solo melhora o estado de agregação, aumentando a macroporosidade, melhorando a aeração, infiltração, retenção e redistribuição de água. Entretanto, solo mais poroso e com mais água no perfil determina menor potencial de tração e suporta menos carga, vindo a sofrer deformação quando trafegado por rodados ou pisoteado por animais, podendo causar compactação adicional ao mesmo.

As principais preocupações em relação a solos sob diferentes anos de implantação do SPD e com histórico de tráfego (rodados ou pisoteio animal) são referentes à quantidade de carga que os mesmos podem suportar, sem implicar compactação adicional, bem como sua capacidade de recuperação após carregamento e resposta das plantas em situações de estresse hídrico em solos com histórico de tráfego.

Diante disso, a temática desta tese deste trabalho foi o estudo de “Parâmetros de capacidade de suporte de carga em classes de solos com diferentes anos de adoção do sistema de plantio direto”.

Como objetivo geral, selecionou-se áreas com histórico conhecido de uso e manejo do solo, e avaliou-se as suas condições físicas e mecânicas, em diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto, assim como alguns parâmetros de planta.

2. CAPÍTULO I – O ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO NA DINÂMICA DA RELAÇÃO SOLO-MÁQUINA EM SOLOS AGRÍCOLAS

2.1. Compactação do solo em áreas agrícolas

Toda alteração na forma de uso dos solos gera impactos diretos e indiretos em suas características, sejam estas alterações de ordem física, química e biológica, e tem reflexos sobre o meio em que vivemos.

Em se tratando de áreas agricultáveis ou com potencial de uso agrícola ainda não explorado, os problemas de compactação do solo têm sido alvo de investigação científica. É crescente a preocupação com os impactos causados por problemas de compactação excessiva, por exemplo, em pequenas propriedades rurais, principalmente aquelas que têm como atividades a bovinocultura de leite e a produção de grãos, conduzidas conjuntamente em mesma área.

Seguindo a tendência mundial de substituir o trabalho braçal nas propriedades pelo uso de máquinas (maiores e mais pesadas), há um aumento direto na frequência de tráfego sobre o solo e, por consequência, aumento da probabilidade de compactação, primeiramente em superfície e, posteriormente, em subsuperfície.

A compactação tem sido apontada como a principal causa da degradação de áreas, tanto agrícolas, como florestais, em todo o mundo (Peng et al., 2004; Saffih-Adadi et al., 2009) sendo, atualmente, estimada em $6,8 \times 10^4$ km² a magnitude de sua extensão (Oldeman et al., 1991; Flowers e Lal, 1998). Diversos autores relatam problemas devido à compactação excessiva do solo como Carder e Grasby (1986) e Hamza e Anderson (2003), na Austrália, Tardieu (1994) na França, Suhayda et al. (1997) na China, Mwendera e Saleem (1997) na Etiópia; Bondarev e Kuznetsova (1999) na Rússia, Aliev (2001) no Azerbaijão, Ohtomo e Tan (2001) no Japão, Russell et al. (2001) na Nova Zelândia, Akker e Canarache (2001) na Europa, Chancellor (1971), Silva et al. (2000), Secco (2003), Beutler et al. (2005), Gonçalves et al. (2006), Freddi et al. (2007) e Reichert et al. (2009) no Brasil.

O solo com problema de compactação acaba por ter sua qualidade física comprometida, perdendo parcialmente ou totalmente suas funções. Funções estas que Reichert et al. (2003) enumeram como servir de meio para

o crescimento das plantas, exercer regulação e participação do fluxo de matéria e energia no ambiente, bem como atuar como filtro ambiental.

As causas da degradação física do solo por problemas de compactação podem ter distintas origens sendo, frequentemente, associadas a mais de um fator, que envolvem a compreensão da relação solo-máquina.

2.2. Tensão-deformação e o processo de compressibilidade do solo: natureza da deformação

Estudos sobre mecânica do solo aplicados à prática agronômica advêm do entendimento e aproximações de técnicas usadas na engenharia civil, na qual a estrutura do solo apresenta menor importância frente ao conhecimento do tipo e natureza da partícula presente no solo. Assim, sobre a ótica da engenharia civil, a maior ou menor suscetibilidade à compactação do solo está vinculada à maneira com que uma força é transmitida por meio da massa de solo às suas partículas. Dessa forma, a propagação da força se dá por meio da resultante das forças de contato entre as partículas adjacentes e a deformação que ocorre nos pontos de contato entre as partículas, que acaba sendo transmitida à massa de solo (Lambe e Whitman, 1969). Este conceito também é válido e aplicado para a área agronômica. Isso porque a união das partículas isoladas, formando agregados, apresenta pontos de contato, os quais recebem energia advinda da aplicação de tensão ou pressão, cujo resultado pode ser a deformação do solo por não suportar o estresse aplicado.

Dessa forma, conforme apontam Lambe e Whitman (1969), a deformação de uma massa de solo é controlada pelas interações entre as partículas individuais, especialmente pelo deslizamento entre as partículas, deformações estas que podem ser do tipo plásticas ou elásticas. Deformações do tipo plásticas são aquelas na qual um corpo absorve a energia aplicada e sofre deformação quando submetido a uma carga e, após cessar a aplicação desta carga, o mesmo não retorna a sua condição original. Diferentemente ocorre com deformação do tipo elástica, na qual um corpo pode absorver parte da energia aplicada e, após o alívio da pressão, o corpo retorna a sua condição original (Hillel, 2004).

Para solos agrícolas, na qual a formação e manutenção de uma estrutura é importante, o termo compactação do solo refere-se à compressão

de uma massa de solo não saturado, por meio de ações antrópicas, durante a qual existe um aumento da sua densidade, em consequência da redução de seu volume (Gupta e Allmaras, 1987, Gupta et al., 1989), ou quando a aplicação de uma pressão externa excede a resistência do solo (Lipiec et al., 2003). Outra interpretação da expressão quantitativa da resistência do solo a um decréscimo de volume, quando lhe é imposto um determinado regime de tensão, é denominada de compressibilidade (Soane, 1990), ou seja, é a facilidade com que um solo se compacta ou se deforma mediante a aplicação de energia (Imhoff, 2002).

Dias Junior e Pierce (1996) apontam diversos modelos para avaliar o grau de compactação de um solo. No Brasil, o modelo mais utilizado é o ensaio de compressão uniaxial confinada, executado em um equipamento denominado de prensa oedométrica, cuja metodologia de execução encontra-se descrita na norma NBR 12007/90 (ABNT, 1990). Os parâmetros de maior interesse que podem ser extraídos da curva de compressão do solo são três: a tensão de pré-consolidação (σ_p), o índice de compressibilidade (IC) e o índice de recompressão (IR) (Keller et al., 2011), os quais são foco deste trabalho para diferentes tipos de solos, com diferentes históricos de uso e manejo em sistema de plantio direto.

A σ_p é um indicador da capacidade de suporte de carga e da história de tensões, incluindo tensões de água mais negativas (Veiga et al., 2007) ao qual uma massa de solo foi submetida no passado (Dias Junior e Pierce, 1996). Já o IC, reflete a taxa de variação do índice de vazios (ou da densidade do solo) em resposta à aplicação de carga. Este, portanto, tem sido considerado como um indicador da suscetibilidade do solo à compactação. Além destes, estudos mais recentes também analisam a capacidade de recuperação do solo após alívio da carga, podendo sofrer novos carregamentos sem afetar a estrutura. Este parâmetro é o IR, usado para medir a resiliência mecânica do solo (Kuan et al., 2007).

Esta maior ou menor facilidade com que determinado solo pode se tornar compactado está relacionada a fatores intrínsecos e extrínsecos da relação solo-máquina, a seguir reportados com maior detalhamento.

2.3. Relação solo-máquina: fatores que interferem no grau de compactação do solo em sistema de plantio direto

Os estudos sobre compactação do solo apontam diversos fatores como responsáveis por permitir a maior ou menor deformação do solo quando submetidos a carregamentos externos, cujos reflexos, por exemplo, podem ser vislumbrados na magnitude dos valores da σ_p . Dentre os fatores, alguns têm caráter dinâmico, enquanto outros apresentam pouca ou nenhuma variação com o manejo do solo. A revisão está focada sobre dois grupos de fatores: os que apresentam maior variação com o manejo do solo (a exemplo o estado de agregação e conteúdo de água) e os que apresentam poucos estudos sobre sua influência no processo de compactação do solo (a exemplo a mineralogia do solo e características de máquinas).

2.3.1. Estado de agregação do solo e conteúdo de água

Qualquer que seja a forma de manejo do solo há impactos diretos e indiretos sobre sua estrutura, definida por Dexter (1988) e Hillel (2004) como a organização e estabilização de partículas sólidas minerais e orgânicas de diferentes formas e tamanhos em estruturas com maior grau de complexidade, chamados agregados. O arranjo dos diferentes tipos e formas das partículas origina espaços vazios (poros), que têm por função a difusão de gases, o fluxo e armazenamento de água, bem como podem governar o crescimento das raízes (Lal e Shukla, 2004). Além disso, são estes espaços vazios, originados pelo arranjo das partículas, que sofrem alteração, quando submetidos à ação de cargas externas.

A análise da estrutura do solo revela dois tipos de poros, os intra-agregados e os inter-agregados (Stengel, 1990), sendo os primeiros influenciados principalmente pelo arranjo das partículas individuais e, o segundo, pelo sistema de manejo. Assim sendo, o conhecimento da estrutura do solo permite um entendimento amplo dos fatores que governam os fluxos matéria e energia, o suporte de cargas e o crescimento de plantas.

Lal e Shukla (2004), em uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos de agregação, reportam que a importância da fração argila e de material orgânico (húmus) sobre o processo de agregação foi inicialmente reconhecido em 1874 por Schloesing e, mais tarde, por Dumont (1909).

Posteriormente teorias sobre este processo têm sido postuladas, ganhando maior destaque a proposta por Tisdall e Oades (1982). Estes autores propuseram um modelo conhecido como teoria da hierarquia de agregação, para explicar a formação e estabilização de agregados e que, posteriormente, foi melhor descrita por Dexter (1988). Segundo esta teoria há três níveis hierárquicos que governam a formação dos agregados: a flocculação de argila (formando estruturas de até 20 μm), a união das partículas flocculadas com as demais partículas (minerais e orgânicas) formando microagregados (estruturas com diâmetro inferior a 250 μm) e a união de microagregados formando macroagregados (estruturas com diâmetro maior do que 250 μm).

Esta teoria foi comprovada por Oades e Waters (1991) e pode ser explicada por um modelo conceitual proposto por Goldchin et al. (1997) que tem por base a matéria orgânica do solo e suas frações físicas. Oades e Waters (1991) concluem que, em solos onde a matéria orgânica é o principal agente cimentante, o rompimento dos agregados (macroagregados para microagregados) se dá na medida em que há um aumento de energia aplicada sobre estes. Entretanto, quando é a fração mineral o principal agente cimentante (especialmente óxidos de ferro e/ou alumínio) esta teoria aparenta não ser aplicada em sua plenitude, tendo em vista que a “destruição” de macroagregados teve como resultado a liberação de partículas de areia, silte e argila, não apresentando uma fração estável em nível de microagregados.

Pela teoria proposta por Goldchin et al. (1997), a matéria orgânica do solo e suas frações físicas, especialmente a matéria orgânica particulada, atuam como fonte de alimento (energia) para a biota do solo. Este material orgânico advindo da cobertura vegetal deixada na superfície do solo, juntamente com o sistema radical das plantas, começa a ser atacado pelos microrganismos que, ao iniciar o processo de transformação, formam e liberam mucilagens que aderem às partículas minerais. Em havendo material disponível, este processo aumenta no decorrer do tempo que, juntamente com hifas dos fungos decompositores, acabam resultando na formação dos macroagregados. No interior destes ainda há material orgânico particulado que, na medida em que é decomposto, acaba por fragilizar a estrutura, rompendo os macroagregados e formando microagregados, os quais têm em seu interior material orgânico particulado, porém em menor quantidade. Este material

também acaba sendo atacado, transformado em mucilagem (degradada por outros microrganismos) e, na medida em que é reduzido, acaba por fragilizar esta estrutura, formando microagregados na ordem de 0,53 μ m ou menores, os quais são formados por argila floculada e ou material orgânico altamente processado, ligado à fração mineral, ou seja, a matéria orgânica associada aos minerais.

Embora a matéria orgânica seja um dos fatores importantes no processo de formação e estabilização de agregados no solo, ela não atua isoladamente. Processos como o crescimento das raízes das plantas, ciclos de umedecimento e secagem, ação da fauna do solo, mineralogia da fração argila e natureza da capacidade de troca de cátions, atuam concomitantemente (Lal e Shukla, 2004).

Embora participe dos processos de agregação, os mecanismos envolvidos nos ciclos de umedecimento e secagem (especialmente forças que se contrapõe) não estão claramente entendidos (Lal e Shukla, 2004), porém podem ter um papel importante no início do processo de agregação do solo e/ou em solos onde a adição de material orgânico é baixa. Segundo estes autores, o umedecimento da massa de solo leva a reorientação das partículas, ao passo que a secagem leva a aproximação das partículas, aumentando a formação de pontos de ligação e à cimentação.

Entretanto, o umedecimento rápido da massa de solo aparenta ter efeitos semelhantes à secagem (que causa rachaduras) no processo de agregação. Isso pode ocorrer pelo fato de o ar não conseguir sair, ficando retido na massa de solo e, ao sofrer pressão dentro dos poros pela entrada de água, pode levar à fratura dos agregados maiores (Henin, 1938). Porém, isso é muito dependente da textura e das forças de coesão e adesão que atuam no solo (Grant e Dexter, 1989).

Dessa forma, o grau de compactação que determinado solo experimenta em um dado momento, bem como a sua posterior recuperação, reflete a estabilidade estrutural do mesmo, sendo influenciada pela carga aplicada que, por sua vez, são determinadas pelas propriedades reológicas do solo (Keller et al., 2013). Assim, a estrutura do solo, por compreender a organização das partículas primárias antes isoladas em estruturas mais

complexas (agregados), tem papel importante no entendimento da capacidade que os solos têm em suportar mais ou menos carga.

De acordo com Or (1996), as tradicionais abordagens que relacionam estrutura do solo com as deformações impostas ao mesmo tempo por máquinas ou equipamentos, não conseguem captar características singulares que ocorrem no solo por dois motivos. O primeiro se deve ao fato de as abordagens serem baseadas em um estado de equilíbrio, enquanto tanto o processo de agregação, como as deformações impostas à estrutura do solo, são processos dinâmicos que raramente estão em equilíbrio. O segundo motivo remete ao fato de que, a maior parte das avaliações descreve mudanças de volume da massa de solo, não descrevendo a evolução do problema na escala de poros (poros inter ou intra-agregados), o que é crucial para o entendimento dos processos de fluxo e transporte de água e gases no sistema solo-planta.

Neste sentido, Or e Ghezzehei (2002) utilizando um conceito de modelagem dinâmica da estrutura do solo, observaram que as práticas de manejo afetaram somente o espaço poroso inter-agregado, permanecendo inalteradas as condições intra-agregados. Após a alteração da estrutura, forças externas e internas aos agregados atuaram em conjunto, reorganizando-os a uma estrutura mais densa. Os mesmos autores apontam que o fenômeno de capilaridade tem papel importante no processo de agregação (ciclos de umedecimento e secagem). Entretanto, enfatizam que a passagem de máquinas sobre o solo imprime diferentes intensidades de estresse ao mesmo, porém por pequenas frações de segundo. Dessa forma, a deformação e a consequente compactação do solo, estariam mais fortemente relacionadas com o tempo de aplicação da carga e das condições de umidade do solo.

Independentemente do tipo de solo ou manejo empregado, é inegável a estreita relação entre a matéria orgânica do solo e o processo de agregação sendo que, com a diminuição do revolvimento do solo é possível chegarmos à formação de agregados de maior diâmetro e mais estáveis (Tomazi, 2008). Embora a matéria orgânica tenha importante papel na resistência do solo, os mecanismos de como se dá essa interação entre a fração orgânica e a mineral no suporte de carga são complexos. O aumento no teor de carbono orgânico aumenta a estabilidade de agregados e sua resistência mecânica, porém reduz a densidade do solo e aumenta a retenção

de água, ambos os fatores que atuam na redução da resistência do solo às pressões externas (Ekwue, 1990). Isso tem sido comprovado por estudos de Zhanf et al. (2005) e Kuan et al. (2007), os quais mostraram que solos com alto teor de carbono orgânico são menos resistentes à deformação por forças externas, entretanto a estrutura apresenta melhor recuperação, mesmo após a deformação.

Assim, os agregados que formam a estrutura abrigam em seu interior material orgânico, protegendo fisicamente a matéria orgânica e aumentando seus estoques no solo (Vezzani, 2001; Conceição, 2006). Além de aumentar o estoque no solo, essa matéria orgânica protegida dentro do agregado tem papel importante no suporte de carga dos solos agrícolas, devido a sua elasticidade (Soane, 1990), que é tanto maior quanto menor for seu grau de decomposição. Estudos têm referenciado o efeito da matéria orgânica sobre a elasticidade do solo (Mosaddegui, 2000; Kuan et al., 2007; Braida, 2008; Debiasi, 2008), ou seja, com a capacidade de recuperação após a aplicação de tensões sobre sua estrutura. Dessa forma, a adoção de sistemas conservacionistas como o SPD acaba por elevar, gradativamente, o conteúdo de matéria orgânica no solo, sendo dependente da sucessão e rotação cultural empregada.

Assim como a matéria orgânica do solo desempenha papel importante sobre a capacidade de suporte de carga, o conteúdo de água também tem grande importância e, em solos não saturados, está associado à sua condição estrutural. A variação no conteúdo de água no solo tem reflexos diretos sobre a sua consistência, ou seja, sobre a manifestação das forças físicas de coesão e adesão, alterando sua resistência (Hillel, 2004).

Embora o processo de compressibilidade do solo seja desencadeado no âmbito dos pontos de contato entre as partículas, seu reflexo se dá sobre o espaço poroso do solo, que pode ser totalmente ou parcialmente preenchido por água. No solo a água pode transmitir dois efeitos deletérios (Lambe e Whitman, 1969). Primeiramente, a presença da água faz com que as forças de atração entre as partículas de argila (especialmente) diminuam, porém não desaparecem totalmente. Quando em contato com as partículas de argila ou colóides orgânicos, a água “penetra” entre as partículas, rompendo a ligação direta entre elas. Entretanto, elas ainda permanecem próximas,

podendo transmitir pressões normais e, eventualmente, tangenciais para as adjacentes, processo este conhecido como interação química água-solo, que pode levar à deformação da massa de solo.

O segundo efeito é o fato que a água nos poros pode transmitir a pressão aplicada e influenciar o comportamento do solo (Lambe e Whitman, 1969). Neste caso, quando um poro contém água e este sofre uma rápida pressão não permitindo a saída da água, a massa de solo não se deforma, mas há uma redução na força de contato entre as partículas, podendo estas se movimentar e gerar deformação após a saída da água pelo alívio de pressão. Esse fenômeno conhecido como interação física água-solo foi demonstrado em ensaios em caixas com areia.

Por outro lado, o aumento da resistência do solo à deformação com o decréscimo no conteúdo de água pode ser explicado pelo aumento do potencial matricial (mais negativo), tornando o solo mais seco e aumentando a coesão entre partículas minerais, juntamente com o aumento das forças coesivas da água no interior do capilar (Hillel, 2004). Por estar ligada às partículas de argila, a redução no conteúdo de água e aumento da quantidade de ar nos capilares gera um aumento na tensão superficial e conseqüente aumento efetivo da cimentação do material (Lambe e Whitman, 1969; Hillel, 2004), havendo uma relação linear direta entre o potencial de água e a coesão com a resistência tênsil de agregados (Mullins e Panayiotopoulos, 1984; Mullins et al., 1992).

2.3.2. Mineralogia do solo e sua relação com parâmetros físicos e mecânicos que atuam na sua capacidade de suporte de carga

Minerais são componentes inorgânicos naturais com características químicas e propriedades cristalinas definidas, influenciando as propriedades físicas e químicas de diferentes tipos de solos. O arranjo entre os minerais manifesta-se na agregação e estrutura do solo e, conseqüentemente, reflete na resistência do solo à deformação (Spoor et al., 2003; West et al.; 2004).

Nos solos das regiões tropicais e subtropicais, a presença de minerais como a caulinita, a goethita, a hematita e a gibbsita têm sido foco de estudos. Isso devido sua importância nos processos físico-químicos que

ocorrem no solo como formação de agregados, porosidade, retenção de água, drenagem, reações de troca, lixiviação de nutrientes e cor do solo.

Os argilominerais filossilicatados 1:1 (grupo da caulinita) são, provavelmente, o grupo de maior expressão e frequência nos solos do mundo. Sua importância diz respeito ao tipo de agregação que imprimem ao solo. Por possuir uma estrutura planar, a caulinita permite um arranjo face a face das partículas, o que confere uma estrutura do solo em blocos. Esse tipo de arranjo também favorece o desenvolvimento dos agregados (Mello e Wypych, 2009). Melo et al. (2008), avaliando a morfologia de agregados de Latossolo Bruno e Vermelho no Estado do Paraná, observaram que para algumas classes de agregados de horizontes Bw, houve um aumento no diâmetro médio geométrico e área, alongamento preferencial em um eixo e redução da rugosidade externa dos agregados, atribuindo isso ao maior teor de caulinita na fração argila. Ferreira et al. (1999a), estudando a mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil, apontam que as partículas de grãos de quartzo do Latossolo caulinitico estão envoltas em um plasma denso, contínuo e com pouca tendência de desenvolvimento de microestrutura, mas com forte tendência de desenvolver estruturas em blocos.

No entanto, o solo não é um corpo homogêneo. Neste sentido, a caulinita relaciona-se com os demais minerais no solo, podendo ter seu efeito floculante potencializado. Dimirkou et al. (1996) verificaram que, quando a caulinita tem sua superfície coberta por cargas positivas, aumenta o seu potencial de agregação. Desta forma, no solo, quando a caulinita está em contato com óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), o efeito pode ser o mesmo, porém em menor magnitude, visto que dificilmente um solo agrícola terá condição de $\text{pH} \leq 3,0$ (condição do ensaio). Outra constatação sobre o efeito floculante da caulinita, junto aos óxidos de Fe e Al, é que solos cauliniticos dependem menos da matéria orgânica para a formação inicial de agregados (Deneff et al., 2002). No entanto, a estabilização destes agregados está vinculada à ação dos processos físicos e biológicos que ocorrem no solo (Six et al., 2004), como o crescimento de raízes, atividade biológica e ciclos de umedecimento e secagem.

Assim como a caulinita, os óxidos de Fe (especialmente goethita e hematita) e de Al (gibbsita) também possuem efeito de floculação e agregação

no solo. No entanto, a ocorrência de goethita e hematita em solos está condicionada em grande parte as condições ambientais. Enquanto a goethita é formada em ambientes mais úmidos e frios e/ou, posição de topografia que permita o acúmulo de água, a hematita se dá em condições de ambientes quentes e úmidos e/ou, em posições de relevo suave ondulado a plano, que permitam drenagem livre, condições também ideais para formação de gibbsita. No entanto, sendo o solo um sistema termodinâmico aberto, é possível a coexistência de ambas as frações minerais em um mesmo local.

Os óxidos de ferro estão também associados à caracterização da cor do solo. Nos solos com matiz mais vermelho há predominância da hematita, enquanto que nos solos com matizes mais amarelos há predominância de goethita. Além disso, os óxidos possuem uma elevada densidade (3,0 a 5,3 kg dm⁻³), quando comparados com os silicatos (2,0 a 2,8 kg dm⁻³) (Schwertmann e Taylor, 1989). Essa característica fornece subsídio para explicar valores de densidade de partículas entre solos e que tem relação com sua porosidade total, cujos reflexos podem ser percebidos também na sua capacidade de suporte de carga.

A mineralogia do solo manifesta-se também sobre a agregação, que está relacionada com a capacidade de suporte de carga. A agregação proporcionada pelos óxidos de Fe e de Al volta-se a uma estrutura mais granular dos solos, o que determina menores valores de Ds (Ferreira et al., 1999). No entanto, Giarola et al. (2002) e Muggler et al. (1999), apontam que os óxidos de Fe nem sempre influenciam a densidade do solo e a agregação, podendo estar associado à estrutura do mineral. Na hematita há um empacotamento uniforme entre os íons oxigênio de um octaedro e outro, enquanto que na goethita, não há um empacotamento perfeito entre os átomos de oxigênio e os átomos de hidrogênio dos octaedros. Esse empacotamento é o que confere as características do tipo de estrutura formada no solo (se do tipo bloco ou do tipo granular ou “pó de café”).

O comportamento de agregados menores e mais resistentes, que está associado à presença dos óxidos de ferro, é mais notável ainda com a presença do óxido de Al (gibbsita). Isso ocorre porque, na gibbsita, os íons OH de uma lâmina situam-se exatamente sobre os íons OH da lâmina

subsequente, ou seja, não há um empacotamento denso. Essa característica é refletida na agregação do solo, sendo superior ao efeito dos óxidos de Fe.

Ajayi et al. (2009a), em estudo observando a resistência de cinco solos (em distintos potenciais matriciais), com diferentes características mineralógicas, apontam que a cor do solo poderia ser usada como indicativo da capacidade de suporte de carga para os Latossolos. Os mesmos autores apontam que Latossolos Vermelhos (predominância da hematita) têm menor capacidade de suporte de carga, quando comparado aos Latossolos Brunos, e que, entre os Latossolos Vermelhos, as diferenças de mineralogia interferem na capacidade de suportar carga.

Estudando sete amostras de Latossolos coletadas nos Estados de Minas Gerais até o Espírito Santo, Ferreira et al. (1999a) concluem que as propriedades físicas associadas à estrutura do solo foram marcadamente influenciadas pela mineralogia da fração argila. Similarmente, Ajayi et al. (2009b) observaram relações entre resistência do solo ao cisalhamento com os argilominerais em amostras de Latossolos coletados no Rio Grande do Sul, Minas Gerais e Espírito Santo. Os mesmos autores, estudando a relação entre resistência do solo e atributos mineralógicos em Latossolos brasileiros, concluíram que a capacidade de suporte em todas as amostras variou em função do potencial matricial de água no solo. A elevação do potencial matricial de água no solo aumentou a resistência, contudo variou de solo para solo em função de sua estrutura (Imhoff et al., 2004). Em baixo potencial matricial de água, a resistência do solo reduziu consideravelmente, devido à baixa pressão de água nos poros. Resultados semelhantes foram obtidos por Peng et al. (2004) e Pereira et al. (2007).

Solos que apresentam ausência de gibbsita e baixas quantidades de óxidos de ferro favorecem o arranjo face-a-face das lâminas de caulinitas (especialmente em Latossolos Amarelos), contribuindo para uma estrutura em bloco, com maior densidade, menor porosidade e maior capacidade de suporte de carga dos solos (Ajayi et al., 2009). Por outro lado, estes autores observaram que, quando presente, a gibbsita age como se fosse uma “cunha” entre as folhas da caulinita, favorecendo assim uma estrutura granular, com baixa densidade, tornando o solo suscetível à compactação em alta tensão de água.

Estudando a mineralogia de um Latossolo Vermelho Distroférico do Paraná, submetido a diferentes sistemas de manejo por 24 anos e usando diferentes técnicas de difratometria, Gonçalves et al. (2008) não observaram mudanças significativas na mineralogia do solo decorrentes dos diferentes sistemas de manejos.

Quando se fala em compactação de solo, é notável o grande número de variáveis que estão relacionadas com o comportamento compressivo do solo. O estudo e entendimento isolado de um único fator é importante, porém, quando se avalia a interação com as demais variáveis em questão, aquele comportamento pode não ter efeito significativo no contexto global.

Assim, o entendimento das características internas do solo, como a textura, estrutura, tipo e concentração de íons na solução do solo, quantidade e tipo de mineral que compõe a matriz do solo, teor e tipo da fração orgânica, quantidade de água, bem como quantidade e tipo de raízes que estavam e estão no solo no momento que antecedem o tráfego, são características que carecem de investigação, visto que apresentam interações diretas e indiretas sobre a capacidade de suporte de carga de solos.

2.3.3. Parâmetros de máquina

Apontada como a principal forma de degradação física, a compactação do solo tem como um de seus agentes causadores o tráfego de máquinas. Por muitos anos, a tendência que tem sido observada e seguida na agricultura é o aumento do tamanho e da potência de tratores e colhedoras, transformando as máquinas agrícolas até então aliadas, como vilãs no processo de produção. Isso desencadeou ajustes sobre os órgãos ativos que transformam a energia mecânica do motor em movimento, os pneus. Desde seu surgimento e uso em tratores agrícolas a partir da década de 1930 (dos Reis et al., 2005), os pneus passaram por adaptações a fim de aumentar e melhorar a transferência de potência do motor (Arvidsson et al., 2011).

Além da massa do trator, do número e tipo de pneus utilizados, a pressão de inflação dos mesmos, a velocidade de operação da máquina no campo, o número de passadas, a área de contato e a patinação dos rodados são fatores inter-relacionados que interferem diretamente sobre a estrutura do solo (Carpenter et al., 1985; Chamen et al., 2003; Keller e Lamandé, 2010),

podendo levar a degradação da mesma. Isso porque são os pneus que recebem e transmitem o estresse advindo do peso da máquina para o solo.

Os primeiros trabalhos realizados para conhecer e entender essa relação foram desenvolvidos por Frese (1955) e Gill e Raves (1956) que estudaram a influência da pressão de contato no padrão de compactação em diferentes condições de solo. Söehne (1958), estudando o efeito da carga e sua distribuição no solo concluiu que a deformação do solo observada em superfície se deve a pressão de inflação e do contato pneu-solo, ao passo que as deformações em subsuperfície eram determinadas pela quantidade de carga sobre cada pneu. Estas observações corroboram com estudos mais recentes conduzidos por Chamen et al. (2003). Daves et al. (1972) estudando o efeito relativo do peso do trator e da patinagem sobre a compactação do solo, reportam que a máxima compactação do solo foi mensurada com uso de tratores que trabalharam com maiores cargas sobre os rodados e maior patinagem, sendo esta citada a mais importante causa de compactação dos solos. Da mesma forma, Raghavan et al. (1977) estudando o efeito da patinagem na compactação do solo numa condição de textura franco arenosa, observaram um aumento de 100% no valor da densidade do solo, quando a patinagem (valores entre 15 e 25%) ficou acima do recomendado. Isso ocorre porque, quando há patinagem dos rodados, a pressão de contato pneu-solo acaba sendo adicionada à deformação produzida pelas forças cisalhantes (Sánchez-Girón, 1996).

Além da carga e pressão de inflação dos pneus, as deformações impostas ao solo pela passagem da máquina dependem também da velocidade de deslocamento, do número de passadas sobre o mesmo local e da área de contato pneu-solo. Embora o fator velocidade se tenha dado pouca importância, estudos mais recentes têm mostrado que a compactação do solo é dependente da duração de aplicação da carga (Or e Ghezzehei, 2002; Chamen et al., 2003; Keller et al., 2013). O tempo de carregamento está relacionado com a energia aplicada ao sistema, à semelhança do que é realizado no ensaio de Proctor normal, ou seja, aplicação e dissipação de energia (Vargas, 1977). Assim, o estresse aplicado ao solo pela carga sobre os pneus das máquinas em operação é uma força transiente, de curta duração e

que apresenta características distintas de carregamentos estáticos, realizados em laboratórios com consolidômetros.

Assim, da quantidade de energia aplicada, parte pode ser dissipada pela deformação da massa de solo durante um curto espaço de tempo em que a carga é aplicada, sendo essa deformação plástica. Entretanto, parte dessa energia é armazenada na forma de deformação elástica, que é restaurada após a passagem da máquina, permitindo certa recuperação da estrutura do solo. Este processo de particionamento da energia aplicada em duas formas de deformação (elástica e plástica) foi ilustrado por Horn e Baumgartl (1999).

Lebert et al. (1989) e Fazekas e Horn (2005) mostraram, em ensaios estáticos usando consolidômetros, que os valores da pressão de pré-consolidação diminuíram e o índice de compressibilidade aumentou na medida em que houve um aumento no tempo de carregamento. Estes resultados vão ao encontro dos encontrados por Or e Ghezzehei (2002) que demonstraram haver uma redução da deformação com decréscimo do tempo de aplicação de carga, bem como um aumento nas deformações plásticas com o aumento do tempo de carregamento. Este efeito aparenta ser mais expressivo para solos que apresentam uma textura mais argilosa, podendo os valores de pressão de pré-consolidação ser duas vezes maior, quando comparado a mesma carga nestes solos em longos e curtos intervalos de tempo (Horn et al., 1994).

Juntamente com o tempo de carga, a intensidade de tráfego afeta a estrutura do solo, especialmente porque as maiores deformações que o solo sofre, aumentando seu grau de compactação, ocorrem após os primeiros tráfegos (Hamza e Anderson, 2005; Botta, 2005). Entretanto, tais deformações atingem camadas mais profundas (abaixo de 20 cm) dificultando a correção do problema (Mosaddeghi et al., 2000; Botta, 2005; Arvidsson et al., 2011), quando há novos tráfegos sobre o solo.

Tal fato pode estar relacionado com dois fatores: o primeiro fator se deve à diminuição no intervalo de tempo entre a aplicação de uma carga e outra, não permitindo a recuperação total de parte da estrutura do solo que não sofreu deformação plástica, conforme processo de particionamento da energia aplicada ilustrado por Horn e Baumgartl (1999). O segundo fator pode estar relacionado com o primeiro, ou seja, com a aproximação das partículas (em função da deformação da estrutura após as primeiras passadas), há um

aumento na magnitude de transferência de tensões às camadas mais profundas do solo, deformando-as, conforme foi comprovado por Shäffer et al. (2007). Estes autores verificaram um aumento de 50% na tensão medida a 0,32 m de profundidade no centro da linha de tráfego dos pneus dianteiros (23.1-25 com 120 kPa de pressão de inflação) de uma colhedora de grãos com massa total de 9,73 toneladas.

As características relacionadas às máquinas acima discutidas, tem interação direta ou indireta com as propriedades dos pneus agrícolas, como seu padrão construtivo (se a disposição das lonas é radial ou diagonal e desenho da banda de rodagem), dimensões do pneu (relações de diâmetro e altura) e carga sobre o pneu (pressão de inflação e carga sobre a roda) influenciam a área de contato (Febo et al., 2000) e a magnitude e distribuição da pressão aplicada na interface pneu-solo (Gysi et al., 2001; Keller, 2005; Lamandé e Schjonning, 2008). Keller e Lamandé (2010), estudando modelos analíticos para entendimento da compactação do solo, concluem que as melhorias nos modelos de predição da compactação do solo passam pela necessidade de melhorar o entendimento da caracterização da área de contato do pneu-solo, juntamente com desenvolvimento de sensores de maior acurácia.

Assim, questões relacionadas à máquina e seus componentes e sua interação com o solo também são essenciais de serem compreendidos quando da análise do processo de compressibilidade em solos agrícolas.

2.4. Problemas decorrentes da compactação do solo em áreas sob sistema de plantio direto

A compactação do solo, definida por Gupta e Allmaras (1987) e Gupta et al. (1989) como sendo a compressão de uma massa de solo não saturado, por meio de ações antrópicas, durante a qual existe um aumento da sua densidade em consequência da redução de seu volume, tem seus efeitos pronunciados sobre o solo, planta e o ambiente. Em sistemas de plantio direto, a compactação tem especial atenção pelo fato de o sistema preconizar o não revolvimento do solo, a qual é uma forma de atenuar o problema. Entretanto, o contínuo tráfego de máquinas sob condições inadequadas de conteúdo de água no solo tem ocasionado problemas severos de compactação. Sob a ótica

do produtor, um dos principais problemas observados em algumas áreas tem sido o decréscimo contínuo de rendimento dos cultivos em áreas conduzidas por diversos anos sob este sistema (Botta et al., 2008).

Sob a ótica do solo, os efeitos da compactação passam por mudanças na sua estrutura, com reflexos sobre diferentes características, as quais afetam os processos essenciais para a manutenção da sua função. Estudando diferentes solos manejados sob sistema de plantio direto com mais de cinco anos, Mazurana (2011) aponta aumento na densidade e redução na porosidade total, em decorrência da redução no volume de macroporos, cujas alterações foram atribuídas ao tráfego de máquinas em condições inadequadas de umidade, na maior parte dos casos. No mesmo sentido, Arvidsson et al. (2011) estudando diferentes sistemas de bandas de rodagem que equipam tratores agrícolas, apontam um aumento na densidade e na resistência mecânica do solo à penetração, seguida da diminuição da condutividade hidráulica saturada, após a passagem do trator equipado com rodados simples (dois pneus em cada eixo), aumentando os riscos de erosão do solo. Os mesmos autores concluíram que não houve diferença significativa para tratores equipados com esteiras de borracha ou com rodados duplos.

Por outro lado, a alteração na densidade e porosidade interfere na dinâmica dos fluxos de água (Alaoui et al., 2011; Arvidsson et al., 2011) e de gases no solo (Alaoui et al., 2011; Berisso et al., 2013). Alaoui et al. (2011) apontam uma redução da condutividade hidráulica saturada, provocando o escoamento superficial e erosão do solo pela água. Berisso et al. (2013), analisando a permeabilidade ao ar e a difusividade sob uma condição de solo com textura franca e outra muito argilosa, observaram que a compactação imposta pelo tráfego de rodados por 14 e 29 anos de cultivo, reduziu ambas as variáveis analisadas, com impactos maiores sob a condição de solo muito argiloso.

Sob a ótica da planta, os problemas em relação à compactação do solo são afetos ao sistema radicular, com comprometimento no desenvolvimento morfológico (Taylor et al., 1966) e fisiológicos da raiz (Lipiec et al., 2012), interferindo nos processos de absorção e transporte de água e nutrientes. No entanto, esses efeitos são posteriormente expressos na parte aérea, com menor produção de matéria seca e de grãos, por exemplo. Botta et

al. (2010) encontraram uma relação direta entre rendimento e peso seco do sistema radicular da soja, sendo essa relação afetada negativamente pela compactação do solo, com decréscimo na produção ano após ano. Este efeito sobre o rendimento pode estar relacionado não somente com a massa do sistema radicular, mas também com seu comprimento e fisiologia. Lipiec et al. (2012), analisando os efeitos da compactação do solo na elongação e anatomia de diferentes espécies de plantas, apontam que ocorreu redução do comprimento radicular e modificação da anatomia das células das raízes com sete dias de desenvolvimento em função do seu cultivo em solo compacto. As células das raízes, na condição de solo compactado, sofreram invaginações e achatamentos, comprometendo tanto as células do córtex, como as células do cilindro vascular, dificultando o fluxo interno de água e nutrientes na raiz e desta para a parte aérea.

Além de comprometer o desenvolvimento das plantas pela mudança nas propriedades do solo, os efeitos acabam por se estender por todo o sistema solo-planta-atmosfera, podendo a compactação ser um agente catalisador do aumento na concentração dos gases do efeito estufa. Estudo recente aponta que em solos compactados, o movimento de água e nutrientes no solo e deste para as raízes é muito lento (Miransari et al., 2009). Neste caso, a absorção de nitrogênio, por exemplo, acaba sendo lenta e aumentam as chances de perdas de nitrogênio por desnitrificação (Ruser et al., 2006; Miransari et al., 2009; Alaoui et al., 2011), sendo potencializadas pelo menor tamanho, atividade e fisiologia do sistema radicular (Lipiec et al., 2012). Neste sentido, o solo que tem sido visto como um dreno de carbono e, por consequência, um mitigador do efeito estufa, pode tornar-se vilão, por potencializar a emissão de outros gases, mesmo em sistema de plantio direto, quando submetido a manejo inadequado.

2.5. Indicadores físicos do estado de compactação de solos agrícolas em sistema de plantio direto

Definir um parâmetro para servir como indicador do estado de compactação do solo não é uma tarefa simples, pois exige o entendimento do assunto em sua maior amplitude possível, não somente de solo, mas também

de fisiologia de plantas, principalmente no tocante ao sistema radical, cujos reflexos podem ser expressos na parte aérea.

Neste sentido, o estabelecimento de um indicador deve levar em conta as práticas de manejo do solo desenvolvidas ao longo do tempo, as quais imprimem mudanças em propriedades e processos no solo que afetam a sustentabilidade e a qualidade do ambiente (Karlen et al., 2001). Além disso, o solo não tem um caráter de homogeneidade, pelo contrário, é um meio heterogêneo, aumentando a dificuldade de se ter uma resposta, seja ao crescimento da planta, seja a deformação do solo, quando analisamos e relacionamos apenas um único fator. Assim, a manutenção de estudos e experimentos em longo prazo para desenvolvimento, análise e calibração e entendimento de indicadores são importantes, conforme salienta Petersen et al. (2012).

Entretanto, para facilitar o entendimento podemos dividir os indicadores do estado de compactação do solo em dois grupos, ou seja, indicadores quantitativos e indicadores qualitativos, que oferecem uma visão do funcionamento de processos que ocorrem no solo. A principal limitação de todos os indicadores para fins de diagnóstico do estado de compactação de um solo refere-se ao estabelecimento de níveis ou valores críticos para os mesmos.

A literatura reporta diversos indicadores físicos para mensurar o grau de compactação de um solo, sendo a densidade e a resistência mecânica à penetração os indicadores quantitativos mais utilizados (Raper, 2005). A densidade do solo apresenta a vantagem da independência do teor de água, com exceção de solos com predominância de material com argilas expansivas. No entanto, por envolver a coleta de amostras indeformadas com uso de anéis volumétricos, é um método trabalhoso, demorado, destrutivo e invasivo. Muitas vezes, a coleta repetitiva de amostras em pequenas parcelas experimentais pode inviabilizar seu uso após pouco tempo. Além disso, embora a densidade seja uma das primeiras propriedades afetadas pela compactação, ela é um indicador pobre das modificações da estrutura do solo, como salienta Keller et al. (2011), porém associada a outros indicadores, fornece subsídio para entendimento dos processos.

O estabelecimento de valores críticos de densidade do solo para o desenvolvimento de plantas não é fácil, pois este atributo apresenta variação de solo para solo, devido à sua variação textural, bem como dentro do mesmo solo, em profundidade, por ação de pressões geostáticas em sua condição natural. Usando como base a classificação textural do solo e embasados em estudos com uso do intervalo hídrico ótimo (IHO), Reichert et al. (2003) estabeleceram alguns valores de densidade do solo considerados crítico ao desenvolvimento de plantas. Assim, para estes autores, valores de densidade iguais ou superiores a 1,30, 1,45 e 1,75 Mg m⁻³, respectivamente para solos de textura muito argilosa, média e arenosa, são considerados limitantes ao desenvolvimento de plantas.

Para reduzir as diferenças de resposta das plantas à densidade em função do tipo de solo, Hakansson (1990) propôs o conceito de densidade relativa, determinada pela razão entre a densidade do solo e um valor de densidade de referência obtido pela compressão uniaxial de amostras grandes e indeformadas de solo a uma tensão de 200 kPa. Seus resultados, baseado em mais de 100 experimentos em diferentes classes de solo, apontaram um valor médio de densidade relativa de 0,87, considerado como valor máximo. Entretanto, a determinação destes valores com uso de consolidômetros, como realizado por Hakansson (1990), é demorada, trabalhosa e demanda equipamentos sofisticados. Procurando agilizar o processo com igual precisão, tem sido utilizado um método alternativo e menos oneroso em tempo e em dispêndio de recursos financeiros, que é o ensaio de Proctor. Marcolin et al. (2006) determinaram a densidade relativa para solos do Rio Grande do Sul sob sistema de plantio direto com diferentes classificações texturais e encontraram um valor médio de 0,86, com variação entre 0,88 e 0,84 para solos com teor de argila de 0,35 a 0,77 kg kg⁻¹, respectivamente. Com base nestes resultados os autores concluem que a densidade relativa no campo é menor para solos argilosos do que para solos arenosos.

Por outro lado, o uso da resistência mecânica à penetração (RP) é menos oneroso, destrutivo e invasivo, porém os resultados apresentam dependência do conteúdo de água no solo e da sua densidade (Klein et al., 1998). A RP aumenta e diminui, respectivamente, com a redução do conteúdo de água e da densidade do solo (Klein et al., 1998). A diminuição da RP com o

incremento do conteúdo de água é mais pronunciada para solos argilosos, comparativamente aos arenosos (Mapfumo e Chanasyk, 1998). Por outro lado, o aumento da RP em função do incremento na densidade do solo torna-se menos evidente à medida que o teor de água aumenta (Klein et al., 1998; Camara e Klein, 2005), indicando que em solos úmidos, a RP é menos sensível na detecção de camadas ou zonas de solo compactadas. Além disso, quando analisamos e relacionamos os mecanismos envolvidos no crescimento radicular com a ação da haste de penetrômetros, os mesmos são diferentes. Assim, a RP pode ser de até oito vezes maior que a encontrada pela raiz, fato atribuído por Bengough et al. (1990) à incapacidade do penetrômetro em acompanhar o arranjo poroso do solo.

Buscando alternativas que melhorem o entendimento do estado de compactação em solo agrícolas, Dias Junior et al. (2004), Machado (2008) e Ajayi et al. (2009b) relacionaram a RP com a pressão de pré-consolidação, obtida por meio de ensaio de compressibilidade, encontrando relações positivas satisfatórias. Sendo assim, a pressão de pré-consolidação também pode ser utilizada como um indicador do estado de compactação do solo, embora mais trabalhoso que a determinação da RP. No entanto, resultados experimentais com tráfego têm mostrado que deformações plásticas têm ocorrido mesmo antes de se atingir a pressão de pré-consolidação, questionando a acuracidade deste indicador na detecção de zonas compactadas.

Assim, tem-se buscado indicadores qualitativos para identificar se a estrutura do solo foi ou está sendo acometida por problemas de compactação, os quais buscam visualizar fluxos e processos que ocorrem no solo. Exemplos destes indicadores são a permeabilidade ao ar, a difusividade, a condutividade hidráulica e a capacidade de infiltração de água no solo (Berisso et al., 2013; Alaoui et al., 2011). Estes indicadores são importantes, pois, nem sempre um aumento de densidade do solo causa destruição da continuidade do sistema poroso, conforme apontam Alaoui et al. (2011) em recente revisão sobre as mudanças no sistema poroso do solo devido à deformação. Estes autores salientam que, dependendo da amplitude da deformação, os agregados permanecem rígidos e somente a estrutura dos inter-agregados é afetada pela compactação. Isso pode ser explicado pela geometria da estrutura do sistema

poroso. Solos que apresentam em sua estrutura maior proporção de poros orientados verticalmente apresentam menor suscetibilidade à compactação, quando comparados com uma distribuição de poros no sentido horizontal (Hartge e Bohne, 1983; Schäffer et al., 2008).

Entretanto, esses e outros indicadores que procuram descrever processos que ocorrem no solo têm por base o entendimento do rearranjo dos agregados do solo e do sistema poroso dos mesmos, quando submetidos a diferentes sistemas de manejo em diferentes condições de pressões externas. Dessa forma, como foi anteriormente relatado, a análise isolada de um único fator não tem oferecido respostas satisfatórias acerca do problema compactação. Assim, o uso e análise dos valores da pressão de pré-consolidação como um indicador isolado do limite de carga que um solo pode suportar, sem impor nova deformação ao solo, tem sido questionado.

Diante disso, há uma necessidade de analisar outras características e propriedades do solo em sistema de plantio direto em diferentes classes de solos e com diferentes tempos de implantação que, em conjunto, possibilitem o melhor entendimento da dinâmica de carga que um solo pode suportar, sem comprometer suas funções.

3. CAPÍTULO II – DINÂMICA DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS EM LATOSSOLO E ARGISSOLO FRENTE A TEMPOS DE ADOÇÃO DO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

3.1. INTRODUÇÃO

A introdução, a manutenção e a crescente adequação de sistemas de produção vegetal para melhoria do solo em sistema de plantio direto (SPD) imprimem alterações na estrutura dos solos cultivados. Muitas das alterações na estrutura do solo (positivas e/ou negativas) podem ser identificadas por mudanças nas relações entre massa e volume, volume e volume e/ou força e área e alteram a dinâmica dos fluxos de matéria (água, gases e solutos) e energia no solo (Vezzani e Mielniczuk, 2011).

O entendimento dos fatores envolvidos na produção (ex. uso de máquinas, rotação e sucessão de culturas, manejo da cultura e do solo, etc.), combinados com informações sobre a classe de solo, fornecem subsídios importantes para o entendimento das relações de causa e efeito. Neste sentido, inúmeros trabalhos reportam o efeito do uso do solo sobre características físicas, porém sem discutir a real causa do problema, ou mesmo as implicações deste efeito sobre o solo, a planta e o ambiente (Wang et al., 2015; McPhee et al., 2015). Associado a isso, grande parte destes trabalhos apresentam informações divergentes para uma mesma variável, em uma mesma classe de solo.

Intimamente ligada à classe de solo e à mecanização, o tempo de adoção de determinado sistema de manejo (ex. plantio direto) também é apontado como um fator condicionador na divergência entre informações, em especial sobre características físicas do solo. Isso ocorre devido ao fato de que o impacto do uso intensivo do solo, por longos períodos, dá-se ao nível dos agregados, os quais são o produto do arranjo das partículas da fase sólida (Hillel, 2004), gerando um sistema poroso responsável pelos fluxos de água e ar no solo, configurando um sistema trifásico.

Alterações na estrutura do solo decorrentes do manejo modificam as relações entre as fases sólida (50% em volume) e porosa (50% em volume - sendo 25% ocupada por fluído e 25% por ar) tidas como ideais para o desenvolvimento de plantas, segundo Hillel (2004) e Brandy e Weil (2002).

Quando isso ocorre, observam-se impactos nos fluxos de água e de ar e no armazenamento de água e calor no solo, impactos no crescimento de raízes, baixa taxa de infiltração de água e perdas por escoamento superficial (Bachmair et al., 2009; Tokumoto et al., 2010), aumento nos valores de resistência mecânica à penetração de raízes e menor taxa de deformação da massa de solo (Rapper, 2005; Keller et al., 2011), alterando a qualidade do sistema (Karlen et al., 2001).

Consequências negativas em parâmetros de produção e rendimento das culturas, relacionadas ao tempo de utilização de sistemas com menor revolvimento do solo, como é caso do plantio direto, têm sido reportadas na literatura (Canarache et al., 1984; Botta et al., 2008, 2009 e 2010). Segundo estes autores, as modificações observadas no solo levaram a uma redução na produção e rendimento das culturas avaliadas. Tais perdas foram atribuídas a efeitos deletérios diretos e indiretos, combinados, que ocorrem em nível de solo (aumento na densidade e resistência à penetração, redução da porosidade, aumento nas doenças de raízes, infestação de plantas indesejáveis).

Neste sentido, caracterizar o tipo de SPD utilizado, bem como o tempo de adoção do mesmo é importante para o início de um entendimento maior de como se dá a dinâmica de propriedades físicas, químicas, biológicas e mecânicas individualmente e correlacionadas, conforme salientam Franzluebbers et al. (2014).

Diante disso, a hipótese que norteou esse estudo é a de que, independentemente da classe de solo, o aumento no tempo de adoção do SPD leva a um aumento nos valores de densidade e redução da macroporosidade do solo a valores prejudiciais ao desenvolvimento das plantas, bem como causa um aumento na capacidade de suporte de carga dos solos, em função da redução na porosidade do solo.

Para testar estas hipóteses foram avaliadas características físicas (densidade, porosidade, capacidade de retenção de água, espaço aéreo, permeabilidade ao ar, quociente entre densidade de agregados e densidade do solo e estabilidade de agregados) e mecânicas (pressão de pré-consolidação e susceptibilidade do solo à compactação) em três classes de solos sob diferentes tempos de adoção do SPD.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

Para realizar este estudo foram identificadas e selecionadas áreas em lavouras comerciais cultivadas em SPD com histórico de manejo conhecido e, cujas classes de solo consistiam de Argissolo e Latossolo. Estas classes foram escolhidas devido seu uso atual e potencial de uso com agricultura. Dentro de cada classe de solo buscou-se identificar lavouras em SPD com tempo de implantação deste sistema de até sete anos, entre sete e dez anos e, entre 20 e 30 anos, tomando por base a proposta de Anghinoni (2008). Em todas as condições de lavoura, procurou-se realizar a coleta das amostras em mesma posição topográfica e evitando locais de “cabeceira”, com intenso tráfego de máquinas devido às manobras, o que poderia influenciar nos resultados. A seguir será caracterizado melhor cada solo e sua condição de uso e manejo.

No que tange a forma de amostragem do solo, em cada classe de solo e tempo de adoção do SPD foram abertas quatro trincheiras (repetições) distantes, aproximadamente, 15 metros uma da outra. Nestas trincheiras coletaram-se amostras de solo deformadas (uma para cada camada e trincheira) e indeformadas (duas para cada camada e trincheira) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30 e 30-40 cm. As amostras indeformadas foram coletadas em anel com 6,3 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura. Todas as amostras foram acondicionadas e levadas ao Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para serem processadas.

3.2.1. Argissolo Vermelho Distrófico típico

A área experimental localiza-se na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), pertencente ao município de Eldorado do Sul/RS. O solo e clima do local são classificados como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Embrapa, 2006) e como subtropical úmido com verão quente (Cfa), respectivamente. A análise granulométrica do solo é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Análise granulométrica do Argissolo Vermelho (g kg^{-1}) das áreas sob diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto

Prof. (cm)	SPD 7			SPD 12			SPD 22		
	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila
0-5	556	176	268	593	162	245	605	173	222
5-10	557	168	274	561	166	273	598	169	234
10-15	530	162	308	550	163	287	578	159	263
15-20	532	157	311	529	162	309	540	159	301
20-30	513	157	329	494	140	366	516	133	350
30-40	461	138	401	450	153	397	457	148	395

Para este Argissolo foram identificados três tempos de adoção do SPD (sete, 12 e 20 anos), cujos locais constituem áreas experimentais com histórico de uso e manejo. Os tempos de adoção do SPD com sete e 12 anos estão contemplados dentro de uma área experimental iniciada com este sistema no ano de 2002. Anteriormente a 2002, a área experimental foi usada com pesquisas da Fundação de Estadual de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul (FEPAGRO) até 1970 e, posteriormente a isso, como repouso de animais que aguardavam traslado para locais de pastejo em outras áreas, ficando com esta ocupação até 2002, quando iniciado o experimento em SPD com tráfego controlado de máquinas, conforme descrito por Debiasi (2008). Segundo o autor, na safra 2006/07 foram realizadas duas alterações na estrutura do experimento, sendo uma delas a escarificação em um dos blocos do experimento, sendo os demais blocos mantidos em SPD. Este bloco escarificado foi considerado como a área em SPD com menor tempo de implantação, ou seja, sete anos, visto que esta foi a última vez que o mesmo teve revolvimento significativo de solo.

No que tange ao manejo das culturas, o sistema de rotação é composto por milho e soja no verão, tendo como culturas de inverno a aveia preta (antecedendo a cultura da soja) e a aveia preta + ervilhaca/nabo forrageiro (antecedendo a cultura do milho).

A escarificação das parcelas foi realizada com um escarificador marca JAN, modelo Jumbo-Matic, munido de cinco hastes parabólicas, com ponteiros de 7,5 cm de largura e ângulo de ataque da ponteia em relação ao solo de 18° , equipado com rolo destorroador e discos para corte de resíduos.

Este equipamento foi acoplado na barra de tração do trator John Deere (a seguir descrito).

A semeadura e manejo das culturas de inverno e verão são todas realizadas com conjuntos motomecanizados. Até a safra de inverno de 2011, para a semeadura das culturas era utilizado um trator John Deere, modelo 5600, 4x2 com TDA, massa de 3.800kg, pneus dianteiros 12.4-24 R1 e traseiros 18.4-30 R1, com pressão de inflação de 95 e 110 kPa, respectivamente. A partir da safra de verão 2012, passou-se a utilizar um trator Valtra, modelo BM125i, 4x2 com TDA, massa de 5.300kg, pneus dianteiros 14.9-26R1 e traseiros 23.1-30 R1, com pressão de inflação de 219 e 153 kPa, respectivamente. A pressão de contato dos pneus dianteiros e traseiros com o solo, determinada pelo método de O'Sullivan et al. (1999) para o trator John Deere e o Valtra foi de, 115 e 120 kPa e, 183 e 155 kPa, respectivamente.

Além disso, trafega na área uma colhedora autopropelida de grãos, marca SLC John Deere, 4x2 com tração traseira auxiliar (TTA), dotada de plataforma de corte de 14 pés (4,62 metros) de largura para colheita de soja ou despigadora para seis linhas de milho espaçadas de 0,45 metros. A colhedora possui massa de 7.200 kg, com distribuição de peso de 2.250 kg no eixo traseiro e 4.950 kg no eixo dianteiro; pneus dianteiros 18.4-34 R1 e traseiros 14.9-24 R1, com pressão de inflação de 182 e 140 kPa, respectivamente. A pressão de contato dos pneus dianteiros e traseiros com o solo, determinada pelo método de O'Sullivan et al. (1999) foi de 115 e 120 kPa, respectivamente.

A coleta das amostras de solo para ambos os tempos de adoção do SPD (de sete e 12 anos) foi realizada na linha de tráfego do trator, distantes dez centímetros da linha de semeadura, quando a cultura do milho estava no início do florescimento, o que corresponde a aproximadamente 60 dias após semeadura.

Para a condição do SPD 20 anos, a área experimental (desde seu início para uso agrícola) vem sendo cultivada em sistema de rotação de culturas no período de verão, ao passo que no período de inverno isso nem sempre é seguido. Por se tratar de uma área que está por longo período de tempo neste sistema, no início não havia a preocupação de armazenar informações sobre o histórico de cultivo. Dessa forma resgataram-se algumas

informações nas publicações ao longo deste período. A Tabela 2 traz as informações de manejo recuperadas em um intervalo de tempo de dez anos.

Tabela 2. Histórico do sistema de rotação/sucessão de culturas na área em SPD 20 anos

Ano safra	Período	Cultura	Ano safra	Período	Cultura
2004/2005	Inverno	Aveia	2009/2010	Inverno	Trigo
	Verão	Soja		Verão	Soja
2005/2006	Inverno	Aveia	2010/2011	Inverno	Trigo
	Verão	Soja		Verão	Milho
2006/2007	Inverno	EV/NF ¹	2011/2012	Inverno	EV
	Verão	Milho		Verão	Soja
2007/2008	Inverno	Trigo	2012/2013	Inverno	Trigo
	Verão	Soja		Verão	Soja
2008/2009	Inverno	Aveia	2013/2014	Inverno	Pousio
	Verão	Soja		Verão	Soja

¹ EV – Ervilhaca; NF – Nabo forrageiro. A escolha da cultura de cobertura no inverno dá-se com base na disponibilidade de semente, com exceção do trigo que entra a cada dois anos. Barras indicam que foi ambas as culturas semeadas em consórcio.

No que tange a mecanização agrícola, trafegam na área um trator marca Massey-Ferguson, modelo 275, 4x2, com pneus dianteiros 7.50-16 e traseiros 18.4-30 R1, com pressão de inflação de 266 e 133 kPa e pressão de contato de 216 e 147 kPa, para os pneus dianteiros e traseiros, respectivamente. A colheita das culturas de inverno e verão é realizada com a mesma colhedora John Deere, anteriormente descrita.

3.2.2. Latossolo Bruno Alumínico câmbico

A área experimental localiza-se no Campo Experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), localizada no município de Guarapuava/PR. O solo e clima do local são classificados como Latossolo Bruno Alumínico câmbico (Embrapa, 2006) e como subtropical úmido mesotérmico (Cfb), respectivamente. A análise granulométrica do solo é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Análise granulométrica do Latossolo Bruno (g kg^{-1}) das áreas sob diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto

Prof (cm)	SPD 6			SPD 30		
	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila
0-5	120	517	363	92	452	457
5-10	70	422	507	69	406	525
10-15	39	355	606	42	353	605
15-20	40	350	609	37	322	641
20-30	29	319	652	26	299	676
30-40	25	290	685	29	261	711

Para este Latossolo foram identificadas duas áreas com tempos de uso do SPD dentro do proposto neste trabalho (sete e 30 anos), ambas com histórico conhecido de uso de manejo do solo em SPD, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Histórico do sistema de rotação/sucessão de culturas da área

Ano safra	Período	Cultura	Ano safra	Período	Cultura
1996/97	Inverno	Trigo	2005/06	Inverno	Trigo
	Verão	Soja		Verão	Soja
1997/98	Inverno	Aveia	2006/07	Inverno	NF/EV
	Verão	Soja		Verão	Milho
1998/99	Inverno	NF/EV ¹	2007/08	Inverno	Cevada
	Verão	Milho		Verão	Soja
1999/00	Inverno	Cevada	2008/09	Inverno	Aveia
	Verão	Soja		Verão	Soja
2000/01	Inverno	Aveia	2009/10	Inverno	Trigo
	Verão	Soja		Verão	Soja
2001/02	Inverno	Trigo	2010/11	Inverno	NF/EV
	Verão	Soja		Verão	Milho
2002/03	Inverno	NF/EV	2011/12	Inverno	Cevada
	Verão	Milho		Verão	Soja
2003/04	Inverno	Cevada	2012/13	Inverno	Aveia
	Verão	Soja		Verão	Soja
2004/05	Inverno	Aveia	2013/14	Inverno	NF/EV
	Verão	Soja		Verão	Milho

¹ NF - Nabo forrageiro; EV – ervilhaca. Barras indicam que foi ambas as culturas semeadas em consórcio.

A área caracterizada com seis anos de SPD vinha sendo cultivada em SPD seguindo (e ainda segue) o plano piloto de rotação de culturas

apresentados na Tabela 4. No ano safra 2007/08 a mesma foi submetida a uma escarificação, cujo objetivo foi a de romper uma camada mais adensada que se estendia da superfície até 15 cm de profundidade, segundo informações do departamento técnico. Para isso, foi utilizado um escarificador de hastes parabólicas munido de disco de corte de resíduos e rolo destorroador. Após essa operação (realizada no final da colheita da safra de verão) foi implantada a cultura da aveia para cobertura do solo, sem haver outras mobilizações de solo em área total. Esta área, assim como a do Argissolo, foi considerada como sendo a área com seis anos de SPD. A área com 30 anos em SPD é lindeira a anterior e segue o mesmo plano piloto de rotação proposto na Tabela 4.

A mecanização utilizada em cada uma das áreas para semeadura, tratos culturais e colheita é descrita a seguir. Trafegam na área dois tratores Massey-Ferguson, modelos 283 e 292, 4x2 com TDA, com massa de 4.600 e 5.700kg, pneus dianteiros 12.4-24 R1 e 14.9-24 R1 e pneus traseiros 13.6-38 R1 e 18.6-38 R1, respectivamente. Além destes, trafega na área uma colhedora autopropelida de grãos Massey-Ferguson, modelo 3640, equipada com plataforma de corte de dez pés (3,2 metros) de largura. Esta colhedora possui pneus traseiros 10.00-16 e dianteiros 18.4-26 R1. As referidas pressões de inflação dos pneus e pressão de contato pneu solo estão apresentadas na Tabela 5. Segundo informações do departamento técnico da FAPA, a pressão de inflação dos pneus é a indicada pelo fabricante. Para semeadura das culturas de inverno e verão, utilizam uma semeadora adubadora Semeato, modelo SHM 17, com quatro linhas para milho, sete linhas para soja (espaçamento de 0,45 m) e 17 linhas para trigo e aveia, espaçadas em 0,11 m.

A coleta de solo foi realizada em novembro de 2013, quando a área estava semeada com trigo, estando esta em estágio fenológico de grão em massa mole, caracterizando, aproximadamente, 90 dias após a emergência. As amostras foram coletadas no centro das entrelinhas de semeadura, a fim de facilitar a coleta e a obtenção de amostras da camada até cinco centímetros, tendo em vista a grande quantidade de raízes presentes nesta camada bem como do reduzido espaçamento ente linhas da cultura do trigo.

Tabela 5. Pressão de inflação dos pneus e área de contato pneu-solo das máquinas que trafegam na área de solo Latossolo Bruno

Modelo	Rodado	Pressão (kPa)	
		Inflação	Contato pneu/solo
Trator MF 283	Traseiro	146	177
	Dianteiro	160	164
Trator MF 292	Traseiro	146	167
	Dianteiro	133	143
Colhedora MF 3640	Traseiro	239	292
	Dianteiro	159	198

3.2.3. Latossolo Vermelho Distrófico típico

A área escolhida para coleta desta classe de solo é em uma propriedade particular, localizada no município de Porto Lucena, Região Noroeste do RS. O solo e clima do local são classificados como Latossolo Vermelho Distrófico típico (Embrapa, 2006) e como subtropical úmido com verão quente (Cfa), respectivamente. A análise granulométrica do solo é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6. Análise granulométrica do Latossolo Vermelho (g kg^{-1}) das áreas sob diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto

Prof (cm)	SPD 5			SPD 10			SPD 15		
	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila
0-5	129	283	588	119	264	617	126	303	572
5-10	123	294	583	125	254	622	120	309	571
10-15	116	283	601	119	252	629	92	312	596
15-20	86	259	655	120	235	646	92	273	634
20-30	82	243	675	108	222	671	81	248	671
30-40	78	205	717	94	188	719	64	235	702

Nesta propriedade foram identificadas áreas de lavoura com os tempos de adoção do SPD e histórico de uso conhecido, apresentado na Tabela 7. A área que está contemplada dentro do SPD 5 está com quatro anos de implantação. Antes de entrar em SPD, o sistema de manejo mesclava preparo convencional de solo (aração e gradagem) e preparo reduzido (escarificação e gradagem). A partir da safra 2008/2009, após passar por correção de pH e escarificação, a mesma passou a não ser mais revolvida, iniciando no SPD, em sistema de sucessão de culturas no período de inverno.

Tabela 7. Histórico do sistema de rotação/sucessão de culturas da área

Ano safra	Período	Cultura	Ano safra	Período	Cultura
SPD 6					
2009/2010	Inverno	Trigo	1999/2000	Inverno	Aveia
	Verão	Soja		Verão	Soja
2010/2011	Inverno	Pousio	2000/2001	Inverno	Trigo
	Verão	Soja		Verão	Soja
2011/2012	Inverno	Aveia	2001/2002	Inverno	Trigo
	Verão	Soja		Verão	Soja
2012/2013	Inverno	Trigo	2002/2003	Inverno	Aveia
	Verão	Soja		Verão	Soja
2013/2014	Inverno	Trigo	2003/2004	Inverno	Aveia/EV ¹
	Verão	Soja		Verão	Soja
SPD 10			2004/2005	Inverno	Nabo
2007/2008	Inverno	Ervilhaca	2005/2006	Verão	Milho
	Verão	Soja		Inverno	Aveia
2008/2009	Inverno	Aveia	2006/2007	Verão	Soja
	Verão	Milho		Inverno	Erv ¹
2009/2010	Inverno	Ervilhaca	2007/2008	Verão	Milho
	Verão	Soja		Inverno	Erv ¹
2010/2011	Inverno	Aveia	2008/2009	Verão	Soja
	Verão	Milho		Inverno	Aveia
2011/2012	Inverno	Aveia	2009/2010	Verão	Milho
	Verão	Milho		Inverno	Aveia/Azev ²
2012/2013	Inverno	Trigo	2010/2011	Verão	Soja
	Verão	Soja		Inverno	Aveia/Azev ²
2013/2014	Inverno	Trigo	2011/2012	Verão	Soja
	Verão	Soja		Inverno	Aveia
SPD 15			2012/2013	Verão	Milho
1997/1998	Inverno	Pastagem		Inverno	Trigo
	Verão	Soja	2013/2014	Verão	Soja
1998/1999	Inverno	Trigo		Inverno	Trigo
	Verão	Soja	Verão	Soja	

¹ Ervilhaca; ² Azevém. Barras indicam que foi ambas as culturas semeadas em consórcio.

Nesta propriedade o SPD 10 está contemplado por uma área que está há oito anos em SPD. Até o ano de 2002 o sistema de manejo do solo era o de preparo convencional, sendo, a partir de 2002, iniciado o SPD. Entretanto, em 2005 e 2006 foi realizada a escarificação da área e, a partir desta, toda a

área vem sendo manejada em SPD procurando praticar a rotação de culturas tanto no período de inverno quanto de verão, conforme Tabela 7.

Para a área que contempla o SPD 15, a mesma teve início neste sistema em 1997 sendo, até então, manejada sob sistema de preparo convencional, com uso da área no período de inverno com pastagem para alimentação animal. No que tange ao sistema de cultivo, predomina o cultivo da soja no verão.

Quanto ao padrão de uso de maquinário, até a safra 2011/12 trafegavam na área para fins de semeadura e tratos culturais um trator e uma colhedora autopropelida de grãos (a mesma descrita no item 3.2.2). O trator Valmet, modelo 65, 4x2, foi substituído na safra 2012/13 por um trator John Deere, modelo 5078, 4x2 com TDA, massa de 4.000 kg, com pneus dianteiros 12.4-24 R1 e traseiros 18.4-30 R1, com pressão de inflação de 133 e 160 kPa, respectivamente. A pressão de contato pneu-solo calculada pelo método de O'Sullivan et al. (1999) é de 139 e 164 kPa, para os pneus dianteiros e traseiros, respectivamente.

A coleta de solo foi realizada em janeiro de 2014, nas entrelinhas da cultura da soja, quando esta estava em estágio fenológico de florescimento e formação de legumes.

3.2.4. Análises

Todas as amostras de solos coletadas foram trazidas para o Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As amostras de solo deformadas foram destorroadas a fim de obter agregados de diferentes tamanhos. Os agregados de solo foram rompidos em seus planos de fraqueza, colocados para secar ao ar para posterior análise.

As amostras indeformadas foram saturadas com água destilada por capilaridade, pesadas e equilibradas em mesa de tensão a 10 kPa, com posterior pesagem a fim de se obter a massa de água perdida por drenagem. Posteriormente, as amostras foram equilibradas na câmara de Richards com pressão de 100 kPa, sendo ao final desta etapa, novamente pesadas.

Cessada esta etapa cada amostra foi submetida à medição da condutividade ao ar (k_{ar}). Para isso foi construído um equipamento conforme Prevedello (1996), representado na Figura 2.



1 – Carga hidráulica constante; 2 – válvula de controle de vazão; 3 – câmara de ar; 4 – aparato para acoplamento da amostra; 5 – manômetro de água.

Figura 2. Permeâmetro de carga constante desenvolvido para medição da permeabilidade ao ar das amostras de solo.

Com base na Figura 2, à medida que a água ascende na câmara de ar, o ar adquire uma pressão maior que a atmosférica, fluindo pela amostra de solo e a permeabilidade ao ar (k_{ar}) pode ser então calculada pela densidade de fluxo e pela diferença de pressão entre o ar na câmara de ar (esquema) e a atmosférica, conforme Equação 1:

$$q_{ar} = -K_{ar}(\theta) \frac{\partial p}{\partial s} \quad \text{Equação 1}$$

Onde q_{ar} é a densidade de fluxo de ar (m/s); k_{ar} é a condutividade do solo ao ar (m^2/Pascal) e $\partial p/\partial s$ é o gradiente de pressão (Pascal/m), que é a força responsável por esse movimento no solo.

Determinada a k_a , as amostras foram cuidadosamente embaladas e armazenadas em caixa de isopor a fim de reduzir ao máximo as perdas de água. Posteriormente, cada amostra foi submetida ao ensaio de compressão uniaxial utilizando um consolidômetro automático com interface homem-máquina (IHM) modelo CNTA-IHM/BR-001/07, fabricado pela Masquetto Automação e Equipamentos. A metodologia de execução é descrita na norma NBR 12007/90 (ABNT, 1990). No entanto, devido às particularidades das cargas aplicadas aos solos agrícolas, foram introduzidas algumas modificações, conforme sugerido por Carpenedo (1994). De maneira resumida, aplicou-se às amostras indeformadas pressões equivalentes a 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa. Durante a aplicação de cada uma destas cargas, os dados das leituras da deformação experimentada pelas amostras foram lidos e armazenados instantaneamente até o tempo pré-estabelecido de 5 minutos para cada carga. O tempo máximo do carregamento (5 minutos) corresponde ao necessário para que ocorra 95% da deformação máxima, tempo este definido por meio da realização de pré-testes determinados por Machado (2001). Após finalizar cada ensaio, as amostras foram pesadas e colocadas para secar em estufa à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 72 horas, quando foram novamente pesadas.

Embora o software do consolidômetro calcule a pressão de pré-consolidação entre outros parâmetros, os dados de deformação referente a cada carga foram trabalhados no software Excel®, desenvolvido pela Microsoft Corporation, conforme realizado por Severiano et al. (2011).

As determinações da densidade, da macroporosidade, da microporosidade e da porosidade total foram efetuadas conforme Embrapa (1997), para cada uma das amostras indeformadas.

Nas amostras de solo deformadas, coletadas nos mesmos locais e profundidades, foram realizadas as análises de densidade de partículas (D_p), densidade de agregados (D_a), estabilidade de agregados (EA) e os Limites de Atterberg.

A D_p foi realizada pelo método do balão volumétrico modificado, conforme proposto por Gubiani et al. (2006). A D_a foi realizada por meio da ruptura de uma massa de solo em seus planos de fraqueza a fim de se obter agregados de diâmetro nominal de quatro milímetros. Estes foram secos em

estufa, impermeabilizados com óleo mineral SAE 40, colocados para drenar o excesso de óleo em papel filtro e, posteriormente, determinado seu volume com base no princípio de Arquimedes.

A estabilidade de agregados foi realizada por meio da metodologia descrita por McCalla (1944), modificada por Bruce_Okine e Lal (1973) e, Imenson e Vis (1984), que usa o princípio do frasco de Mariotti. Para cada classe de solo e tempo de adoção do SPD, dez agregados de cada camada (240 para cada tempo de adoção do SPD) de diâmetro 4,8 mm, foram submetidos a este procedimento. Os agregados separados foram umedecidos com álcool 46% e dispostos para saturar por capilaridade em mesa de tensão. Posteriormente, aplicou-se uma tensão de 10 kPa por um período de 24 horas, a fim de equilibrar a umidade. Para determinar a estabilidade dos agregados, foi montado um dispositivo onde se montou um aparato com o princípio do frasco de Mariotti conectado a um tubo tipo “espaguete”, com 1,25 mm de diâmetro. A saída da água (na forma de gotas sequencias) foi colocada a uma distância de um metro da superfície do agregado, gerando uma gota de 4 mm de diâmetro que atinge o agregado com uma energia cinética de $4,3 \times 10^{-4}$ Joules. Assim, cada agregado foi disposto sobre uma peneira de malha 2,4 mm e submetido ao impacto de sucessivas gotas até que 50% de sua massa desagregasse, condição essa atingida quando todo o agregado passava pela peneira de malha 2,4 mm.

Para determinação dos Limites de Atterberg, as amostras de solo foram passadas em peneira de malha 425 μ m obtendo uma certa massa de solo, utilizada para determinação dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), conforme metodologia descrita em Embrapa (1997) e normalizados pela ABNT/NBR 6459 (ABNT, 2004) e ABNT/NBR 7180 (ABNT, 1982).

A análise estatística foi realizada por meio da comparação das médias dos valores de cada variável física e/ou mecânica avaliada, dentro da mesma profundidade entre os tempos de adoção do SPD para cada classe de solo. Para cada conjunto de dados (variável física ou mecânica) foi analisada a normalidade dos mesmos e, quando normais, a comparação de médias deu-se pelo teste de Tukey, ao passo que quando não atendida esta propriedade, a comparação deu-se pelo teste de Wilcoxon. Após análise individual dos dados, comparando cada variável física ou mecânica entre os tempos de adoção do

SPD, todo o conjunto de dados (dentro de cada classe de solo) foi submetido a uma análise de correlação. Devido à particularidade de parte dos dados não atenderem a distribuição normal, a correlação utilizada foi a de Spearman, conforme Zimmermann (2014). Todas as análises foram realizadas utilizando o software estatístico SAS – Statistical Analise System, versão 9.0.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Resultados

Os resultados das variáveis físicas macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, conteúdo volumétrico de água retido a 10 kPa e espaço aéreo são apresentados nas Figura 3, Figura 4 e Figura 5 e, referente às variáveis mecânicas pressão de pré-consolidação e índice de compressibilidade, os resultados são apresentados na Figura 7.

Diferenças significativas entre os tempos de adoção do SPD foram observadas para a macroporosidade (Latosolo Bruno - Figura 3c), microporosidade (Argissolo Vermelho - Figura 3b), densidade do solo (Argissolo Vermelho - Figura 4a) e espaço aéreo (Latosolo Bruno - Figura 5b). No que tange às variáveis mecânicas, diferenças significativas entre os tempos de adoção do SPD foram observadas somente para o índice de compressibilidade nas condições de Argissolo Vermelho e Latossolo Vermelho (Figura 7b e Figura 7f, respectivamente).

Na análise dos valores de condutividade do solo ao ar (variável que permite inferir sobre os fluxos de água e ar no solo) observaram-se diferenças significativas entre os tempos de adoção do SPD nas três classes de solos (Figura 6) sendo que, de maneira geral, há uma maior redução nos valores deste parâmetro quanto maior o tempo de adoção do SPD.

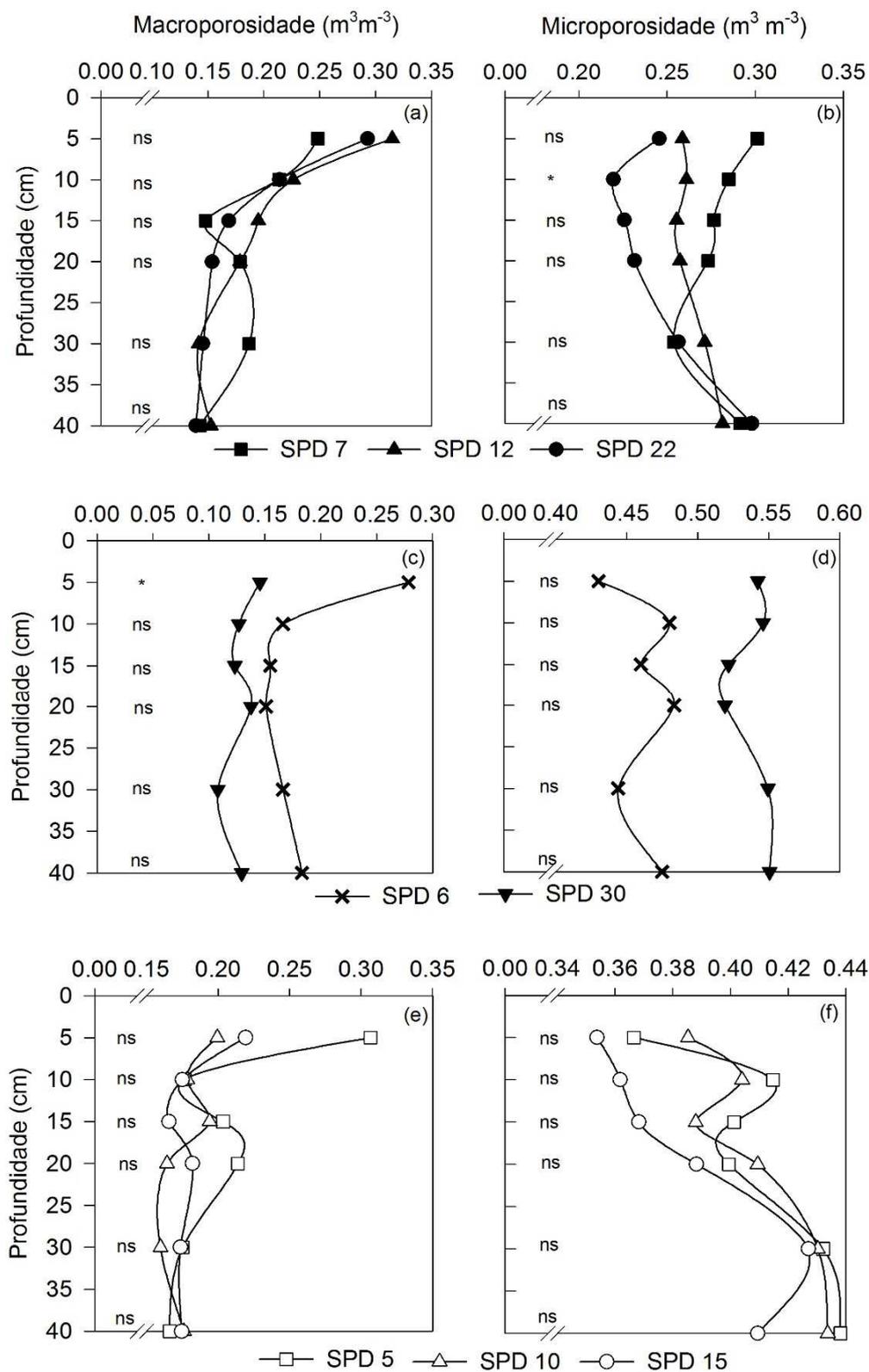


Figura 3. Valores de macroporosidade e microporosidade na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a, b), Latossolo Bruno (c, d) e Latossolo Vermelho (e, f). ns; * – Não significativo e significativo, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

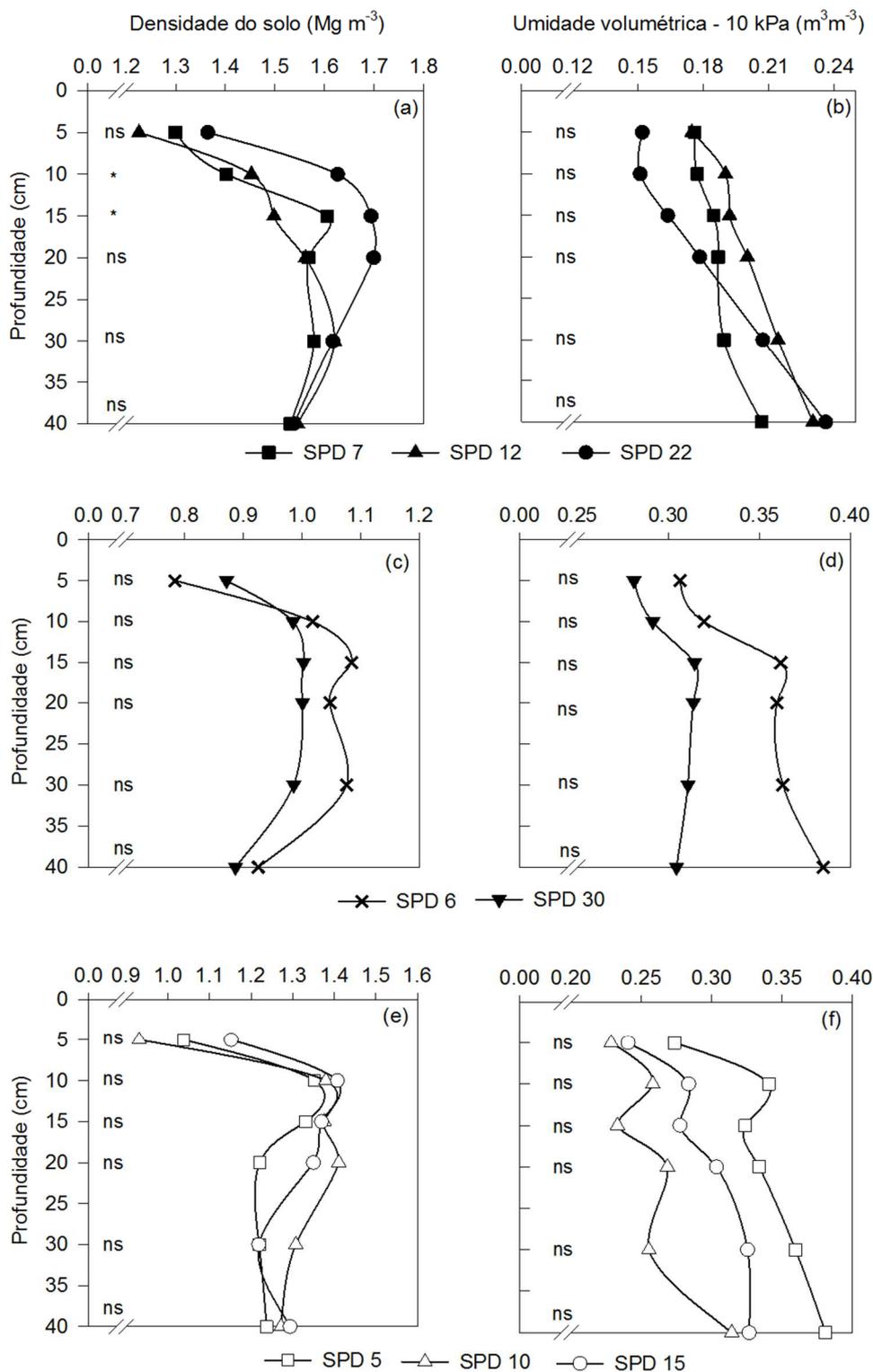


Figura 4. Valores de densidade do solo e conteúdo volumétrico de água, na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a, b), Latossolo Bruno (c, d) e Latossolo Vermelho (e, f). ns; * – Não significativo e significativo, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

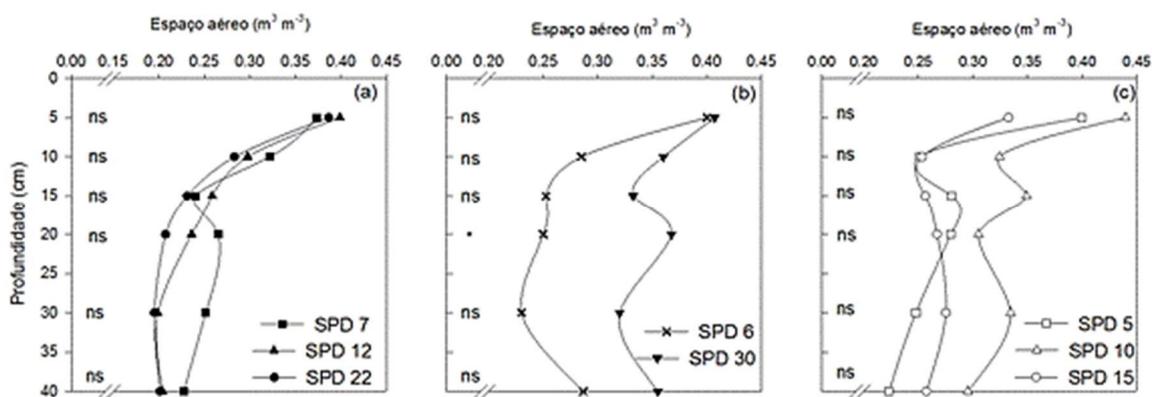


Figura 5. Valores de espaço aéreo na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a), Latossolo Bruno (b) e Latossolo Vermelho (c). ns; * – Não significativo e significativo, respectivamente, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

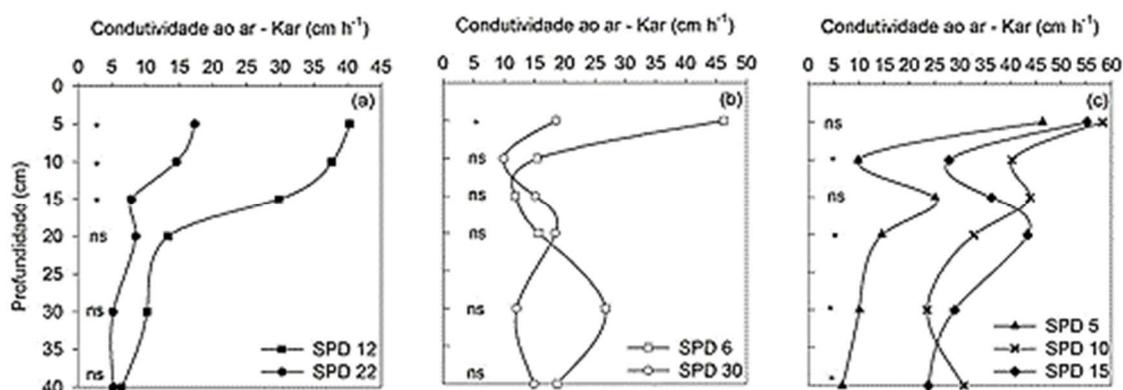


Figura 6. Valores de condutividade ao ar, na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a), Latossolo Bruno (b) e Latossolo Vermelho (c). ns; * – Não significativo e significativo, respectivamente, pelo teste de Wilcoxon ($p < 0,05$).

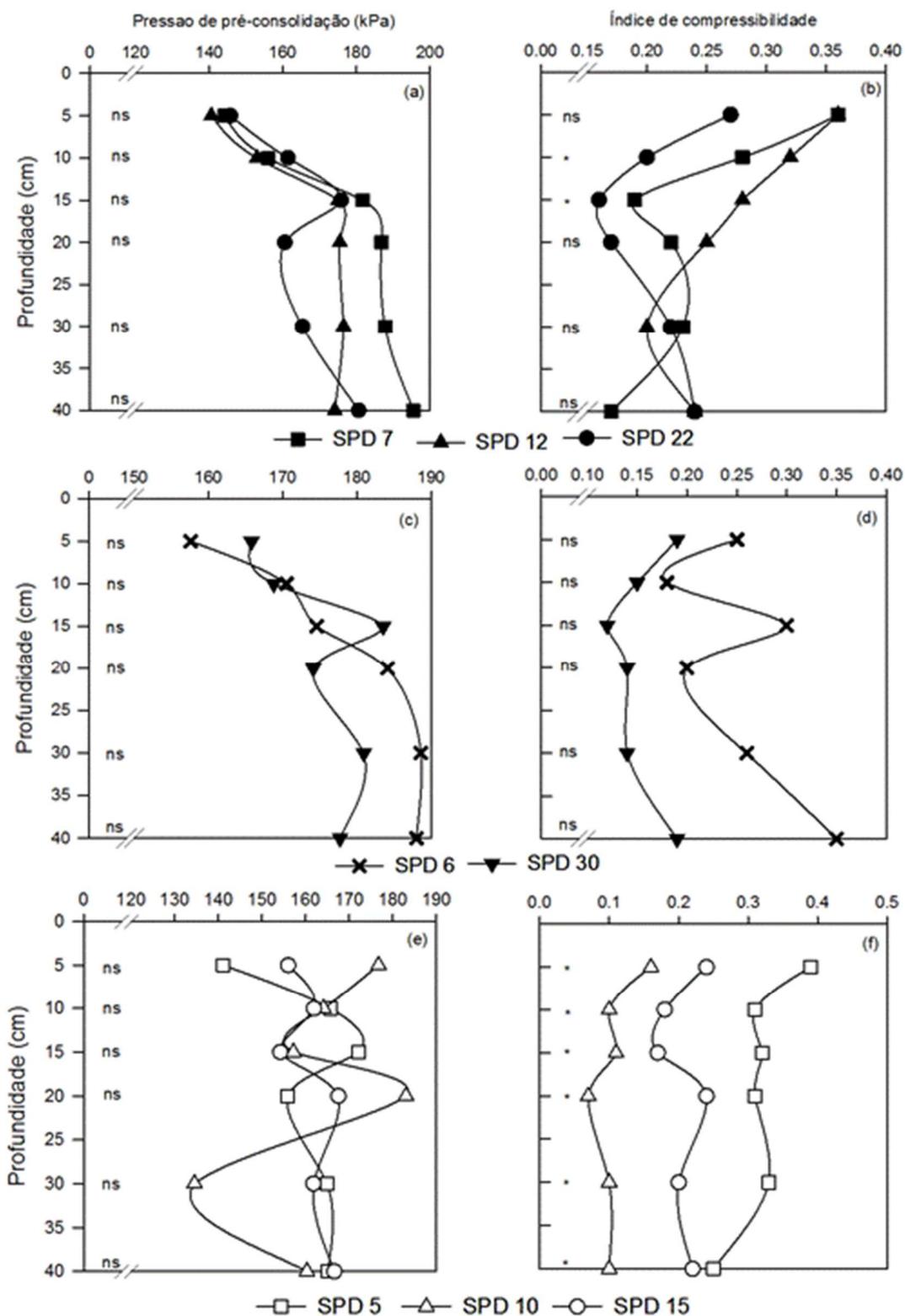


Figura 7. Valores de pressão de pré-consolidação e índice de compressibilidade, na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a, b), Latossolo Bruno (c, d) e Latossolo Vermelho (e, f). ns; * – Não significativo e significativo, respectivamente, pelo teste de Wilcoxon ($p < 0,05$).

Foram avaliados a estabilidade de agregados e o estado do sistema poroso inter-agregados (dado pela relação densidade de agregados/densidade do solo – D_a/D_s) dentro de cada classe de solo e tempo de adoção do SPD como forma de mensurar parâmetros de solo que poderiam auxiliar na caracterização e entendimento em nível de agregado.

Diferenças significativas na estabilidade dos agregados (dado pela energia necessária para desagregação) entre os tempos de adoção do SPD foram observadas no Argissolo Vermelho (na camada de 20 cm) e no Latossolo Vermelho – na camada até 15 cm (Figura 8a e Figura 8c, respectivamente).

No que tange à relação D_a/D_s (que permite inferir sobre a qualidade da estrutura do solo) não foram observadas diferenças significativas entre os tempos de adoção do SPD para nenhuma das camadas, independentemente da classe de solo (Tabela 8). Entretanto, quando analisado em profundidade, dentro de cada tempo de adoção do SPD, diferenças significativas foram observadas nas três classes de solos, nos tempos de adoção SPD 12 (Argissolo Vermelho), SPD 6 (Latosolo Bruno) e em todos os tempos de adoção no Latossolo Vermelho (Tabela 8).

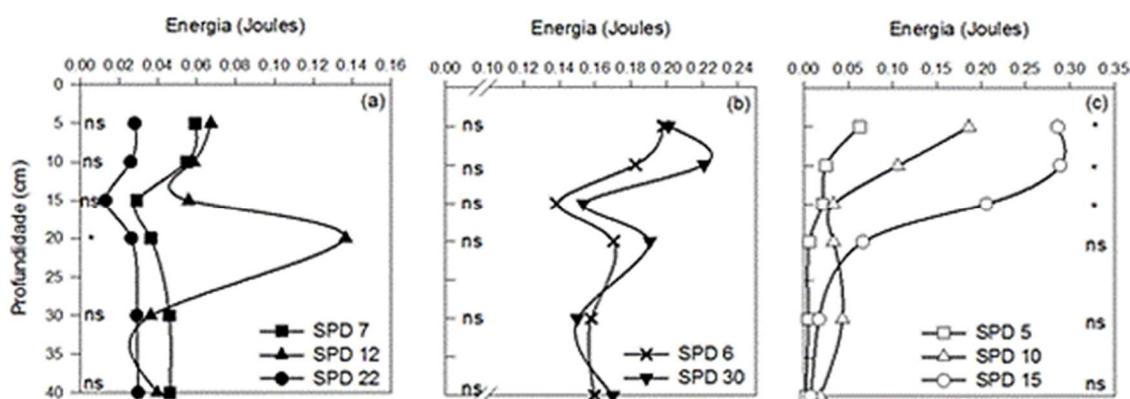


Figura 8. Resistência de agregados à desagregação, na camada 0-40 cm, para cada tempo de adoção do sistema de plantio direto no Argissolo Vermelho (a), Latossolo Bruno (b) e Latossolo Vermelho (c). ns; * – Não significativo e significativo, respectivamente, pelo teste de Wilcoxon ($p < 0,05$).

Tabela 8. Quociente entre densidade de agregados e densidade do solo (Da/Ds) nos diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto dentro de cada classe de solo

Profundidade (cm)	Argissolo Vermelho Distrófico típico		
	SPD 7	SPD 12	SPD 22
0-5	1,16 ^{Ns} a	1,37 ^{Ns} a	1,25 ^{Ns} a
5-10	1,04 a	1,12 ab	1,00 a
10-15	0,99 a	1,10 b	1,04 a
15-20	0,99 a	1,07 b	1,03 a
20-30	0,91 a	1,08 b	1,04 a
30-40	1,10 a	1,08 b	0,99 a
----- Latossolo Bruno Aluminico câmbico -----			
	SPD 6	SPD 30	
0-5	1,64 ^{Ns} a	1,43 ^{Ns} a	
5-10	1,42 ab	1,47 a	
10-15	1,33 ab	1,38 a	
15-20	1,28 b	1,38 a	
20-30	1,36 ab	1,44 a	
30-40	1,47 ab	1,58 a	
----- Latossolo Vermelho Distófico típico -----			
	SPD 5	SPD 10	SPD 15
0-5	1,52 ^{Ns} a	1,86 ^{Ns} a	1,50 ^{Ns} a
5-10	1,17 c	1,32 b	1,26 bc
10-15	1,26 bc	1,37 ab	1,32 abc
15-20	1,42 ab	1,26 b	1,30 abc
20-30	1,30 abc	1,35 b	1,46 ab
30-40	1,23 bc	1,34 b	1,25 c

^{Ns} – Não significativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) comparando médias nas linhas. Letras iguais, minúsculas na coluna, comparam médias dentro de cada tratamento e não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A análise de correlação (significativa) dos indicadores físicos e mecânicos dentro de cada classe de solo, englobando todos os tempos de adoção do SPD é sintetizada na Tabela 9 e detalhada nos Anexo 3 Anexo 4 e Anexo 5.

Tabela 9. Síntese da matriz de correlação entre variáveis físicas e mecânicas

Argissolo Vermelho Distrófico típico	
Significativa e Positiva	Significativa e Negativa
Macro x (IC, Kar, EA, Da/Ds)	Macro x (Micro, Ds, Uv, PPC)
Micro x (Uv, PPC)	Ds x (IC, Kar, EA, Da/Ds)
Ds x (PPC)	Uv x (Kar, EA, Da/Ds)
Uv x (PPC)	PPC x (IC, Kar, EA, Da/Ds)
IC x (Kar, EA, Da/Ds)	
Kar x (EA, Da/Ds)	
EA x (Da/Ds)	
Latossolo Bruno Aluminico câmbico	
Macro x (IC, Kar)	Macro x (Micro, Ds, Da/Ds)
Micro x (IC, Kar)	Ds x (Uv, PPC, Da/Ds)
Ds x (Kar, EA)	Uv x (EA)
Uv x (Da/Ds)	PPC x (EA)
PPC x (Da/Ds)	EA x (Da/Ds)
IC x (Kar)	
Latossolo Vermelho Distrófico típico	
Macro x (IC, EA)	Macro x (Ds, Da/Ds)
Micro x (Uv)	Ds x (IC, EA)
Ds x (Da/Ds)	Uv x (Kar, EA, Da/Ds)
Uv x (PPC, IC)	PPC x (EA)
Kar x (EA)	IC x (Kar)
	Kar x (Da/Ds)
	EA x (Da/Ds)

Macro – macroporosidade; Micro – microporosidade; Ds – densidade do solo; EA – espaço aéreo; IC – índice de compressibilidade; Uv – umidade volumétrica; Kar – condutividade ao ar; Da/Ds – quociente entre densidade de agregados e densidade do solo; PPC – pressão de pré-consolidação.

3.3.2. Discussão

Independentemente da classe de solo, o tempo de adoção do SPD teve pouco reflexo sobre a dinâmica da densidade, da porosidade (macro e microporosidade) e do espaço aéreo. Entretanto, quando significativas as diferenças, estas ocorreram nos primeiros 15cm de profundidade. Isso indica que, para estes solos, com o menor revolvimento e com o aumento na intensidade de tráfego (associado, por vezes, com maior massa dos conjuntos motomecanizados) há uma sensível alteração na estrutura do solo, não detectada com clareza por estes atributos isolados. Isso pode estar associado ao fato de que estes atributos podem sofrer variações dentro de uma mesma estação de cultivo, dificultando a interpretação dos resultados, corroborando com Or (1996) e Keller et al. (2011), os quais apontam que abordagens sobre a estrutura do solo baseada em avaliações na relação massa:volume são pouco

sensíveis em captar alterações na escala de poros, o que é crucial para o entendimento de fluxos e processos de transporte de água e gases no solo. Entretanto, quando analisados atributos que permitem inferir sobre processos, como é o caso da condutividade ao ar (Figura 6), observa-se que há uma alteração nos valores, indicando que o arranjo do sistema poroso foi comprometido.

Pelo histórico de uso das áreas em estudo, a dinâmica observada nos parâmetros avaliados é creditada ao efeito do agente causador da compactação (a pressão aplicada no solo pelos rodados dos conjuntos motomecanizados) ser superior a capacidade de suporte de carga do solo. Quando isso ocorre, os agregados absorvem parte da energia aplicada e que não é dissipada após o alívio da carga, gerando uma deformação plástica que causa aumento na densidade e redução na porosidade, conforme apontam Lambe e Whitman (1969).

As deformações plásticas na massa de solo, identificadas pelas diferenças significativas nos valores de densidade, porosidade e condutividade ao ar, ocorreram até a profundidade de 15cm. Tal dinâmica para a densidade e porosidade (também verificada por Mazurana (2011) para mesma classe de solo e sistema de manejo e por Arvidsson et al. (2011) em estudo sobre o efeito do tipo de banda de rodagem sobre o solo), é atribuída ao padrão de tráfego, tipo de pneus e pressão de inflação dos pneus que equipam os conjuntos motomecanizados. De acordo com Söehne (1958), a pressão de inflação dos pneus e a área de contato pneu-solo têm maior impacto na superfície do solo, ao passo que a carga sobre cada pneu gera maior impacto em subsuperfície, corroborando com Chamen et al. (2003) e Hillel (1982). De acordo com este último, a tensão aplicada pelos rodados tende a se concentrar a uma profundidade no solo variável entre $1/3$ e $1/5$ da largura dos pneus o que, para o padrão de rodados que equipam os conjuntos motomecanizados que trabalham nas áreas, esta máxima pressão dar-se-ia até a camada de 15-17 cm, corroborando com os dados apresentados no presente estudo.

Tomando como base teórica a mecânica do solo para estudos de suporte de carga, inicialmente apresentada por Larson et al. (1980) e posteriormente trabalhada por Lebert e Horn (1991) e Dias Júnior e Pierce (1996), os solos apresentariam uma “memória” referente aos manejos

empregados ao longo dos anos. Esta memória estaria registrada nos agregados do solo. Neste sentido, quando analisados processos que ocorrem no solo, como é o caso da condutividade ao ar, observou-se que quanto maior o tempo de uso do solo em SPD ou quanto maior a intensidade de preparo que o solo foi submetido no passado (este em uma escala de tempo menor do que cinco anos em SPD), menores foram os valores de condutividade ao ar (Figura 6). Isso vai ao encontro da proposta inicial do trabalho, baseada em Anghinoni (2008), o qual propôs uma escala de tempo dividindo o SPD em fases (Figura 1), sendo que em SPD de até cinco anos, o solo passaria por um rearranjo da sua estrutura (ex. conectividade de poros intra e inter-agregados), o que levaria a uma menor condutividade ao ar das amostras de solo (Figura 6c).

No que tange à porosidade mínima de aeração, aqui representada pelo espaço aéreo (EA), independentemente da classe de solo e do tempo de adoção do SPD, os valores observados estão acima dos considerados pela literatura como críticos ao desenvolvimento de plantas (que tem valor médio de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). De acordo com van Lier (2010), o valor médio de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ pode variar bastante em função da profundidade do sistema radicular e temperatura do solo (uma vez que esta altera a taxa de respiração e, portanto, o consumo de oxigênio). Dessa forma, valores de EA entre $0,05$ e $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ poderiam ser críticos ao desenvolvimento de plantas. Neste sentido, os resultados mostram que, para a condição de limite máximo de retenção de água pelo solo (dados pelo conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo – 10 kPa) os valores de EA ainda estariam dentro do limite adequado.

Dinâmica semelhante aos dados físicos foi observado com as variáveis mecânicas avaliadas (pressão de pré-consolidação, índice de compressibilidade e estabilidade de agregados). A ausência de diferenças significativas para a pressão de pré-consolidação observada em todas as classes de solos e tempo de adoção do SPD está relacionada com a magnitude na variação observadas nas variáveis físicas (densidade e porosidade) e com o conteúdo de água no solo (Keller et al., 2013). A ausência de diferenças significativas daquelas variáveis tem como resposta a ausência de diferenças significativas no valor da pressão de pré-consolidação, além do que este atributo é uma avaliação indireta da variação de valores apresentada

por um atributo direto, a densidade do solo, na medida em que o solo é submetido a um carregamento.

Independentemente da inexistência de diferenças, observou-se que os valores de pressão de pré-consolidação foram iguais ou superiores aos aplicados na interface pneu-solo pelos rodados das máquinas existentes nas propriedades (estando as amostras dentro da faixa de friabilidade para todos os solos – Anexo 1). Isso sugere que, se respeitada a condição de tráfego de máquinas dentro do intervalo de umidade do solo que caracteriza a condição de friabilidade (Anexo 1), há menores riscos de se imprimir compactação adicional aos solos. Entretanto, isso não garante que não possa haver compactação adicional ao solo, mesmo estando na condição de friabilidade. Isso porque variáveis como a quantidade e tempo de aplicação da carga, a frequência de tráfego, a velocidade, o tipo de pneus e a patinagem dos rodados motrizes interferem na deformação imposta ao solo, conforme salientam Carpenter et al. (1985), Or e Ghezzehei (2002), Chamen et al. (2003), Keller e Lamandé (2010) e Keller et al. (2013).

Ao contrário do que ocorreu em relação à pressão de pré-consolidação, diferenças significativas foram observadas para índice de compressibilidade no Argissolo Vermelho e Latossolo Vermelho (Figura 7b, e f, respectivamente). Em uma amplitude de valores que variam de zero a um (não suscetível e altamente suscetível à compactação, respectivamente), observou-se menor suscetibilidade à compactação para os maiores tempos de adoção do SPD. Isso pode ser entendido de duas formas: i) quanto maior o tempo de adoção do sistema, melhor torna-se a estrutura do solo, suportando mais carga com menor incremento de deformações plásticas, ou ii) o fato de que estes solos já foram submetidos no passado a cargas superiores ao suportado pela estrutura gerando deformações plásticas, não permitindo novas deformações.

Os dados físicos associados aos mecânicos indicam que o segundo entendimento parece ser o correto, uma vez que os valores de densidade do solo no campo para a condição do Argissolo Vermelho e do Latossolo Vermelho nos maiores tempos de adoção do SPD estão muito próximos dos valores máximos sugeridos por Reichert et al (2003). Além disso, especificamente para a condição do Latossolo Vermelho, o índice de compressibilidade seguiu a variação no conteúdo de água das amostras para

cada tempo de adoção do SPD, corroborando com Kondo e Dias Junior (1999b) e Braida (2004). Isso acontece porque, com o aumento no conteúdo de água no solo, há uma redução nas forças de coesão e atrito entre as partículas, o que facilita o cisalhamento nos pontos de contato entre as mesmas, tornando o solo mais suscetível à compactação.

A estabilidade dos agregados, determinada pela energia gerada pelo impacto de gotas sobre um agregado até que 50% de sua massa seja desagregada (Figura 8), apresentou diferenças significativas entre os tempos de adoção do SPD para a camada de 15 a 20 cm no Argissolo Vermelho e, para todas as camadas até 15 cm, para o Latossolo Vermelho. Essas diferenças são atribuídas aos mecanismos de agregação que envolvem a fração argila e o material orgânico (Lal e Shukla, 2004) e a ação mecânica dos rodados. Partindo do princípio de que a fração argila tem o mesmo peso para os tempos de adoção do SPD, bem como as taxas de adição de material vegetal e de acúmulo/perda de matéria orgânica sejam as mesmas em razão das condições de ambiente, conforme modelo proposto por Greenland (1995) e Bayer (1996), as diferenças observadas sugerem que os agregados foram formados mecanicamente pela ação do tráfego.

Essa hipótese é sustentada quando se analisa o quociente entre a densidade de agregados e a densidade do solo (Tabela 8). Embora não haja diferença entre os tempos de adoção do SPD, os valores deste quociente são classificados como muito baixos a médios ($<1,15$) e alto a muito altos ($>1,15$) para o Argissolo Vermelho e Latossolo Vermelho, respectivamente. Segundo Rücknagel et al. (2007), valores menores do que 1,15 indicam estrutura coesiva (compactação severa), ao passo que valores maiores do que 1,15 indicam estrutura em blocos e blocos subangulares, caracterizando agregados formados e afrouxados mecanicamente. Dessa forma, os poros intra-agregados estariam comprometidos e os fluxos de água e ar no solo aconteceriam em nível de poros inter-agregados ou pelas fendas abertas pelo afrouxamento mecânico. Estes mesmos autores apontam que o aumento da heterogeneidade da densidade do solo reduz a resistência entre os agregados, que foi inicialmente explicada por Hartge e Sommer (1982) pelo número de pontos de contato entre as partículas.

Solos em sistema de plantio direto apresentam tendência de maior heterogeneidade entre camadas devido ao não revolvimento. Dessa forma, levaria a uma redução nos pontos de contato entre partículas dentro e entre agregados e, ao longo do tempo de adoção deste sistema, haveria maior suscetibilidade do mesmo a sofrer compactação adicional. Entretanto, sabe-se que este não é o único mecanismo que, isoladamente, governa a maior ou menor suscetibilidade à compactação.

Os resultados da matriz de correlação, sintetizados na Tabela 9, convergem com as discussões realizadas, bem como apresentam elementos que reforçam a importância de indicadores combinados e/ou que permitem inferir sobre processos no solo.

Nesse sentido, constatou-se a estreita relação da macroporosidade com todas as variáveis físicas e mecânicas avaliadas (para a condição de solo com textura franca) e somente para algumas variáveis físicas para a condição de solo com textura argilosa. Isso sugere que em solos com textura arenosa, a magnitude dos danos causados por problemas de compactação adicional tende a ser maior, quando comparado com solos de textura mais argilosa. Naqueles solos, a estabilidade dos agregados está mais dependente da matéria orgânica e menos da fração mineral, corroborando Oades e Waters (1991) e Goldchin et al. (1997), que apontam ser a matéria orgânica o principal agente cimentante entre agregados em solos onde a fração mineral tem menor poder de floculação.

Diferentemente da macroporosidade, a microporosidade está mais correlacionada com a retenção de água no solo, ao passo que a densidade do solo apresentou um grande número de correlações (positivas e negativas) com as variáveis que descrevem processos. Isso sugere que, pela facilidade de obtenção de seu valor, este é um elemento importante em estudos de modelagem de fluxos que ocorrem no solo, assim como já é utilizada em modelos para estimar a pressão de pré-consolidação (Gupta et al., 1989, Dias Junior e Pierce, 1996).

Entre o grupo de variáveis correlacionadas dentro de cada classe de solo, três merecem destaque pelo número de correlações com as demais: o quociente entre a densidade de agregados e a densidade do solo (sete positivas e dez negativas), a porosidade mínima de aeração (seis positivas e

oito negativas) e a condutividade ao ar (seis positivas e cinco negativas). Isso sugere que variáveis associadas, que medem processos, conseguem captar diferenças mínimas não identificadas por relações entre massa e volume, massa e massa ou volume e volume. Isso vai ao encontro do que salientam Or (1996) e Keller et al. (2011) para a variável densidade do solo, quando afirmam ser a mesma um indicador pobre das modificações da estrutura do solo.

Com base nos resultados das variáveis físicas e mecânicas apresentadas, o aumento no tempo do uso do SPD converge com a primeira hipótese deste trabalho, mas não permite concluir com clareza a segunda hipótese. Entretanto, as observações realizadas fornecem subsídios para melhorar a proposta de Anghinoni (2008), cujo foco é voltado para as variáveis de fertilidade do solo, apontando que as alterações físicas observadas no SPD na medida em que aumenta o tempo de uso deste sistema podem ser contrárias às esperadas. Parte destas divergências pode ser devida ao fato de que, na medida em que aumenta o tempo de adoção do SPD, impõe-se, pelo uso, uma estratificação do perfil de solo explorado (os primeiros 20 cm), indo ao encontro do exposto por Hartge e Sommer (1982) anteriormente discutido.

3.4. CONCLUSÕES

A análise dos dados físicos e mecânicos das diferentes classes de solos e tempos de adoção do sistema de plantio direto permite concluir que:

1. O tempo de adoção do sistema de plantio direto gerou modificações na estrutura do solo. Estas modificações não foram passíveis de identificação pela análise das variáveis física isoladas, mas sim por variáveis físicas que governam processos como fluxos de ar e água. Tais modificações aparentam ocorrer nas camadas superficiais do solo, onde se concentra a maior parte do sistema radical das plantas.
2. Independentemente da classe de solo estudada, os valores de pressão de pré-consolidação não diferiram entre os tempos de adoção do sistema de plantio direto, bem como apresentaram menor variação até a camada de 20 cm. Isso sugere que o efeito do padrão de tráfego sobre a estrutura do solo ficou concentrada nesta camada, corroborando com os dados físicos.
3. Os valores de pressão de pré-consolidação encontrados são superiores aos aplicados pelos rodados das máquinas, indicando que, se respeitados os

limites de umidade do solo para tráfego, o solo não sofrerá compactação adicional.

4. O uso de variáveis físicas combinadas, que permitem inferir sobre os processos que ocorrem no solo, embora mais onerosas em tempo, se correlacionaram com uma maior gama de variáveis físicas e mecânicas.

4. CAPÍTULO III – DINÂMICA DA CURVA DE PRESSÃO-DEFORMAÇÃO EM ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL FRENTE A DISTINTOS TEMPOS DE CARREGAMENTO

4.1. INTRODUÇÃO

Com a intensificação no uso do solo, especialmente para produção de alimentos, fibras e energia, aumentou também a utilização de conjuntos motomecanizados, capazes de realizar as operações agrícolas dentro das “janelas de semeadura” ideais para cada cultura. Muitas destas operações são realizadas em condições de umidade do solo acima do ideal (friabilidade), causando a compactação do solo, um dos fatores responsáveis pela degradação física dos solos cultivados (Tang et al., 2009; Keller et al., 2014). Como efeito da degradação física tem-se a alteração da estrutura do solo responsável pela manutenção de processos importantes, como, por exemplo, a movimentação de ar e água e a variação na temperatura do solo, envolvidos, não somente na produção das culturas, mas também na regulação do ambiente (Chan et al., 2006).

O entendimento do processo de compactação e, por consequência seu controle, tem dois fatores principais: i) o agente causador, ou seja, as características das máquinas e equipamentos como a carga sobre o eixo, o tipo de pneus e a carga incidente, a área de contato pneu-solo, a velocidade de operação, a patinação dos rodados de tração, a distância entre eixos (Chamen et al., 2003, Keller e Lamandé, 2010) e ii) o meio onde a máquina trafega, ou seja, as características intrínsecas do solo, relacionadas a sua dinâmica reológica (Keller et al., 2013), como o conteúdo de água, o teor de matéria orgânica, a quantidade e proporcionalidade entre os componentes da fração sólida mineral, a mineralogia e o estado de agregação do solo.

Além destes fatores, estudos desenvolvidos por Or e Ghezzehei (2002), Chamen et al. (2003) e Keller et al. (2013) têm mostrado que a compactação do solo também é dependente do tempo de aplicação da carga, ou seja, o tempo de carregamento está relacionado com a aplicação e dissipação de energia, sendo reproduzida em laboratório com o uso de consolidômetros em ensaios de compressão uniaxial. Tais ensaios permitem caracterizar propriedades mecânicas dos solos por meio da relação pressão-deformação, descrita pelo modelo elasto-plástico (formato bi linear), mais

utilizado atualmente (Pereira et al., 2007). Este modelo divide o conjunto de dados em duas partes: uma parte elástica, relacionada a baixas pressões e de caráter recuperável após alívio da tensão aplicada e, uma parte plástica, chamada de reta virgem, relacionada a altas pressões e de caráter irrecuperável após alívio da tensão aplicada (Tang et al., 2009). Entretanto, alguns autores (Dawidowski e Koolen, 1994; Arvidsson e Keller, 2004; Imhoff et al., 2004) têm observado que, para altas pressões, este modelo não tem descrito satisfatoriamente a dinâmica de deformação experimentada pelo solo. Isso tem sido justificado pelo fato deste modelo considerar constante a chamada reta de compressão virgem a qual, para altas pressões, apresentou uma dinâmica de não linearidade, sendo melhor descrita por um modelo do tipo “S”.

Diferentemente do que ocorre no campo quando uma carga é aplicada ao solo pelos pneus das máquinas em operação, gerando uma força transiente e de curta duração, a aplicação de cargas em laboratório realizada com o uso de consolidômetros é uma força estática, confinada e de maior duração. Além de distorções que podem ocorrer na modelagem dos dados para obtenção dos parâmetros mecânicos de interesse (pressão de pré-consolidação, índice de compressibilidade e de recompressibilidade) e físicos (densidade máxima do solo considerando um espaço aérea igual ou superior a 10%, porosidade total e densidade do solo na pressão de pré-consolidação), há uma série de diferenças, tanto na forma e tempo de aplicação de carga, quanto na metodologia para determinação dos parâmetros mecânicos, quando se quer comparar os valores obtidos *in situ* (no campo) com aqueles obtidos em laboratórios.

Estudos realizados por Lebert et al. (1989) e Fazekas e Horn (2005) mostraram diferenças nos valores, tanto da pressão de pré-consolidação, bem como no índice de compressibilidade em função de variáveis acima mencionadas. Segundo estes autores, houve redução do primeiro e aumento nos valores do segundo indicador com o aumento do tempo de carregamento, em ensaios estáticos usando consolidômetros. Similarmente, Or e Ghezzehei (2002) observaram redução na deformação do solo e aumento nas deformações plásticas mediante a redução e aumento do tempo de aplicação de carga, respectivamente.

Embora pouco questionado em ensaios desta natureza, o tempo de carregamento é uma variável importante, especialmente quando se busca comparar valores auferidos *in situ* com valores obtidos em ensaios laboratoriais. Assim, a hipótese que norteou o estudo foi a de que, sob a ação de mesma carga, o tempo de carregamento afeta os parâmetros mecânicos desta obtidos, independentemente da classe de solo e do tempo de adoção do sistema de plantio direto. Para testar esta hipótese foram avaliados a dinâmica da curva de pressão-deformação e os parâmetros mecânicos pressão de pré-consolidação, índice de compressibilidade e de recompressão para diferentes classes de solos e históricos de manejo a que os solos foram submetidos.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de solo com estrutura preservada, em cada local, camada e tempo de adoção do plantio direto (descritas no item 3.2) foram divididas em dois grupos. Por exemplo, para o Latossolo Vermelho (Santo Ângelo), que contempla três tempos de adoção do SPD (144 amostras no total), em cada tempo de adoção do sistema foram coletadas 48 amostras, as quais foram divididas em dois grupos: um para carregamento por 30 segundos e outro para carregamento a 300 segundos. O mesmo procedimento foi utilizado para os demais locais.

Cada grupo de tempo de carregamento teve suas amostras de solo saturadas com água destilada e equilibradas em mesa de tensão a 10 kPa para obtenção da macroporosidade e, após cessar a drenagem as mesmas foram submetidas a pressão de 100 kPa na câmara de Richards, a fim de que o conteúdo de água das amostras ficasse dentro da faixa de friabilidade para cada solo (Anexo 1). Cessada a drenagem da água, um grupo de amostras foi submetido ao tempo de carregamento de 300 segundos para cada carga (25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa), ao passo que o outro grupo foi submetido às mesmas cargas, porém com um tempo de carregamento, por carga, de 30 segundos. A aplicação das cargas foi realizada por meio de um consolidômetro automático, com interface homem-máquina, descrito no item 3.2.4.

Embora o software do consolidômetro calcule a pressão de pré-consolidação (entre outros parâmetros) e apresente as curvas de pressão-deformação, os dados de deformação referente a cada carga foram

trabalhados no software Excel®, desenvolvido pela Microsoft Corporation, conforme realizado por Severiano et al. (2011). Posteriormente os dados numéricos obtidos foram analisados no software SigmaPlot (versão 10.0), desenvolvido pela Systat Software Inc.

4.2.1. Análise estatística

As curvas de pressão-deformação para cada classe de solo foram plotadas de forma individual para cada tempo de adoção do SPD e por profundidade de coleta das amostras. Posteriormente, os dados foram normalizados, a fim de permitir uma análise comparativa conjunta da dinâmica de cada curva considerando que todas partem de um mesmo valor comum. Dessa forma, pode-se inferir sobre os reflexos de classe de solo e/ou do tempo de adoção do SPD na dinâmica de cada curva, comparando os tempos de carregamento.

Dados de pressão de pré-consolidação, índice de compressibilidade e índice de recompressão obtidos com base na dinâmica das curvas, foram comparados dois a dois pelo teste T ($p < 0,05$), usando software SAS Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de compressão (plotadas a partir da relação entre a variação na densidade do solo – D_s e o logaritmo da pressão aplicada – $\text{Log}\sigma_v$), para cada profundidade e tempo de adoção do sistema de plantio direto (SPD) são apresentadas na Figura 10 (Argissolo Vermelho), Figura 11 (Latossolo Bruno) e na Figura 12 (Latossolo Vermelho). Independentemente da classe de solo ou tempo de adoção do SPD observou-se uma mesma dinâmica entre eles, ou seja, todos os dados apresentaram bom ajuste ao modelo elasto-plástico (Figura 9), mais utilizado atualmente. A análise da relação entre a variação na densidade pela variação no logaritmo da pressão aplicada (dado pela relação $dD_s/d\text{log}\sigma_v$) foi calculada e plotada versus a variação $\text{Log}\sigma_v$ para cada classe de solo e condição de manejo. O objetivo desta relação foi verificar se os dados poderiam ter uma dinâmica de ajuste também ao modelo do tipo “S” (Figura 9b), não detectável pelo ajuste simples $D_s\text{-Log}\sigma_v$, fato não observado para nenhuma das condições analisadas (dados não apresentados).

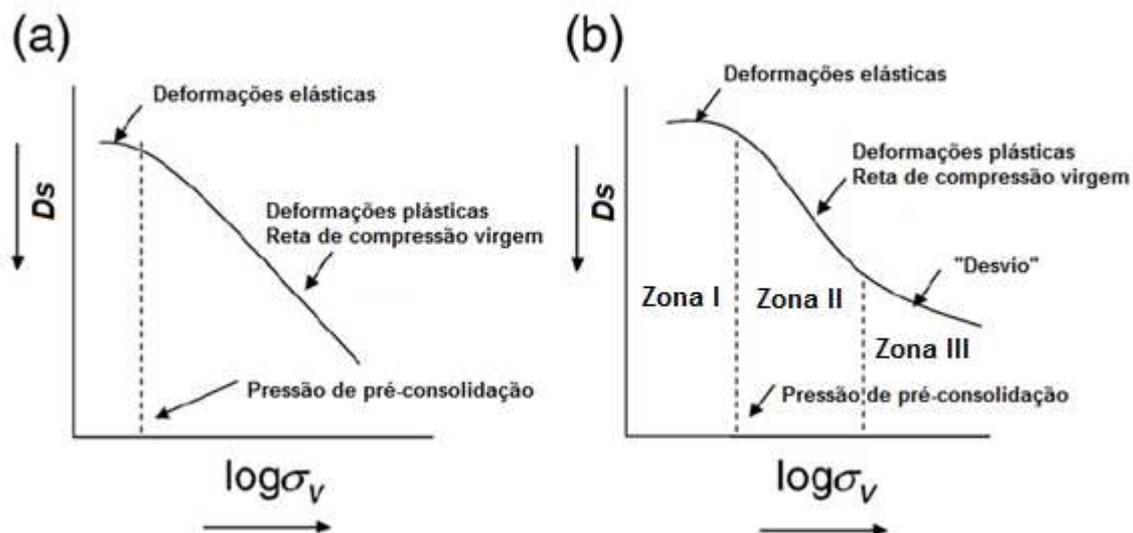


Figura 9. Principais formas das curvas em ensaios de compressão uniaxial: (a) modelo elasto-plástico ou curva bi-linear; (b) modelo em formato “S”. Adaptado de Tang et al. (2009).

O formato tipo “S” da curva está associado com a condição estrutural do solo, ou seja, com a forma que o sistema poroso vai adquirindo na medida em que o solo é submetido ao carregamento (zonas I, II e III - Figura 9). Sob ação de altas pressões (zona III), o volume de poros com ar torna-se pequeno e a água ocupa a maior parte dos meso e microporos. Neste caso, sendo a água incompressível, para haver nova redução de volume faz-se necessário que a água seja drenada destes poros, o que dificilmente ocorre em solos bem estruturados, pela forte ligação da água à fração sólida mineral e orgânica presente, ou em solos desestruturados, pela falta de continuidade nos poros.

Solos que apresentam uma condição da estrutura fraca (agregados pequenos e com baixa estabilidade) ou que são continuamente revolvidos e, neste caso tem sua estrutura destruída, apresentam maior probabilidade de apresentar uma dinâmica da curva do tipo “S”, conforme apontam Gregory et al. (2006) e Tang et al. (2009). Segundo estes autores, além da condição estrutural, solos mais argilosos (mais de 35% de argila) e que apresentam um índice de plasticidade alto (maior do que sete) estão mais propensos a apresentar esta dinâmica frente aqueles com menor índice.

A análise do estado de consistência dos solos apresentou valores de índice de plasticidade superiores a sete (9,2; 21,0 e 11,2 para o Argissolo

Vermelho, o Latossolo Bruno e o Latossolo Vermelho, respectivamente). Entretanto, nenhum dos solos mostrou tal dinâmica indicando que, para os tempos de adoção do SPD em análise, o solo manteve sua estrutura preservada, mesmo sob ação de grande pressão. Este fato não deixa de ser benéfico pois permite aos solos um suporte de carga, sem sofrer grandes abalos em sua estrutura de poros, especialmente meso e microporos.

Nas Figura 10a, Figura 11a e Figura 12a se observam a variação da densidade do solo em função do logaritmo da pressão aplicada para cada tempo de carregamento. Independentemente do tempo de carregamento, observou-se uma grande variação nos valores de densidade inicial entre e dentro do mesmo solo, exceto para o Latossolo Bruno (Figura 9). Tais variações são atribuídas à variabilidade espacial deste atributo que é influenciado tanto pelas características intrínsecas do solo (textura e mineralogia), bem como pelo manejo aplicado aos solos.

A redução no tempo de carregamento de 300 segundos para 30 segundos proposto não interferiu na dinâmica da curva, ou seja, no formato que a curva adquire após cada aplicação de pressão, mas sim na magnitude da deformação experimentada pelo solo em cada pressão (representada pela variação na densidade do solo). Observou-se um aumento na densidade do solo com o aumento da pressão aplicada, porém para baixas pressões (<100 kPa), a taxa de aumento na densidade foi menor do que comparado a altas pressões (>100 kPa). Isso indica que pressões maiores do que 100 kPa possuem um efeito deletério na estrutura do solo, mesmo para baixos tempos de carregamento como o aqui testado que, embora seja menor do que a metodologia proposta pela norma NBR 12007/90 (ABNT, 1990), ainda é muito superior ao tempo de aplicação de carga pelos conjuntos mecanizados em condições normais de semeadura, por exemplo.

As maiores deformações observadas foram para as camadas de 0-5, 5-10 e 10-15 cm de profundidade. Esse comportamento é atribuído a dois fatores principais: a presença de material orgânico e ao conteúdo de água. Nestas camadas há um maior conteúdo de material orgânico em diferentes graus de decomposição e que colabora na maior estabilidade de agregados (Tomazi, 2008). Por outro lado, o aumento no conteúdo de matéria orgânica reduz os pontos de contato entre partículas do solo, aumenta a porosidade total

e diminui a densidade (Braidá, 2004). Dessa forma, estando a deformação do solo relacionada à estabilidade dos agregados e ao tempo de carregamento, quando submetido a um curto tempo de carregamento, a estrutura do solo sofre deformação, porém a uma menor taxa. Por outro lado, quando o tempo de carga é aumentado, há maiores chances de haver ruptura e acomodação dos agregados em formas mais compactas, aumentando a densidade do solo.

Para as camadas abaixo de 15 cm de profundidade, o conteúdo de matéria orgânica diminui e a dinâmica compressiva do solo é atribuída ao conteúdo de água retido nos poros. Assim, a redução no tempo de carregamento reduz a probabilidade da água contida nos poros (meso e microporos) ser drenada, o que permitiria um novo decréscimo de volume e um aumento da densidade, conforme observado por Tang et al. (2009).

A observação na variação dos valores de densidade inicial é importante, pois, quanto mais próximo dos valores críticos para cada classificação textural proposta por Reichert et al. (2003), menor será sua deformação, ou seja, apresentará maior suporte de carga, para uma mesma tensão de água. Para os solos em estudo, a maior parte dos valores de densidade inicial ficaram dentro dos propostos por Reichert et al. (2003) que são de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos com textura arenosa e média (20 a 55% de argila) e de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos com textura argilosa (>55% de argila).

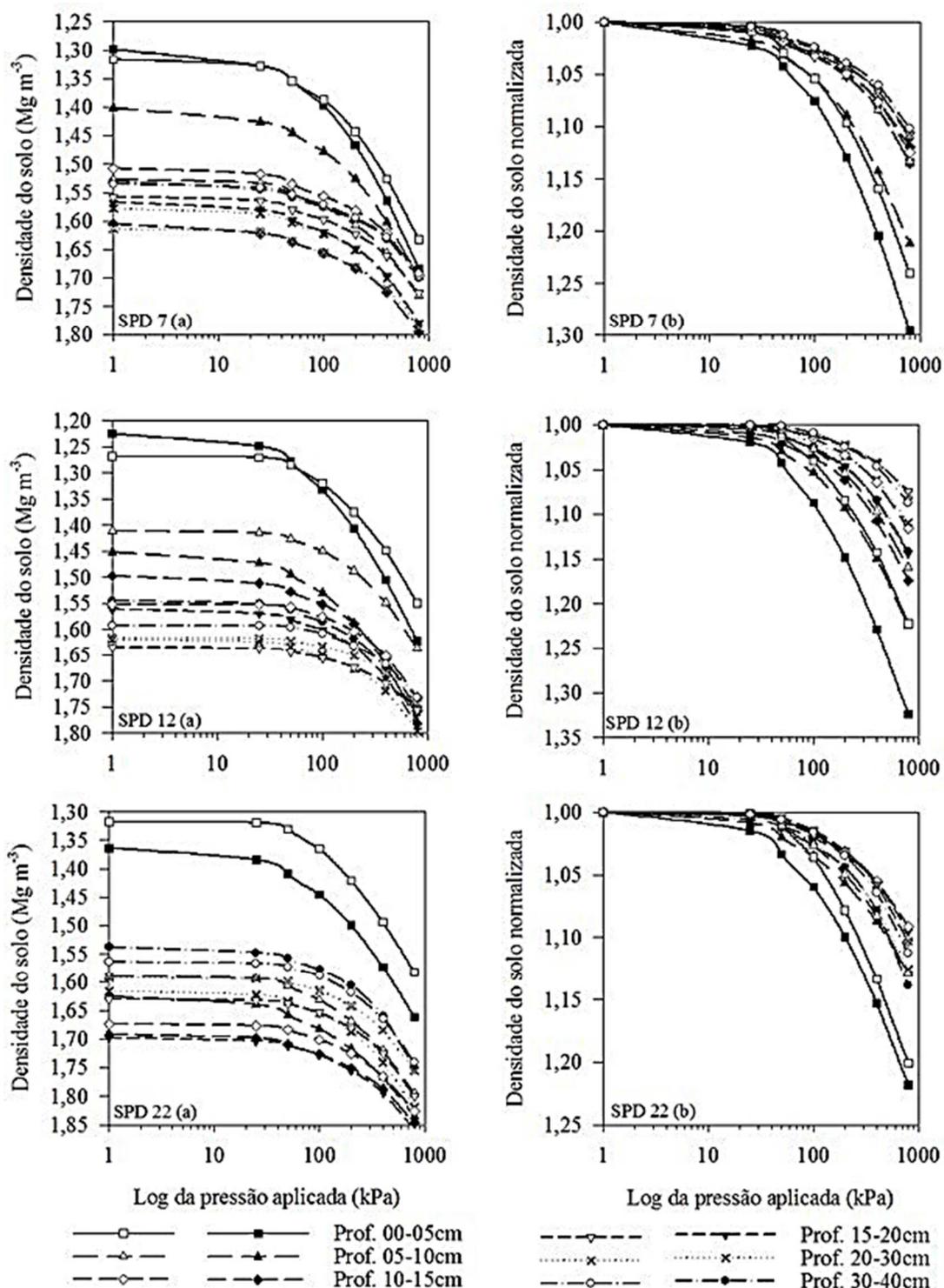


Figura 10. Ensaios de compressão uniaxial em diferentes profundidades e tempo de adoção do sistema de plantio direto (sete, 12 e 22 anos) em Argissolo Vermelho Distrófico típico. Conteúdo de água no solo em base de massa de 0,19, 0,14 e 0,18 kg kg^{-1} para a condição de sistema de plantio direto de sete, 12 e 22 anos, respectivamente. Marcadores em branco e preto indicam tempo de carga de 30 segundos e 300 segundos, respectivamente.

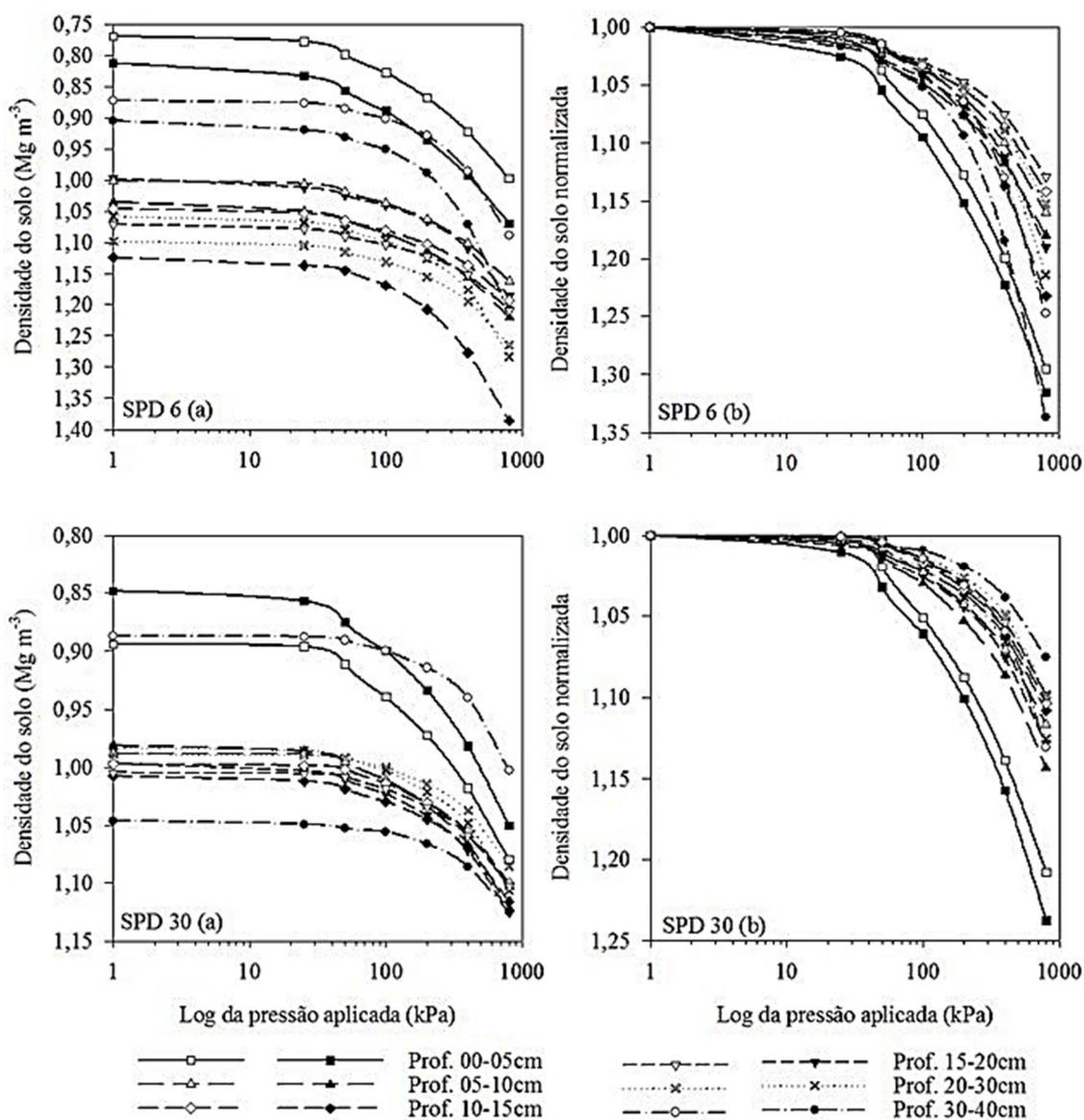


Figura 11. Ensaios de compressão uniaxial em diferentes profundidades e tempo de adoção do sistema de plantio direto (seis e 30 anos) em Latossolo Bruno Alumínico câmbico. Conteúdo de água no solo em base de massa de 0,36 e 0,33 kg kg⁻¹ para a condição de sistema de plantio direto de seis e 30 anos, respectivamente. Marcadores em branco e preto indicam tempo de carga de 30 segundos e 300 segundos, respectivamente.

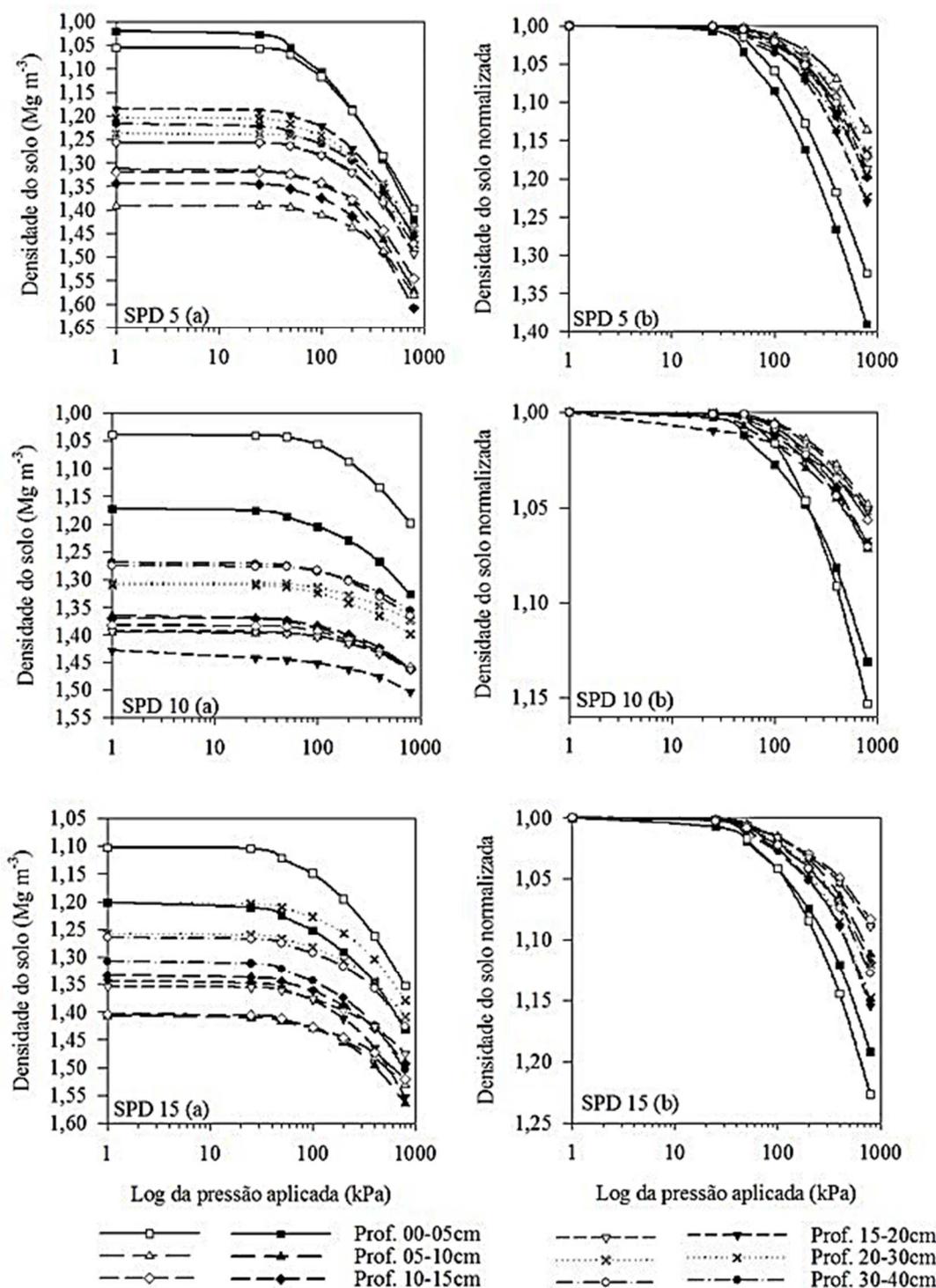


Figura 12. Ensaio de compressão uniaxial em diferentes profundidades e tempo de adoção do sistema de plantio direto (cinco, 10 e 15 anos) em Latossolo Vermelho Distrófico típico. Conteúdo de água no solo em base de massa de 0,27, 0,20 e 0,22 kg kg^{-1} para a condição de sistema de plantio direto de cinco, 10 e 15 anos, respectivamente. Marcadores em branco e preto indicam tempo de carga de 30 segundos e 300 segundos, respectivamente.

Para melhor verificar como o tempo de carregamento interfere na dinâmica da curva de compressão e mitigar o efeito da densidade inicial do solo na análise, os valores de densidade do solo foram normalizados e plotados versus o logaritmo da pressão aplicada (Figura 10b, Figura 11b e Figura 12b). Observou-se que, independentemente da classe de solo ou condição de manejo, a redução no tempo de carregamento resultou em menor densidade do solo para a mesma pressão aplicada, comparado dentro da mesma camada, sendo essa redução mais expressiva nos primeiros 5 cm.

Como a pressão de pré-consolidação é obtida com base no raio da menor curvatura formada pela interpolação entre os dados de densidade do solo (ou índice de vazios) e o logaritmo da pressão aplicada, quanto menor taxa de incremento nos valores de densidade, maior serão os valores de pressão de pré-consolidação obtidos, pois há um deslocamento das curvas para a direita. Isso é observado pela análise gráfica dos dados normalizados (Figura 10b, Figura 11b e Figura 12b), onde não se verificam diferenças significativas entre as curvas para os tempos de carregamento, dentro da mesma profundidade.

Os valores de pressão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressibilidade (IC) e de recompressão (IR) para as classes de solos e tempos de adoção do SPD são apresentados nas Tabelas Tabela 11. Não foram observadas diferenças significativas nos valores de σ_p entre os tempos de carregamento dentro da mesma camada para a maior parte das camadas, exceto para a de 30-40 cm, no SPD 22 anos - Tabela 10 e, na média dos valores, no SPD 10 - Tabela 12. Entretanto observou-se, de maneira geral, um aumento nos valores de σ_p em profundidade. Tal observação vem ao encontro do observado na análise da dinâmica das curvas de compressão, já discutido anteriormente. As pequenas variações apresentadas pelas curvas dentro da mesma profundidade, porém com tempos de carregamento diferentes, mostra que a redução no tempo de carregamento não altera significativamente os resultados de σ_p . Além disso, a análise do desvio padrão, do coeficiente de variação, de máximo e mínimo, mostram uma similaridade nos valores, indicando mesma magnitude de variação nos valores, independentemente do tempo de aplicação de carga em laboratório.

A ausência de diferenças significativas nos valores de σ_p é atribuído ao efeito da estrutura e da poro-pressão dentro dos agregados, argumentados anteriormente. Além disso, Salire et al. (2004), estudando a dinâmica compressiva de solos sob carregamentos de curta duração, observaram que o tempo para o solo dentro da amostra atingir um equilíbrio durante a aplicação de carga foi de aproximadamente 30 segundos, com as principais variações no volume ocorrendo durante os 15 segundos iniciais. Os mesmos autores apontam que, para haver nova redução de volume, é preciso haver movimento da água nos poros, o que só aconteceria se houvesse água livre (o que não é o caso pela tensão de água na qual as amostras foram equilibradas) ou ser a estrutura do solo muito frágil, na qual a manutenção da carga por mais tempo permitiria um rearranjo da estrutura do solo em um empacotamento mais massivo. Isso vem ao encontro dos resultados observados, ou seja, a não observação de diferenças na σ_p entre os tempos de carregamento.

Tabela 10. Pressão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressibilidade (IC) e índice de recompressão (IR) frente a dois tempos de carregamento, em Argissolo Vermelho Distrófico típico, para diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto

Prof. (cm)	Tempo de carregamento (segundos)					
	300		30		30	
	σ_p (kPa)		IC		IR	
SPD 7 ¹						
0-5	144,2	156,7	0,36	0,31	0,08	0,06
5-10	156,0	178,9	0,28	0,22	0,05	0,03
10-15	181,7	197,6	0,19	0,20	0,03	0,04
15-20	186,8	180,9	0,22	0,17	0,03	0,03
20-30	187,8	192,2	0,23	0,18	0,03	0,03
30-40	195,5	182,0	0,17	0,16	0,03	0,02
MÉD.	175,4 ^{ns}	181,4	0,24*	0,20	0,04*	0,03
DP	21,2	16,8	0,07	0,07	0,02	0,01
CV (%)	12,1	9,2	30,2	34,9	55,2	43,4
MÁX.	210,8	208,7	0,41	0,38	0,11	0,08
MÍN.	133,4	149,3	0,14	0,11	0,02	0,02
SPD 12 ¹						
0-5	140,6	146,1	0,36	0,29	0,09	0,05
5-10	153,0	165,4	0,32*	0,25	0,05	0,03
10-15	175,1	166,4	0,28	0,21	0,03	0,01
15-20	175,5	170,7	0,25*	0,13	0,03	0,01
20-30	176,5	174,5	0,20	0,15	0,02	0,01
30-40	174,1	159,7	0,24*	0,17	0,03	0,01
MÉD.	165,8 ^{ns}	163,8	0,27*	0,20	0,04*	0,02
DP	17,8	15,5	0,07	0,07	0,03	0,02
CV (%)	10,8	9,5	24,4	37,0	70,7	94,6
MÁX.	189,0	188,3	0,39	0,38	0,12	0,07
MÍN.	120,5	127,8	0,17	0,10	0,01	0,00
SPD 22 ¹						
0-5	145,8	135,0	0,27	0,27	0,05	0,04
5-10	161,4	155,4	0,20	0,21	0,03	0,02
10-15	175,9	165,3	0,16	0,17	0,02	0,02
15-20	160,6	166,2	0,17	0,20	0,01	0,01
20-30	165,4	164,6	0,22	0,19	0,02	0,01
30-40	180,6*	161,7	0,24	0,20	0,02	0,01
MÉD.	165,0 ^{ns}	158,0	0,21 ^{ns}	0,20	0,03 ^{ns}	0,02
DP	14,5	14,7	0,05	0,04	0,02	0,01
CV (%)	8,8	9,3	23,1	19,8	57,1	70,2
MÁX.	199,6	174,1	0,29	0,32	0,06	0,06
MÍN.	137,9	113,4	0,14	0,14	0,01	0,01

¹ Tempo de adoção do sistema de plantio direto em anos; MED, DP, CV, MAX e MIN – Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação, valores Máximo e Mínimo, respectivamente. ^{ns}, * - Diferenças não significativas e significativas, respectivamente, pelo teste t p<0,05, comparando valores na linha dentro de cada variável.

Tabela 11. Pressão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressibilidade (IC) e índice de recompressão (IR) frente a dois tempos de carregamento, em um Latossolo Bruno Aluminico câmbico, para diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto

Prof. (cm)	Tempo de carregamento (segundos)					
	300		30		30	
	σ_p (kPa)		IC		IR	
SPD 6 ¹						
0-5	157,6	160,1	0,25	0,22	0,13	0,11
5-10	170,5	173,4	0,18	0,17	0,06	0,05
10-15	174,6	179,8	0,30*	0,15	0,05	0,04
15-20	184,1	192,3	0,20	0,15	0,05	0,04
20-30	188,6	177,9	0,26	0,17	0,05	0,04
30-40	188,0	187,2	0,35	0,27	0,06	0,05
MÉD.	176,4 ^{ns}	178,5	0,26*	0,19	0,06 ^{ns}	0,06
DP	12,6	12,3	0,11	0,05	0,03	0,03
CV (%)	7,1	6,9	42,6	29,0	54,0	55,7
MÁX.	199,2	200,5	0,64	0,30	0,16	0,17
MÍN.	154,0	153,0	0,13	0,10	0,03	0,03
SPD 30 ¹						
0-5	165,8	158,0	0,19	0,18	0,08	0,07
5-10	168,8	166,2	0,15	0,12	0,04	0,03
10-15	183,5	165,5	0,12	0,11	0,03	0,02
15-20	174,1	169,3	0,14	0,12	0,03	0,02
20-30	180,9	175,2	0,14	0,12	0,03	0,02
30-40	177,7	187,4	0,19	0,15	0,03	0,02
MÉD.	175,1 ^{ns}	170,2	0,15 ^{ns}	0,13	0,04 ^{ns}	0,03
DP	10,5	13,3	0,05	0,03	0,02	0,02
CV (%)	6,0	7,8	34,6	24,0	53,35	67,6
MÁX.	198,8	193,2	0,32	0,21	0,08	0,09
MÍN.	157,2	139,9	0,09	0,07	0,01	0,01

¹ Tempo de adoção do sistema de plantio direto em anos; MED, DP, CV, MAX e MIN – Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação, valores Máximo e Mínimo, respectivamente. ^{ns} * - Diferenças não significativas e significativas, respectivamente, pelo teste t p<0,05, comparando valores na linha dentro de cada variável.

Tabela 12. Pressão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressibilidade (IC) e índice de recompressão (IR) frente a dois tempos de carregamento, em um Latossolo Vermelho Distrófico típico, para diferentes tempos de adoção do sistema de plantio direto

Prof. (cm)	Tempo de carregamento (segundos)					
	300		30		30	
	σ_p (kPa)		IC		IR	
SPD 5 ¹						
0-5	141,1	131,8	0,39	0,35	0,12*	0,08
5-10	165,7	175,7	0,31	0,23	0,03	0,02
10-15	172,2	168,3	0,32	0,28	0,02	0,02
15-20	155,9	165,2	0,31	0,25	0,04	0,03
20-30	164,9	165,5	0,33	0,25	0,04	0,02
30-40	165,1	155,0	0,25	0,25	0,05	0,02
MED.	159,8 ^{ns}	159,9	0,32*	0,27	0,05*	0,03
DP	13,4	16,9	0,05	0,06	0,04	0,03
CV (%)	8,4	10,6	16,9	23,2	77,3	88,5
MÁX.	183,6	182,9	0,43	0,43	0,16	0,12
MÍN.	128,9	120,3	0,24	0,17	0,02	0,01
SPD 10 ¹						
0-5	176,7	145,5	0,16	0,19	0,04	0,02
5-10	164,1	149,5	0,10	0,08	0,02	0,01
10-15	157,2	136,9	0,11	0,09	0,01	0,01
15-20	183,0	160,0	0,07	0,08	0,01	0,01
20-30	134,5	134,7	0,10	0,08	0,01	0,01
30-40	160,3	133,3	0,10	0,10	0,01	0,01
MÉD.	162,0*	143,8	0,10 ^{ns}	0,10	0,02 ^{ns}	0,01
DP	31,4	15,3	0,05	0,05	0,01	0,01
CV (%)	19,4	10,7	49,9	48,3	59,3	88,5
MÁX.	252,0	200,1	0,29	0,25	0,05	0,03
MÍN.	105,8	126,0	0,01	0,05	0,01	0,00
SPD 15 ¹						
0-5	156,0	150,4	0,24	0,26	0,05	0,06
5-10	161,9	154,0	0,18	0,13	0,02	0,02
10-15	154,2	173,2	0,17	0,13	0,03	0,02
15-20	167,5	159,3	0,24	0,13	0,03	0,02
20-30	161,8	166,3	0,20	0,22	0,03	0,03
30-40	166,6	175,7	0,22	0,18	0,03	0,03
MÉD.	161,3 ^{ns}	162,0	0,21 ^{ns}	0,17	0,03 ^{ns}	0,03
DP	13,9	14,5	0,08	0,08	0,02	0,02
CV (%)	8,6	9,0	39,2	43,5	64,9	64,9
MÁX.	185,4	186,7	0,34	0,33	0,07	0,09
MÍN.	133,0	131,3	0,09	0,10	0,01	0,01

¹ Tempo de adoção do sistema de plantio direto em anos; MED, DP, CV, MAX e MIN – Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação, valores Máximo e Mínimo, respectivamente. ^{ns} * - Diferenças não significativas e significativas, respectivamente, pelo teste t p<0,05, comparando valores na linha dentro de cada variável.

Parâmetro obtido com base na inclinação da reta virgem (parte linear da curva de compressão - Figura 9), o índice de compressibilidade (IC) que permite inferir sobre a suscetibilidade do solo à compactação, apresentou variação significativa frente à mudança no tempo de carregamento nas três classes de solos, porém somente nos menores tempos de adoção do SPD (Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12). De maneira geral, os menores valores de IC foram observados para o menor tempo de aplicação de carga (30 segundos), indicando ter a estrutura do solo forte influência na dinâmica observada, uma vez que os demais fatores que interferem no IC (densidade e/ou índice de vazios inicial, conteúdo de argila e umidade – Lebert et al., 1989; Debiasi, 2008) são iguais para ambas as condições de carregamento. Isso corrobora com estudos de Or e Ghezzehei (2002) e Fazenkas e Horn (2005), os quais apontam que o IC aumentou com o aumento do tempo de carregamento das amostras de solo.

De acordo com Salire et al. (1994), solos na qual a fração argila predomina entre as frações texturais e/ou que apresentam uma boa estrutura (agregados estáveis) são menos suscetíveis à compressão (menor IC), ou seja, resistem mais à compactação. Isso porque, para que ocorra diferenças no IC (ou na σ_p), é preciso que haja cisalhamento dos agregados quando submetidos a uma carga. Este cisalhamento leva a um novo rearranjo da estrutura, reduzindo os espaços vazios e aumentando a densidade, conforme observado por Salire et al. (1994). Assim, mesmo que o tempo de aplicação de uma carga seja reduzido, há dano ao solo, porém em uma magnitude menor quando comparado a um tempo maior, conforme observado por Or e Ghezzehei (2002) e Fazenkas e Horn (2005) e evidenciado pelos dados apresentados.

Dessa forma, quanto maior o tempo de adoção do SPD, maior é a probabilidade de acúmulo de matéria orgânica (importante para a agregação) e mais estável tende a ser a estrutura do solo. Como o cisalhamento dos agregados se dá em pontos de fraqueza e tem como origem a baixa estabilidade da estrutura e sendo os demais fatores supracitados iguais (o que se pressupõe com base nos dados apresentados), em sistemas com maior tempo de adoção do SPD se espera não haver mudanças no IC, independentemente do tempo de carregamento, fato este realmente observado.

A semelhança do IC, o índice de recompressão (IR) é um parâmetro que permite inferir sobre a resiliência mecânica do solo, ou seja, a capacidade do solo se recuperar imediatamente após o alívio da pressão aplicada. Observou-se diferença significativa, na média dos valores de IR (Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12) entre os tempos de carregamento para o Argissolo (SDP 7 e 12 anos) e para o Latossolo Vermelho (SPD 5 anos).

Tal dinâmica está relacionada com a carga experimentada pela estrutura do solo e o teor de matéria orgânica, conforme apontam Gregory et al. (2009) e Dexter et al. (2008), respectivamente. Com o menor tempo de carregamento houve, ao mesmo tempo, menor deformação na amostra de solo, fato que pode ser verificado também pela análise do IC e, conseqüentemente, menor recuperação. Por outro lado, com o maior tempo de carregamento e, por conseqüência, maior deformação, poder-se-ia esperar menor recuperação, visto que houve maior empacotamento das partículas. Entretanto, Keller et al. (2011) apontam que uma pequena parte da energia elástica é “estocada” na estrutura do solo durante a compressão e liberada posteriormente após o descarregamento, podendo o solo ser entendido como um capacitor. Isso conferiria pequenos valores de recuperação da estrutura do solo, como os observados.

Além disso, o aumento no teor de matéria orgânica no solo atua, tanto na melhoria da estrutura do solo (e com isso maior agregação e menor deformação), bem como apresenta maior elasticidade do que o material mineral (Braidá et al., 2008). Isso permite maior recuperação da estrutura do solo após sofrer um carregamento, especialmente se, parte desta matéria orgânica está associada aos minerais, conforme aponta Dexter et al. (2008).

4.4. CONCLUSÕES

A análise da dinâmica da curva de pressão-deformação em ensaio de compressão uniaxial frente a distintos tempos de carregamento permite concluir que:

1. Independentemente do tempo de carregamento, o modelo elástico-plástico descreve bem a dinâmica da curva de compressão mediante incremento de cargas, não sendo observado variações para o modelo sigmoidal de ajuste (modelo tipo “S”), para as condições ensaiadas. Entretanto, sugere-se a

verificação da taxa de mudança nos valores de densidade (ou índice de vazios) pelo logaritmo da pressão aplicada em todos os estudos desta natureza, uma vez que esta relação permite um melhor entendimento dos processos envolvidos durante os estágios de deformação da estrutura do solo.

2. Os valores de pressão de pré-consolidação não foram significativamente modificados pela redução no tempo de carregamento do solo na condição de ensaio uniaxial. Dessa forma é possível introduzir, satisfatoriamente, para as condições de uso da informação com fins agrícolas, a redução no tempo de aplicação de carga disposto na NBR 12007/90 e até então modificada por Carpenedo (1994), de cinco minutos para 30 segundos para cada carga aplicada.

3. Os índices de compressibilidade e de recompressão foram significativamente diferentes entre os tempos de carregamento, indicando que o tempo de carga afeta a estrutura do solo, em menor magnitude quanto menor for o tempo de permanência da carga sobre o solo. Além disso, estes parâmetros foram mais influenciados nos menores tempos de adoção do sistema de plantio direto, indicando uma menor estabilidade da estrutura destes solos.

4. A redução no tempo de aplicação de cargas em laboratório para valores próximos aos aplicados na interface pneu-solo pelas máquinas agrícolas, indicou estar havendo uma superestimação da suscetibilidade do solo à compactação (dado pelo índice de compressibilidade) pela metodologia atual, uma vez que o principal parâmetro obtido (a pressão de pré-consolidação) não mostrou alteração no valor. Isso sugere que muitos solos tidos como altamente suscetíveis a compactação (caso de latossolos), não são tão suscetíveis, especialmente se manejados em sistemas de plantio direto de longo prazo.

5. CAPÍTULO IV – PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO E CRESCIMENTO DE RAÍZES DE MILHO EM UM ARGISSOLO VERMELHO SOB TRÁFEGO CONTROLADO DE MÁQUINAS³

5.1. INTRODUÇÃO

A compactação do solo tem sido apontada como uma das principais causas da degradação física de solos agrícolas. Isolada ou associada à degradação biológica e química, leva a uma redução da qualidade do solo, conceituada por Karlen et al. (1997), como a capacidade do mesmo em desempenhar ou não suas funções, apontadas por (Reichert et al., 2003) como suporte para crescimento de plantas, regulação de fluxos de energia e matéria do ambiente e filtro ambiental.

Solos cultivados, não saturados, são particularmente afetados por problemas de compactação. Esta ocorre quando a pressão aplicada por rodados de máquinas e ou pisoteio animal ultrapassa a sua capacidade de suporte de carga, determinada pela pressão de pré-consolidação (σ_p), gerando deformações plásticas na sua estrutura, perdurando durante anos no solo. A magnitude dessas deformações depende de fatores extrínsecos como tipo e massa das máquinas, tipo de rodados e pneus, carga sobre pneus e pressão de insuflagem, velocidade de deslocamento e tipo de cobertura vegetal (Zhao et al., 2010), e intrínsecos do solo como densidade inicial, conteúdo de água, conteúdo de argila, agregação e mineralogia do solo (Ajayi et al., 2009) e matéria orgânica do solo (Braidá, 2008).

Os efeitos da compactação sobre as características e propriedades do solo mostram aumento na densidade, redução na porosidade total bem como na infiltração e armazenamento de água no solo (Dias Junior e Pierce, 1996) e restrição ao fluxo de gases e aumento na resistência ao crescimento de raízes (Hamza e Anderson, 2005). Esses efeitos têm sua máxima expressão principalmente em períodos de déficit hídrico, ao passo que, em períodos com normalidade da precipitação tais efeitos são, aparentemente, anulados.

³ Artigo publicado na Revista Brasileira de Ciência do Solo v.37, p.1185-1195, 2013.

No entanto, são escassos estudos que avaliam as respostas do uso de plantas e de um sistema de rotação de culturas em plantio direto sobre a σ_p , bem como sobre a suscetibilidade do solo à compactação, indicada pelo índice de compressibilidade (IC). Sabe-se que as plantas modificam o ambiente do solo, melhorando a estrutura e aumentando a estabilidade dos agregados (Conceição et al., 2005), podendo refletir em aumento (Veiga et al., 2007) ou redução da capacidade de suporte de carga (Debiasi et al., 2008). Estes autores apontam que o uso de plantas de cobertura no inverno, aliando a ausência de tráfego, reduz a densidade do solo e aumenta a macroporosidade, diminuindo a capacidade de suporte de carga do solo e aumentando a suscetibilidade do solo a compactação, limitando-se, porém, à camada superficial.

Embora Conceição et al. (2005) apontem que as plantas modificam o ambiente do solo, elas, por sua vez, são afetadas pela compactação do solo e disponibilidade hídrica, sendo que o nível de compactação (Souza et al., 2008) e o teor de umidade (Bengough et al., 2006) podem reduzir ou até impedir o crescimento radicular. A redução do conteúdo de água no solo aumenta a coesão entre partículas e a resistência à penetração (RP) e também diminui a pressão hidrostática das células das raízes (Hamza e Anderson, 2005). Em consequência, há redução da pressão exercida pela coifa e região meristemática restringindo o crescimento radicular (Hamza e Anderson, 2005) em valores de resistência à penetração acima de 2,0 MPa (Silva et al., 1994).

Diante disso, o objetivo do trabalho foi avaliar parâmetros físicos de solo e de planta, estas cultivadas em condições controladas. Acredita-se que i) o uso de plantas de cobertura do solo no inverno associadas à rotação de culturas no verão conferem ao sistema plantio direto maior capacidade de suporte de carga e menor suscetibilidade à compactação; ii) mesmo quando ultrapassada a capacidade de suporte de carga, o solo retorna a condição original em função do sistema de manejo empregado; iii) pelo fato de que, em não havendo restrição hídrica, as plantas não teriam o crescimento e desenvolvimento radicular afetado pelo tráfego de máquinas .

Para testar essas hipóteses foram mensurados parâmetros de solo como a pressão de pré-consolidação (σ_p), a resistência do solo à penetração (RP), a densidade do solo (D_s), a porosidade (PT), o diâmetro médio

ponderado de agregados (DMP), e parâmetros de planta como área foliar, massa da parte aérea e radicular e volume de raízes de milho.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho consta de dois estudos: um no campo com posterior análise do material em laboratório e outro em casa de vegetação, conduzidos em vasos. O experimento está localizado na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no município de Eldorado do Sul em Argissolo Vermelho distrófico (Embrapa, 2006). Parcelas (4,5 x 20 m) estão sendo conduzidas em blocos ao acaso com três repetições desde o ano de 2002 em sistema plantio direto, com duas coberturas no inverno: aveia preta + ervilhaca e pousio, ambas cultivadas no verão com rotação de culturas (milho/soja), todas sob tráfego controlado de máquinas.

Desde a implantação do experimento (2002) até a safra de inverno de 2011, houve tráfego nas parcelas, duas vezes ao ano, por um trator John Deere, modelo 5600, com massa de 3,8 t, com pneus dianteiros 12.4-24 R1 e traseiros 18.4-30 R1, com pressão de insuflagem de 95 e 110 kPa, respectivamente. Na safra de verão 2012, foi utilizado um trator Valtra, modelo BM125i, com massa de 5,3 t, com pneus dianteiros 14.9-26R1 e traseiros 23.1-30R1, com pressão de insuflagem de 219,78 e 153,18 kPa, respectivamente. A pressão de contato dos pneus dianteiros e traseiros com o solo, determinada pelo método de O'Sullivan et al. (1999) para o trator John Deere e Valtra, foi de 115 e 120 kPa e, 183 e 155 kPa, respectivamente.

Para o estudo no campo, amostras de solo indeformadas foram coletadas em cada parcela nos locais sem tráfego de trator (ST), antes do tráfego na safra 2012 (AT), ou seja, com acúmulo de pressões aplicadas nas safras anteriores com trator de menor massa (trator John Deere de 3,8 t), e depois do tráfego da safra 2012 (DT), quando da mudança do trator utilizado (trator Valtra BM 125i de 5,3 t), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m. Em cada amostra dessas camadas foram determinadas a distribuição granulométrica (Tabela 13), a densidade do solo (D_s), a porosidade (PT), pressão de pré-consolidação (σ_p) e a distribuição e agregados por classe de tamanho.

Tabela 13. Distribuição granulométrica das partículas de solo em diferentes camadas em função das coberturas de inverno

Cobertura de inverno	Camada	Areia	Silte	Argila
	M	----- g kg ⁻¹ -----		
Pousio	0,00-0,05	538	217	245
	0,05-0,10	534	198	268
	0,10-0,15	521	186	293
	0,15-0,20	505	184	311
Aveia + Ervilhaca	0,00-0,05	505	230	265
	0,05-0,10	509	209	282
	0,10-0,15	498	211	291
	0,15-0,20	510	181	309

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada em transecta com 15 pontos em cada parcela, utilizando um penetrômetro dotado de sistema eletrônico de medição e aquisição de dados de força aplicados à respectiva profundidade no solo (ASAE, 2004). Amostras indeformadas com volume de 77,90 cm³ (6,3 e 2,5 cm – diâmetro e altura, respectivamente) de cada camada foram submetidas a tensão de 6 kPa em mesa de tensão e, posteriormente, determinada a σ_p em uma prensa oedométrica, marca TESTOP, seguindo metodologia descrita pela norma NBR 12007/90 (ABNT, 1990), com modificações sugeridas por Carpenedo (1994). Amostras deformadas, com estrutura preservada, constituída de agregados, foram coletadas naquelas camadas, para a determinação da estabilidade de agregados em água (EA), seguindo metodologia proposta por Carpenedo e Mielniczuk (1990). A Ds e a PT foram determinadas segundo a metodologia proposta por Embrapa (1999).

Para o estudo desenvolvido em casa de vegetação, foram coletadas amostras indeformadas de solo na camada de 0,0-0,2 m (vasos de PVC com diâmetro de 0,1 m e altura de 0,2 m) nas parcelas sob pousio, antes e depois do tráfego (AT e DT, respectivamente). Em cada parcela, oito amostras foram coletadas (quatro AT e quatro DT), totalizando 24 amostras. Em cada vaso foram semeadas três sementes de milho cultivadas durante 25 dias. Das 24 amostras, seis AT e seis DT foram cultivadas sem restrição hídrica (SRH; média de 5,0 mm diários de lamina de água), e as outras seis AT e seis DT com restrição hídrica (CRH; média de 3,5 mm diários de lamina de água). Ao

final do período de condução foram determinadas a área foliar, a massa verde e seca da parte aérea e a massa úmida e seca das raízes. O volume de solo do cilindro foi disposto sobre placas de pregos, e as raízes lavadas com água, e posterior estratificação em camadas de 0,05 m, até 0,2 m.

Os dados foram submetidos à análise estatística pelo software Statistycal Analysis System versão 9.4 e, havendo significância na análise de variância, foram comparadas as médias pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1. Características físicas do solo afetadas pela cobertura de inverno e tráfego

A densidade do solo, independentemente da profundidade, não foi alterada pelas condições de manejo. No pousio, não foram observadas diferenças nos valores de densidade do solo entre as condições de tráfego em cada camada, mas sim entre camadas em cada condição de tráfego até 0,10 m (Figura 13A). No consórcio aveia + ervilhaca foram observadas diferenças entre condições de tráfego e profundidade para o ST até 0,10 m e, para o DT, até 0,05 m, não havendo diferenças em profundidade para o AT. Esta dinâmica provavelmente se deve ao conteúdo de matéria orgânica no solo na camada até 0,13 m para pousio e aveia + ervilhaca (63,77 e 68,43 g kg⁻¹, respectivamente, avaliada por Sequinatto, (2010) e ao incremento de argila em profundidade (Tabela 13), característica dos Argissolos.

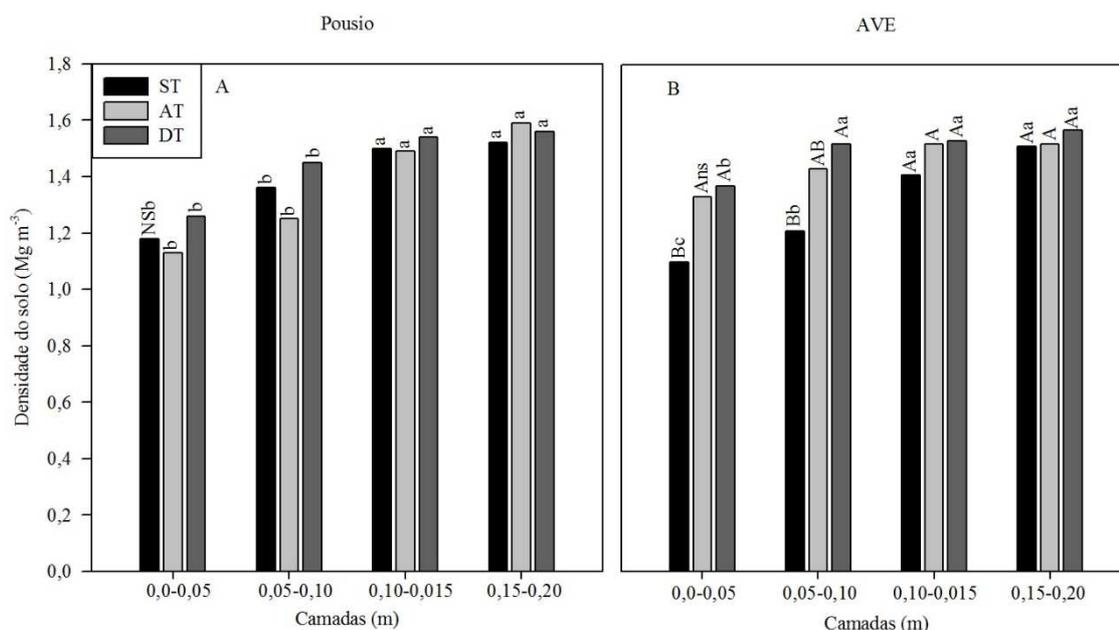


Figura 13. Densidade do solo nos sistemas de manejo pousio (A) e aveia + ervilhaca (B), nas condições de sem tráfego (ST), antes do tráfego (AT) e depois do tráfego (DT), em camadas. Letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. Letras maiúsculas comparam condições de tráfego em cada camada, e minúsculas comparam camadas em cada condição de tráfego.

Os valores de porosidade (macro e micro) não diferiram entre as condições de manejo (pousio e aveia + ervilhaca) em cada condição de tráfego e profundidade (dados não apresentados). No entanto, em valores absolutos, a macroporosidade apresentou tendência de diminuição em profundidade. No pousio, na camada 0,05 m, houve diferença na macroporosidade entre a condição AT e DT enquanto para a aveia + ervilhaca, houve diferença entre a condição ST e DT (Figura 14A e B). Em ambas as condições de manejo, os menores valores ocorreram em DT. Este comportamento está associado à densidade do solo que, embora não diferindo na condição de pousio apresentou, em valores absolutos, tendência de aumento em DT. Além disso, observou-se um aumento de “agregados” (denominação devido a metodologia usada porém, neste caso, a denominação blocos aos agregados é melhor representada) da classe $\geq 2,00$ mm após o tráfego, indicando que esta classe de “agregados” foi formada mecanicamente, por pressão externa (Figura 15), fato que diminui a quantidade de macroporos, porém pouco afetando densidade total na camada avaliada. Essa hipótese condiz com o estudo

realizado por Carrasco (1989), quando analisando a estrutura do solo em micro escala, ela revela uma redução em tamanho e número de macroporos, bem como mudanças na sua forma e continuidade.

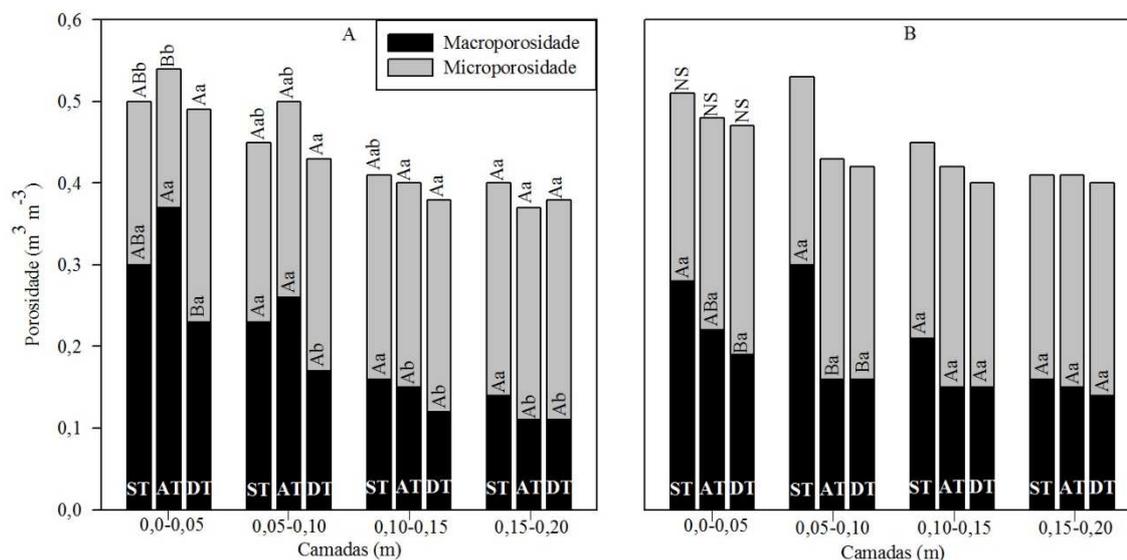


Figura 14. Porosidade do solo nos sistemas de manejo pousio (A) e aveia mais ervilhaca (B), nas condições de sem tráfego (ST), antes do tráfego (AT) e depois do tráfego (DT), em camadas. Letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. Letras maiúsculas comparam condições de tráfego em cada camada, e minúsculas comparam camadas em cada condição de tráfego.

Em profundidade, no pousio (Figura 14A), a macroporosidade diferiu nas condições de tráfego AT (cujo limite foi a camada de 0,10 m) e DT (cujo limite foi a camada de 0,05 m). Para a condição ST, no pousio, e para todas as condições ST, AT e DT na aveia + ervilhaca, não foram observadas diferenças nessa propriedade (Figura 14A e B, respectivamente). Isso se deve à densidade do solo que apresentou comportamento inverso à porosidade, bem como ao incremento de argila em profundidade, fato evidenciado em ambas as condições de manejo (Tabela 13).

Os valores de microporosidade apresentaram diferença entre as condições de tráfego AT e DT somente na camada até 0,05 m para pousio. Nas demais camadas, para o pousio, e em todas as camadas na condição de manejo aveia + ervilhaca, não foram observadas diferenças entre as condições de tráfego (Figura 14A e B).

Em profundidade, a microporosidade diferiu nas condições de tráfego ST e AT no pousio, com menores valores na camada até 0,10 m (Figura 14A). Na condição DT, no pousio, e em todas as condições de tráfego na aveia + ervilhaca, não foi observada diferença significativa nesta característica (Figura 14A e B, respectivamente). Esta característica dificilmente é afetada pelo manejo, uma vez que a microporosidade está relacionada com a organização das partículas minerais primárias do solo isoladas e, ou em microagregados (Lal e Shukla, 2005).

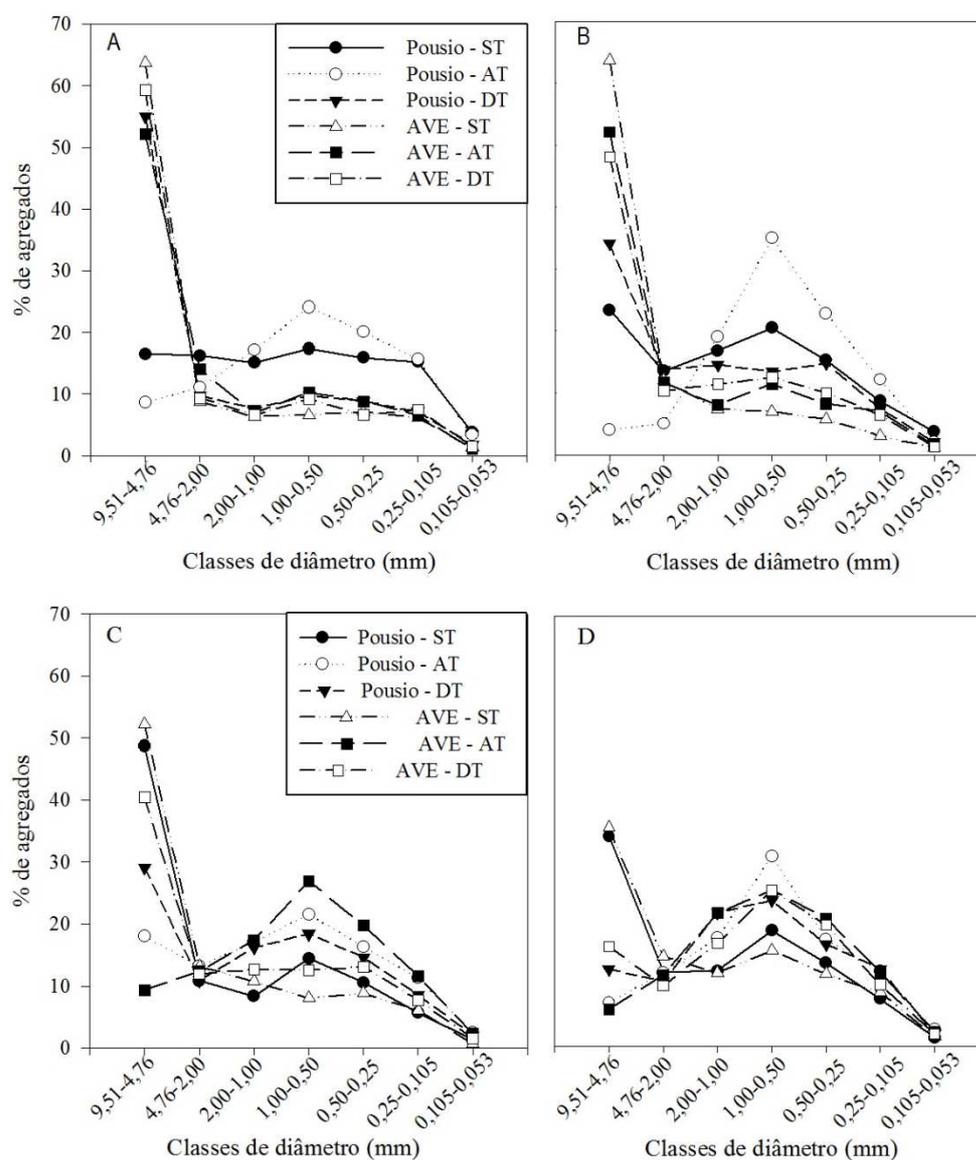


Figura 15. Distribuição de agregados por classes de tamanhos nos sistemas de manejo e condições de tráfego, nas profundidades 0,0-0,05 (A), 0,05-0,10 (B), 0,10-0,15 (C) e 0,15-0,20 m (D). AVE – Aveia + ervilhaca; ST – Sem tráfego; AT – Antes do tráfego; DT – Depois do tráfego.

A pressão de pré-consolidação, independentemente da condição de tráfego, apresentou maiores valores absolutos no manejo aveia + ervilhaca (Tabela 14). Para a condição ST (Tabela 14) houve diferença entre os sistemas de manejo na camada 0,15-0,20 m, enquanto na condição de tráfego AT houve diferença nas camadas 0,05-0,10 e 0,15-0,20 m, e para a condição DT na camada 0,10-0,15 m, respectivamente. Atribui-se isso a dois fatores: o primeiro está associado ao fato de que, mantendo o solo permanentemente coberto com plantas que aportam grande quantidade de matéria e energia (ex. gramíneas + leguminosas), aumenta-se a entropia do sistema, o que leva a um novo estado de ordem, aumentando a resistência a perturbações e resiliência do sistema solo (Vezzani e Mielniczuk, 2011) melhorando, por exemplo, propriedades como a porosidade, evidenciadas na Figura 6. O segundo fator está associado ao efeito do histórico de tráfego na área, ou seja, a intensidade de tráfego imposta pelo trator utilizado na área experimental até 2011 tem aumentado a densidade do solo (Figura 14), contribuindo para a diminuição do índice de compressibilidade (evidenciado pela correlação negativa na Tabela 16) e aumento na pressão de pré-consolidação (Schäffer et al., 2007).

Tabela 14. Pressão de pré-consolidação comparando sistemas de manejo em cada camada e tráfego

Camada (m)	Manejo	Tráfego		
		ST	AT	DT
----- kPa -----				
0,0-0,05	Pousio	30 a	48 a	54 a
	AVE	40 a	47 a	56 a
0,05-0,10	Pousio	43 a	53 b	75 a
	AVE	60 a	90 a	76 a
0,10-0,15	Pousio	54 a	80 a	76 b
	AVE	98 a	105 a	128 a
0,15-0,20	Pousio	61 b	69 b	129 a
	AVE	85 a	121 a	132 a

ST – Sem tráfego; AT – Antes do tráfego; DT – Depois do tráfego; AVE – Aveia + ervilhaca. Letras iguais na coluna comparam sistemas de manejo em mesma camada e tráfego, não diferindo significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No pousio, houve diferença na pressão de pré-consolidação entre condições de tráfego nas camadas 0,0-0,05 e 0,15-0,20 m, (maiores valores observados para a condição DT). Entre camadas, ocorreu diferença para as condições ST e DT, sendo os maiores valores observados na camada 0,15-

0,20 m (Figura 16A). Isso pode ser explicado pela menor macroporosidade e maior densidade do solo da camada superficial (especialmente na condição DT) ocasionada pelo tráfego e ao incremento natural de argila em profundidade, acarretando em aumento na densidade do solo (Figura 13A). Embora esta não tenha apresentado diferença entre as condições de tráfego, a transmissão de pressão e vibração imprimida no solo pelos pneus acarretou em aumento da quantidade de “agregados” da classe $\geq 2,00$ mm, (Figura 15), sugerindo ser uma junção mecânica das partículas de solo oriundas do tráfego. Logo, pressões externas levam a um novo rearranjo desses agregados reduzindo a macroporosidade (Carrasco, 1989), porém sem efeitos sobre a densidade do solo neste estudo.

Para a aveia + ervilhaca, houve diferença na pressão de pré-consolidação entre condições de tráfego somente na camada 0,15-0,20 m, com maiores valores nos tratamentos que ocorreu tráfego no passado (Figura 16B). Isso provavelmente se deve ao fato de que, abaixo de 0,15 m, há pouca contribuição dos resíduos vegetais no processo de agregação, ficando este processo predominantemente por ação de ligações entre argilominerais e óxidos (Lal e Shukla, 2005) ou mesmo de forças mecânicas externas, como histórico de pressões aplicadas pelo tráfego.

Comparando camadas em cada condição de tráfego, verificou-se menor valor da pressão de pré-consolidação na camada 0,05 m (ST e AT), esta diferindo das camadas abaixo de 0,10 m na condição ST, e para todas as camadas na condição AT, respectivamente. Para a condição DT, os menores valores foram encontrados nas camadas até 0,10 m, estas diferindo das demais. Isto provavelmente seja devido ao aumento no conteúdo de argila em profundidade (Tabela 13), ocasionando aumento natural nos valores de densidade do solo (Figura 13) e acúmulo de pressões pelo tráfego.

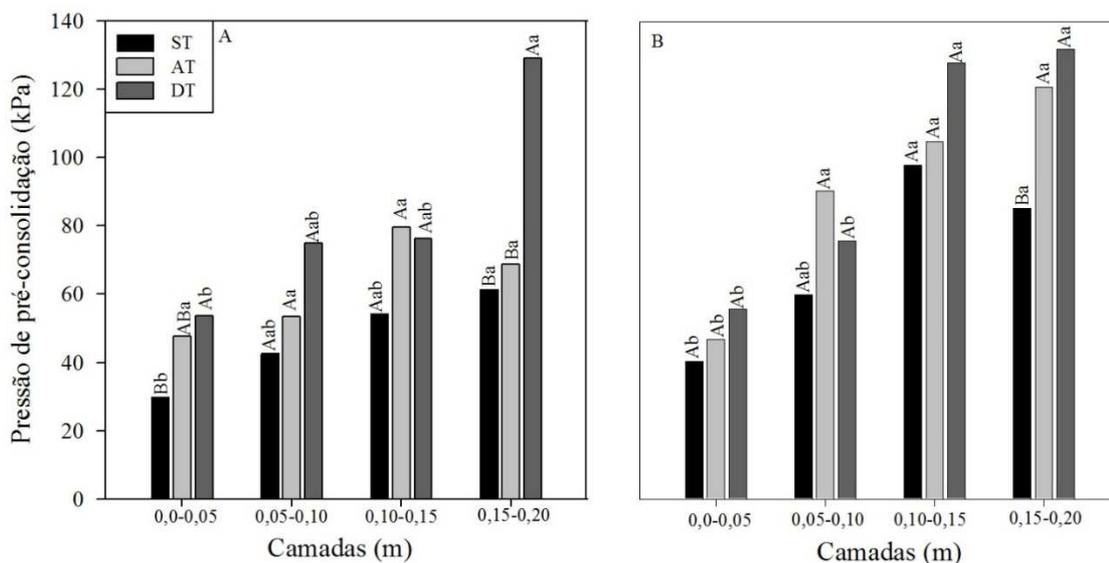


Figura 16. Pressão de pré-consolidação nos sistemas de manejo pousio (A) e aveia + ervilhaca (B), nas condições de sem tráfego (ST), antes do tráfego (AT) e depois do tráfego (DT), em camadas. Letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. Letras maiúsculas comparam condições de tráfego em cada camada, e minúsculas comparam camadas em cada condição de tráfego.

A resistência do solo à penetração (RP) apresentou comportamento semelhante às demais análises, aumentando em profundidade para ambas as condições de manejo (Figura 17), porém com magnitude dos valores distintos. Para a cobertura de inverno pousio (Figura 17A), os valores de RP variaram de 0,4 a 1,6 MPa, apresentando pequena amplitude entre as condições de tráfego, devido a pequena variação na densidade do solo (Figura 13A) e profundidade (até 0,10 m).

Para a cobertura aveia + ervilhaca, a magnitude na variação dos valores foi maior (0,4 a 2,1 MPa), com valores de RP próximos entre as condições de tráfego AT e DT (Figura 13B) até a profundidade 0,15 m. Tendo como referência os valores de RP da condição ST, observa-se que as condições de tráfego na cobertura aveia + ervilhaca imposto ao solo com o trator até 2011 (condição AT) aumentou a RP até 0,15 m de profundidade (Figura 17B). Um novo acréscimo de carga (imposto pelo sistema DT) promoveu um incremento dos valores de RP e DS até 0,20 m de profundidade atingindo valor de 2,1 MPa e 1,57 Mg m⁻³, respectivamente. Esses dados

corroboram com Imhoff (2002) o qual aponta que valores de RP maiores que 2,0 MPa limitariam o crescimento radicular, bem como com Reichert et al. (2003) os quais apontam que a densidade crítica para desenvolvimento radicular para este solo para o é de $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$, o que neste caso pode vir a acontecer. Isso sugere que a frequência de tráfego ao longo dos anos pode ocasionar problemas de compactação em subsuperfície.

Comparando as coberturas de inverno com base nos valores de RP (Figura 17A e B), a maior magnitude dos valores poderia ter ocorrido devido à mudança no conteúdo gravimétrico de água no solo no momento das avaliações. Tal fato não ocorreu, uma vez que os valores de umidade foram de $0,15 \pm 0,01$ e $0,17 \pm 0,01 \text{ kg kg}^{-1}$ para pousio e aveia + ervilhaca, respectivamente, valores estes abaixo do limite de plasticidade ($0,18 \text{ kg kg}^{-1}$) determinado por Mazurana (2011) para mesmo solo. Dessa forma, a maior magnitude nos valores de RP observada entre as duas condições de cobertura pode ser resultado de uma maior estabilidade na estrutura do solo no do sistema aveia + ervilhaca, uma vez que o conteúdo de matéria orgânica do solo deste sistema é maior que o pousio (Sequinatto, 2010). No entanto, esse aumento na RP não é entendido como um impedimento ao crescimento radicular, mas sim uma maior estabilidade da estrutura do solo às deformações.

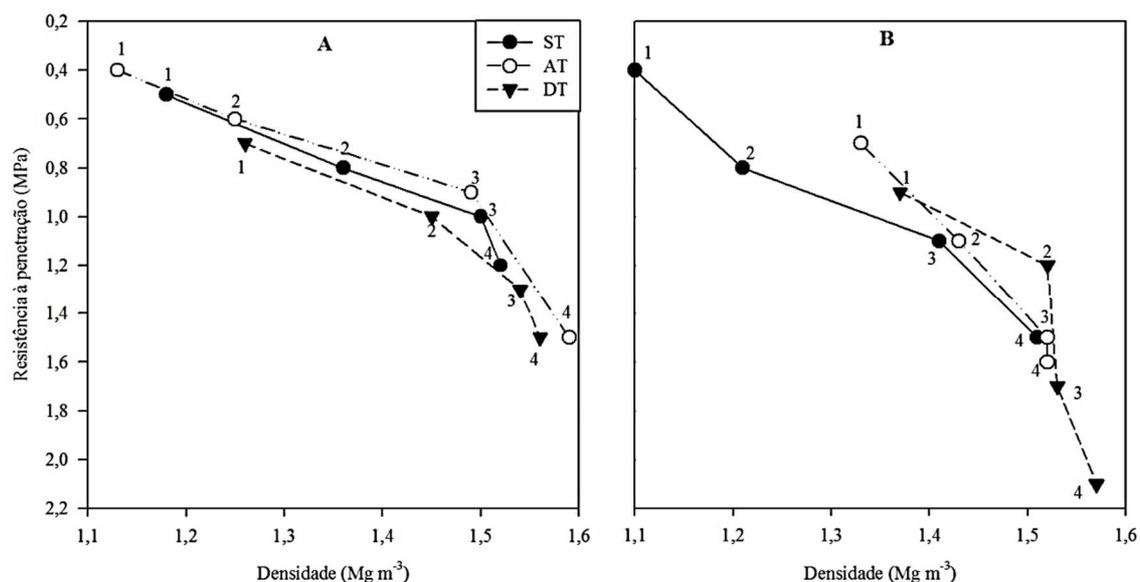


Figura 17. Resistência mecânica do solo à penetração, densidade e conteúdo gravimétrico de água no solo na condição de pousio (A) e aveia +

ervilhaca (B). Números sobre os marcadores indicam camadas no solo 0,0-0,05 (1), 0,05-0,10 (2), 0,10-0,15 (3) e 0,15-0,20 m (4).

5.3.2. Parâmetros de planta afetados pelo tráfego e disponibilidade hídrica

Os parâmetros de planta avaliados em casa de vegetação nas condições de disponibilidade hídrica e tráfego controlado estão apresentados no Tabela 15. O tratamento com restrição hídrica (CRH) apresentou menor produção de massa de raízes do milho em relação ao tratamento sem restrição hídrica (SRH). Possivelmente, no tratamento com CRH, o maior potencial matricial de água no solo devido à drenagem natural e/ou evapotranspiração, aumentou a coesão entre partículas do solo, aumentando a resistência ao crescimento da raiz. Além disso, menor quantidade de água chega e ascende às células das raízes, diminuindo a pressão hidrostática e não mantendo o mínimo de turgor necessário para a expansão celular (Hsiao e Xu, 2000). Ambos os fatores associados, diminuem ou até mesmo impedem o crescimento radicular, como apontam Hamza e Anderson (2005).

A massa de raízes (Tabela 15) diminuiu em profundidade em todos os tratamentos. No tratamento CRH, somente a primeira camada diferiu das demais, enquanto as camadas inferiores apresentaram uma tendência na diminuição dos valores absolutos. Para o tratamento SRH, houve diferenças entre as camadas, com maiores valores para a camada até 0,10 m. No entanto, a camada 0,10-0,15 m não diferiu da camada 0,05-0,10 e 0,15-0,20 m, indicando uma estagnação no crescimento das raízes. Segundo Barber et al. (1988), a taxa de crescimento das raízes de milho é altamente dependente do conteúdo de água no solo, sendo que a maior disponibilidade auxilia na turgidez das células radiculares, aumentando a expansão celular bem como atua como lubrificante entre a coifa e partículas de solo, permitindo a melhor penetração das raízes em crescimento.

Analisando os resultados para uma mesma camada observa-se que, não há diferença entre os tratamentos nas camadas 0,0-0,05 e 0,15-0,20 m. No entanto, nas duas camadas intermediárias, os maiores valores de massa de raízes foram observados no tratamento DT-SRH (1,26 e 0,77 g), não diferindo do tratamento AT-SRH (0,80 e 0,54 g, respectivamente). Estes resultados

sugerem que o tratamento DT-SRH proporcionou melhores condições comparativamente ao tratamento AT-SRH para o desenvolvimento das raízes (Tabela 15), fato atribuído a maior aproximação das partículas de solo às raízes, aumentando o volume de solo explorado. Isso corrobora com Barber (1995) que, avaliando quatro níveis de compactação, verificou um aumento de absorção de nutrientes pelas plantas na medida em que aumentou o nível de compactação, principalmente, pela diminuição da tortuosidade do caminho difusivo para fósforo e potássio, e aproximação das partículas do solo para o fluxo de massa e intercepção radicular para cálcio e magnésio, mostrando ter a compactação, em certo grau, efeito benéfico no desenvolvimento das plantas.

Em relação à massa da parte aérea e à área foliar, somente houve diferença entre as médias dos tratamentos SRH e CRH, sem haver influência do tráfego (Tabela 15). No entanto, a relação entre parte aérea e raízes foi menor nos tratamentos SRH, mostrando que a maior disponibilidade de água no solo promove o maior crescimento das raízes devido a menor resistência do solo à penetração (Libardi e Jong van Lier, 1999), entendido como efeito lubrificante entre raiz-solo e diminuição nas forças de coesão que mantém unidas as partículas na estrutura do solo. Nesse mesmo tratamento, a umidade das raízes apresentou tendência em ser menor que no tratamento CRH. Isto pode ser um indicativo de que, em déficit hídrico, a planta acumula mais solutos em suas células, retendo mais água. Ainda, segundo Hsiao e Xu (2000), as plantas têm alta capacidade de rápido ajuste osmótico do potencial de água das células das raízes, o que não ocorre nas folhas. Deste modo, para um baixo potencial de água no solo, as folhas tendem a diminuir a taxa de crescimento antes que as raízes.

Tabela 15. Massa de raízes das camadas estratificadas, parte aérea, área foliar, relação entre parte aérea/raízes do milho e teor de umidade para os tratamentos de restrição hídrica (CRH e SRH) e tráfego controlado (AT e DT)

Tratamentos	Estratificação de raízes (m)					Parte aérea	Área foliar	Relação parte aérea/raízes	Umidade das raízes
	0 – 0,05	0,05 – 0,10	0,10 – 0,15	0,15 – 0,20	0 – 0,20				
	-----g (massa seca) -----						--cm ² --		--%--
AT - CRH	1,24 ^{ns} A	0,48 b B	0,23 c B	0,11 ^{ns} B	2,05 c	0,76 b	148,2 b	0,38	86 ^{ns}
DT - CRH	1,36 A	0,41 b B	0,31 bc B	0,09 B	2,16 c	0,76 b	137,6 b	0,37	85
AT – SRH	1,59 A	0,80 ab B	0,54 ab BC	0,44 C	3,37 b	1,13 a	259,4 a	0,34	84
DT - SRH	1,93 A	1,26 a B	0,77 a BC	0,46 C	4,42 a	1,45 a	270,6 a	0,33	84

Letras maiúsculas comparam médias na linha e minúsculas comparam médias em colunas. ^{ns} não significativo pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

5.3.3. Correlações entre parâmetros avaliados

Na Tabela 16 são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson e seus respectivos níveis de significância. A densidade do solo apresentou relação negativa com a macroporosidade, porosidade total e IC. Este resultado se deve ao fato de que a diminuição do espaço aéreo do solo em função de tráfego ou manejo aumenta a densidade do solo (embora não evidenciado neste trabalho) o que, por sua vez, diminui a capacidade do solo em se deformar (IC), aumentando a capacidade do solo em suportar carga (σ_p).

Tabela 16. Coeficientes de correlação de Pearson e nível de significância entre parâmetros avaliados

	Ma	Mi	PT	DMP	σ_p	IC	MR
DS	-0,9163 <,0001	0,5036 <,0001	-0,9345 <,0001	-0,2731 0,0203	0,5726 <,0001	-0,5726 <,0001	-0,7640 <,0001
Macro	1,0000	-0,7156 <,0001	0,9365 <,0001	0,1977 0,0959	-0,5177 <,0001	0,5462 <,0001	0,6874 0,0002
Micro		1,000	0,4253 0,0002	0,0477 0,6967	0,2705 0,0216	-0,3355 0,0040	-0,3023 0,1510
PT			1,0000	0,2802 0,0171	-0,5350 <,0001	0,5393 <,0001	0,7808 <,0001
DMP				1,0000	-0,2002 0,0918	0,0711 0,5525	0,2990 0,1558
σ_p					1,0000	-0,6755 <,0001	-0,5513 0,0052
IC						1,0000	0,5572 0,0047

Ma – Macroporosidade; Mi – Microporosidade; DS – Densidade do solo; PT – Porosidade total; σ_p – Pressão de pré-consolidação; DMP – Diâmetro médio ponderado; IC – Índice de compressibilidade; MR – Massa de raiz.

Os sistemas de manejo e tráfego influenciaram a macroporosidade (Figura 14) e este fato refletiu diretamente na porosidade total, explicando a relação direta entre estes dois parâmetros ($r = 0,9365$; $\alpha < 0,0001$) (Tabela 16). A correlação entre macroporosidade e microporosidade ($r = 0,7156$; $\alpha < 0,0001$), não é um efeito direto (Tabela 16), corroborando com o fato de que a microporosidade é pouco afetada pelas coberturas de inverno e tráfego, mas sim por características intrínsecas de solo. No entanto, a proporção relativa de

microporos, em relação aos macroporos, aumenta quando a macroporosidade diminui por efeitos de manejo, por exemplo.

A relação entre a massa de raízes de milho foi negativa com a densidade do solo ($r = -0,7640$; $\alpha < 0,0001$) e positiva com a macroporosidade ($r = 0,6874$; $\alpha = 0,0002$) (Tabela 16). Possivelmente, esta dinâmica envolve o aumento natural da densidade do solo em profundidade (Figura 13A e B) associado ao efeito do tráfego em diminuir a macroporosidade em profundidade e ao padrão natural de desenvolvimento de raízes, uma vez que encontrando condições adequadas de nutrição, disponibilidade hídrica e oxigenação nas camadas superficiais, não há dreno de energia para crescimento radicular em camadas profundas (0,15-0,20 m).

5.4. CONCLUSÕES

A densidade do solo independentemente da camada avaliada não foi afetada pela condição de cobertura do solo, mas sim pela condição de tráfego. Já a macroporosidade foi afetada pelo tráfego no sistema pousio até 0,10 m, indicando ter este sistema menor capacidade de suportar perturbações, comprovado também pelos menores valores de pressão de pré-consolidação. A resistência do solo à penetração aumentou em profundidade, estando relacionada à maior densidade, menor macroporosidade e maior pressão de pré-consolidação. Sem restrição hídrica, o crescimento radicular do milho foi influenciado positivamente pelo tráfego de máquinas. O tratamento DT sem restrição hídrica foi o que apresentou os valores mais altos de massa de raízes de milho, contrastando com o tratamento AT com restrição hídrica. A massa da parte aérea e a área foliar não foram influenciadas pelas condições de tráfego. Nas condições da experimentação, o plantio direto com sistema de rotação de culturas apresentou maior resiliência frente às perturbações do meio.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas análises realizadas neste trabalho e com base nos resultados auferidos, observou-se que o tempo de adoção do sistema de plantio direto gera modificações na estrutura do solo na camada dita “arável”, as quais não são passíveis de identificação pela análise das variáveis físicas ou mecânicas isoladas, mas sim por variáveis que governam processos como fluxos de ar e água.

Os valores de pressão de pré-consolidação encontrados neste trabalho foram superiores aos aplicados pelos rodados das máquinas, indicando que, se respeitado os limites de umidade do solo para tráfego, o solo não sofrerá compactação adicional, conforme elucida a base teórica de estudos desta natureza.

Os resultados de pressão de pré-consolidação e índice de compressibilidade indicam que, para as condições de uso da informação com fins agrícolas, é possível reduzir o tempo de aplicação de carga disposto na NBR 12007/90 e até então modificada por Carpenedo (1994), de cinco minutos para 30 segundos para cada carga aplicada.

A relação entre compactação e desenvolvimento de plantas aqui abordada com base em alguns parâmetros fisiológicos medidos em plantas de milho, indicam que, em não havendo restrição hídrica, o crescimento radicular foi influenciado positivamente pelo tráfego de máquinas, ao passo que a parte aérea não mostrou alteração. Nas condições da experimentação, o plantio direto com sistema de rotação de culturas apresentou maior resiliência frente às perturbações do meio.

Entretanto, sugere-se que para melhor entender a dinâmica desta relação, a análise da relação grau de compactação seja particionada e acompanhada durante os estádios fenológicos de desenvolvimento das culturas estudadas, uma vez que outros fatores ao longo do ciclo da cultura interferem na expressão do rendimento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de adensamento unidimensional**: NBR 12007. Rio de Janeiro, 1990.

AJAYI, A.E. et al. Comparison of estimation methods of soils strength in five soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. V. 33, p. 487-495, 2009.

AJAYI, A.E. et al. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, p. 14-18, 2009.

AJAYI, A.E. et al. Strength attributes and compaction susceptibility in Brazilian latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p.122-127, 2009.

AKKER, J.J.H.; CANARACHE, A. Two European concerted actions on subsoil compaction. **Landnutzung und Landentwicklung**, Duisburg, v. 42, p. 15-22, 2001.

ALAOUI A.A.; LIPIEC, J.; GERKE, H.H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 115-116, p. 1-15, 2011.

ALIEV, K. Current problems with regard to mechanization and greening of farming in Azerbaijan. **Mezhdunarodnyi Sel'skokhozyaistvennyi Zhurnal**, Russia, v. 5, p. 57-61, 2001.

ARVIDSSON, J. et al. Rubber track systems for conventional tractors – Effects on soil compaction and traction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 117, p. 103-109, 2011.

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

ASAE – AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Soil Cone Penetrometer** – ASAE S313.3. Saint Joseph, 2004.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTE DE VEÍCULOS AUTOMOTORES – ANFAVEA – **Anuário da indústria automotiva brasileira**. São Paulo, 2013.

BACHMAIR, S.; WEILER, M.; NÜTZMANN, G. Controls of land use and structure on water movement: lessons for pollutant transfer through the unsaturated zone. **Journal Hydrology**, Amsterdam, v. 369, p.241-252, 2009.

BARBER, S.A. et al. Effect of soil temperature and water on maize root growth. **Plant Soil**, Dordresht, v. 111, p. 267-269, 1988.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability**: a mechanistic approach. 2^a ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 240 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BENGOUGH, A.G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 62, p. 59-68, 2011.

BENGOUGH, A.G. et al. Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 57, p. 437-477, 2006.

BERISSO, F.E. et al. Gas transport and subsoil pore characteristics: Anisotropy and long-term effects of compaction. **Geoderma**, Amsterdam, v. 196, p. 184-191, 2013.

BEUTLER, A.N. et al. Densidade relativa ótima de latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 843-849, 2005.

BONDAREV, A.G.; KUZNETSOVA, I.V. The degradation of physical properties of soils in Russia and ways to minimize it. **Pochvovedeni**, Russia, v. 9, p. 1126-1131. 1999.

BOTTA, G. et al. Soil compaction produced by tractor with radial and bias-ply tyres in two soil conditions: conventional tillage and direct sowing. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 101, p. 44-51, 2008.

BOTTA, G.; TOLÓN-BECERRA, A.; BELLORA TOURN, F. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 381-386, 2009.

BOTTA, G.F. et al. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.110, p. 167-174, 2010.

BRAIDA, J. A. **Acúmulo de resíduos vegetais na superfície e de matéria orgânica no solo e suas implicações no comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 106 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BRAIDA, J.A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 477-485, 2008.

BRANDY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. New Jersey: Pearson Education, 2002.

BRUCE-OKINE, E.; LAL, R. Soil erodibility as determined by raindrop technique. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 119, p. 149-156, 1973.

CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 813-819, 2005.

CANARACHE, A. et al. Effect of induced compaction by wheel traffic on soil physical properties and yield of maize in Romania. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 4, n. 2, p. 199-213, 1984.

CARDER, J.; GRASBY, J. **A framework for regional soil conservation treatments in the medium and low rainfall agricultural district.** [Western Australia]: Department of Agriculture, 1986. 120 p. (Research Report 1/86)

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo.** 1994. 106 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, p. 99-105, 1990.

CARPENTER, T.G.; FAUSEY, N.R.; REEDER, R.C. Theoretical effect of wheel loads on subsoil stresses. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 6, p. 179-192, 1985.

CARRASCO, P.J. **Efeito da compactação sobre as propriedades físicas do solo, crescimento e rendimento do girassol.** 1989. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

CHAMEN, W.T.C. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 161-174, 2003.

CHAN, K.Y. et al. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 13-21, 2006.

CHANCELLOR, W.J. Effects of compaction on soil strength. In: **COMPACTION of Agricultural Soils.** St. Joseph: American Society of Engineering, 1971. p.190-222.

CONCEIÇÃO, P.C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em solos tropicais e subtropicais.** 2006. 138 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

CONCEIÇÃO, P.C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 777-788, 2005.

DAVIES, D.B.; FINNEY, J.B.; RICHARDSON, S.J. Relative effects of tractor weight and wheel slip causes soil compaction. 1972. (Presented at British Society of Soil Science Awards, Reading, Jubilee Meeting, 1972).

DAWIDOWSKI, J.B.; KOOLEN, A.J. Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, p. 277-282, 1994.

DEBIASI, H. et al. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2629-2637, 2008.

DENEF, K. et al. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 246, p. 185-200, 2002.

DEXTER, A.R. et al. Complexed organic matter controls soil physical properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 144, p. 620-627, 2008.

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

DIMIRKOU, A.; IOANNOU, A.; KALLIANNOU, C.; Synthesis-identification of hematite and kaolinite-hematite (k-h) system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, United Kingdom, v. 27, p. 1091-1106, 1996.

EKWUE, E.I. Organic matter effects on soil strength properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 289-297, 1990.

ELLIES, A.; MAC DONALD, R. Evaluacion de La consistência de los principales suelos de las provincias de Valdivia y Osorno. **Agro Sur**, Chile, v. 13, p. 77-83, 1985.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 2006.

FAZEKAS, O.; HORN, R. Zusammenhang zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilität in Abhängigkeit von der Belastungsdauer, **Journal of Plant Nutrition Soil Science**, United Kingdom, v. 168, p. 60-67, 2005.

FEBO, P.; LUCARRELLI, F.; PESSINA, D. Soil-tyre interaction parameters influencing soil compaction: a study of contact área prediction models. **Advances in Geocology**, Reiskirchen v.32, p.191-201, 2000.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA – FEBRAPDP **Evolução da área em sistema de plantio direto no Brasil**. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/download/PD_Brasil_2013.l.pdf> Acesso em: 08 out. 2014.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 507-514. 1999.

FRANCHINI, J.C. et al. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52 p. (Embrapa Soja. Documentos, 327).

FRANZLUEBBERS, A.J. et al. Why do we need to standardize no tillage research? **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 137, p. 16-22, 2014.

FREDDI, O.S. et al. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 627-636. 2007.

FRESE, H. The question of soil compaction in the field by the use of vehicles with pneumatic tires. **LandbForsch-Völkenrode**, Rússia, v. 5, p. 31-34, 1955.

GIAROLA, N.F.B; SILVA, A.P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 885-893, 2002.

GILL, W.R.; REAVES, C.A. Compaction patterns of smooth rubber tires. **Agriculture Engineer**, Itália, v. 37, p. 677-680, 1956.

GONÇALVES, D. et al. Mineralogia de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a diferentes manejos por 24 anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2647-2652. 2008.

GONÇALVES, W.G. et al. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Piracicaba, v. 26, p. 67-75, 2006.

GRANT, C.D; DEXTER A.R. Generation of microcracks in moulded soils by rapid wetting. **Australian Journal Soil Research**, Sidney, v. 27, p. 169-182, 1989.

GREENLAND, D.J. Land use and soil carbon in different agroecological zones. In: **ADVANCES in Soil Science: soil management and greenhouse effect**. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, 1995. p. 9-24.

GREGORY, A.S. et al. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 45-57, 2006.

GREGORY, A.S. et al. The effects of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, p. 172-185, 2009.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Método alternativo para determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 36, p. 664-668, 2006.

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

GUPTA, S.C; HADAS, A.; SCHAFER, R.L. Modelling soil mechanical behavior during compaction. In: **MECHANICS and related process in structural agricultural soils**. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989. p. 137-152.

GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambissol under heavy wheel traffic in Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, p. 133-142, 2001.

HAKANSSON, I. A model for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 105-120, 1990.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, cause and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 121-145, 2005.

HARTGE, K.H.; BOHNE, H. Effect of pore geometry on compressibility of soil and development of rye seedings. **Zeitschrift fur Kulturtechnik und Flurbereinigung**, Berlin, v. 24, p. 5-10, 1983.

HARTGE, K.H.; SOMMER, C. Effect of soil formation an packing and vertical stresses in soil. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Weinheim, v. 145, p. 25-35, 1982.

HÉNIN, S. Etude physico-chimique de la stabilite structurale des terres. **Monograph National Center of Agronomic Research**, Paris, p. 52–54. 1938.

HENRIQUE, D. **Recuperação física de um Argissolo compactado e suas implicações sobre o sistema de solo-máquina-planta**. 2008, 263 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

HILLEL, D. **Introduction to Soil Physics**. New York: Academic Press, 1982.

HORN, R. et al. Soil physical properties related to soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, p. 187-216, 1994.

HORN, R., BAUMGARTL, T. **Dynamic properties of soils**. In: HANDBOOK of Soil Science. Boca Raton: CRC Press, 1999. p. A19–A51

HSIAO, T.C.; XU, L.K. Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 51, p. 1595-1616, 2000.

IMESON, A.C.; VIS, M. Assessing soil aggregate stability by water drop impact and ultrasonic dispersion. **Geoderma**, Amsterdam, v. 34, p. 185-200, 1984.

IMHOFF, S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 94 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

KARLEN, D.L. et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 4-10, 1997.

KELLER, T. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres form readily available tyre parameters. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 87, p. 375-386, 2005.

KELLER, T. et al. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil defomation during compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 128, p. 61-80, 2013.

KELLER, T. et al. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma**, Amsterdam, v. 163, p. 13-23, 2011.

KELLER, T. et al. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 140, p. 106-117, 2014.

KELLER, T.; LAMANDÉ, M. Challenges in the development of analytical soil compaction models. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, p. 54-64, 2010.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, p. 45-54, 1998.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Estimativa do efeito do uso e da umidade do solo sobre a compactação adicional de três latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 773-782, 1999.

KUAN, H.L. et al. The biological and physical stability and resilience of a selection of Scottish soils to stresses. **European Journal of Soil Science**. Amsterdam, v. 58, p. 811-821, 2007.

LAL, R.; SHUKLA, M.K. **Principles of soil physics**. Ohio, USA, 2004.

LAMANDÉ, M.; SCHJONNING, P. The ability of agricultural tyres to distribute the wheel load at the soil-tyre interface. **Journal Terramechanics**, England, v. 45, p. 109-120, 2008.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soil Mechanics**. Massachusetts: Institute of Technology, 1969.

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

LEBERT, M.; BURGER, M.; HORN, R. **Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils**. In: MECHANICS and Related Processes in Structured Agricultural Soils. Dordrecht: Kluwer, 1989. p. 73–80. (NATO ISI Series, E: Applied Sciences 172)

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 9, p. 257-286, 1991.

LIBARDI, P.L.; JONG van LIER, Q. **Atuação dos fatores físicos do solo no desenvolvimento do sistema radicular**. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR. Aracaju: Embrapa - Tabuleiros Costeiros, 1999. p.47-56.

LIPIEC, J. et al. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 121, p. 74-81, 2012.

LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J.; MURER, E. Review of modeling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 15-29. 2003.

MACHADO, A.L.T. **Previsão do esforço de tração para ferramentas estreitas em solos do Rio Grande do Sul**. 2001. 172 f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MAPFUMO, E.; CHANASYK, D.S. Guidelines for safety trafficking and cultivation, and resistance – density - moisture relations of three disturbed soils from Alberta. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 46, p. 193-202, 1998.

MARCOLIN, C.D. Influência da textura do solo sobre a densidade, densidade máxima e umidade ótima de compactação e na densidade relativa do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 2006, Aracaju. **Anais...** Aracaju, 2006.

MAZURANA, M. **Atributos físicos, mineralógicos e matéria orgânica do solo relacionados à capacidade de suporte de carga**. 2011. 169 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

McCALLA, T.M. Water-drop method of determining stability of soil structure. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 58, p. 117-121, 1944.

MCPHEE, J.E. et al. The effect of controlled traffic on soil physical properties and tillage requirements for vegetable production. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 149, p. 33-45, 2015.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. **Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate**. In: CLAYS & CLAY MINERAL CONFERENCE, 1960, London. **Proceedings**. London, 1960. p. 317-327.

MELO, V.F.; WYPYCH, F. Caulinita e Halosita. In: QUÍMICA e Mineralogia do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2009. v. 2, p. 459-504

MIRANSARI, M. et al. Effects of soil compaction and arbuscular mycorrhiza on corn (*Zea mays* L.) nutrient uptake. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 282-290, 2009.

MOSADDEGHI, M.R. et al. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 55, p. 87-97, 2000.

MUGGLER, C.C. et al. Aggregation, organic matter, and iron oxide morphology in Oxisoil from Minas Gerais, Brazil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 164, p. 759-770, 1999.

MULLINS, C.E.; BLACKWELL, P.S.; TISDALL, J.M. Strength development during drying of a cultivated, flood-irrigated hardsetting soil. I. Comparison with a structurally stable soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, p. 113-128, 1992.

MULLINS, C.E.; PANAYIOTOPOULOS, K.P. The strength of unsaturated mixtures of sand and kaolin and concept of effective stress. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 35, p. 459-468, 1984.

MWENDERA, E.J., SALEEM, M.A.M. Hydrologic response to cattle grazing in the Ethiopian highlands. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 64, p. 33-41. 1997.

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

OHTOMO, K., TAN, C.C.A. Direct measurement of soil deformation using the bead-grid method. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 78, p. 325-332, 2001.

OLDEMAN, L.R., HAKKELING, R.T.A., SOMBROECK, W.G. **World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note**. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), 1991.

OR, D.; GHEZZEHEI, T.A. Modeling post-tillage soil structural dynamics: a review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, p. 41-59, 2002.

PENG, X.H. et al. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted Ultisols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, p. 125-137. 2004.

PEREIRA, J.O.; DE'FOSSEZ, P.; RICHARD, G. Soil susceptibility to compaction by whelling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage systems. **European Journal of Soil Science**, Lancaster, v. 58, p. 34-44. 2007.

PETERSEN, G.A.; LYON, D.J.; FENSTER, C.R. Valuing long-term field experiments: quantifying the scientific contribution of a long-term tillage experiment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, p. 757-765, 2012.

RAGHAVAN, G.S.V.; MCKYES, E.; CHASSÉ, M. Effect of wheel slip on soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 22, p. 79-83, 1977.

RAPER, R.L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, England, v. 42, p. 259-280, 2005.

REICHERT, J.M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, p. 242-254, 2009.

REICHERT, J.M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 310-319, 2009.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, SBCS, 2003. 1 CD-ROM.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 2003.

REIS, A.V. et al. **Motores, tratores, combustíveis e lubrificantes**. 2 ed. Pelotas/RS: Editora Universitária, 2005.

RÜCKNAGEL, J. et al. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 213-220, 2007.

RUSER, R. et al. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v. 38, p. 263-274, 2006.

RUSSELL, J.R. et al. Cattle treading effects on sediment loss and water infiltration. **Journal of Range Management**, Arizona, v. 54, p. 184-190. 2001.

SAFFIH-HDADI, K. et al. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 96-103, 2009.

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

SÁNCHEZ-GIRÓN, V. **Dinámica y mecânica de suelos**. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1996.

SCHÄFFER, B. et al. Soil and macropores under uniaxial compression. I. Mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, p. 183-191, 2008.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery—Soil physical and mechanical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, p. 28-43, 2007.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery—Soil physical and mechanical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, p. 28-43, 2007.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. **Zeitschrift für Pflanzenernähr Döng Döngung und Bodenkund**, Weinheim, v. 105, p. 194-202, 1964.

SCHWERTMANN, U.; TEYLOR, R.M. Iron osides. In: MINERALS in soil environments. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America Journal, 1989. p. 379-348.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. 2003. 108 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em

Agronomia, área de concentração Biodinâmica de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SEQUINATTO, L. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação.** Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. 141p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

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

SILVA, A.R. et al. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 207- 216, 2006.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 191-199, 2000.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 74, p. 7-31, 2004.

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

SOEHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. **Agriculture Engineer**, Itália, v. 39, p. 276-281, 1958.

SOUZA, E.D. et al. Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 28, p. 323-329, 2006

SPOOR, C.; TIJINK, F.C.J.; WEISSKOPF, P. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 175-182. 2003.

STENGEL, P. Characterization of soil structure: objectives and methods. In: SOIL structure and its evolution: agricultural consequences and its management. France: INRA, 1990. p. 15–36.

SUHAYDA, C.G. et al. Gypsum amendment improves native grass establishment on saline-alkali soils in Northeast China. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 13, p. 43-47, 1997.

TANG, A.M. et al. Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 148, p. 282–290, 2009.

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

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

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, p. 141-163, 1982.

TOKUMOTO, I.; NOBURIO, K.; KOGA, K. Coupled water and heat flow in a grass field with aggregated andisol during soil-freezing periods. **Cold Regions Science and Technology**, Amsterdam, v. 62, p. 98-106, 2010.

TOMAZZI, M. **Estabilidade da matéria orgânica em Latossolos do Cerrado sob sistemas de uso e manejo**. 2008. 106 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

VAN LIER, Q. de JONG. **Física do Solo**. Viçosa/MG, 2010.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo, Mcgraw-Hill, 1977.

VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 104-113, 2007.

VEZZANI, F.M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. **O solo como sistema**. Curitiba, 2011.

WANG, E. et al. Quantifying soil condition based on soil solid, liquid and gaseous phases. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 146, p. 4-9, 2015.

WEST, S.I. et al. Kaolinite, halloysite and iron oxide influence on physical behavior of formulated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 1452-1460. 2004.

ZHANG, B.; HORN, R.; HALLETT, P.D.; Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 864-871, 2005.

ZHAO, Y. et al. Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 109, p. 75-86. 2010.

ANEXOS

Anexo 1. Conteúdo gravimétrico de água no solo no limite de plasticidade para as classes de solos

Classe de solo	Plasticidade ¹	Amostra	Condição
		Ug (kg kg ⁻¹)	
Argissolo Vermelho	0,14	0,11±0,02	Friável
Latossolo Bruno	0,43	0,37±0,04	Friável
Latossolo Vermelho	0,28	0,23±0,04	Friável

¹ – Limite inferior da plasticidade.

Anexo 2. Teor de carbono orgânico (g kg⁻¹) em duas profundidades para as três classes de solos

Classe de solo	Profundidade (cm)	
	0-5	5-10
Argissolo Vermelho	23,6	17,0
Latossolo Bruno	48,9	36,1
Latossolo Vermelho	23,2	16,2

Anexo 3. Correlação de Spearman para todas as variáveis físicas e mecânicas para o Argissolo Vermelho Distrófico típico

	Macro	Micro	Ds	Uv	PPC	IC	Kar	EA	Da/Ds
Macro	1								
Micro	-0,37	1							
Ds	-0,69	-0,20 ^{ns}	1						
Uv	-0,66	0,64	0,19 ^{ns}	1					
PPC	-0,58	0,25	0,49	0,44	1				
IC	0,67	0,15 ^{ns}	-0,81	-0,07 ^{ns}	-0,52	1			
Kar	0,70	-0,27 ^{ns}	-0,52	-0,48	-0,53	0,52	1		
EA	0,92	-0,19 ^{ns}	-0,69	-0,72	-0,54	0,59	0,72	1	
Da/Ds	0,54	-0,07 ^{ns}	-0,56	-0,24	-0,52	0,43	0,48	0,48	1

^{ns} – Não significativo em $P < 0,05$; Macro – macroporosidade; Micro – Microporosidade; Ds – Densidade do solo; Uv – Umidade volumétrica; PPC – Pressão de pré-consolidação; IC – Índice de compressibilidade; Kar – Condutividade ao ar; EA – Espaço aéreo; Mic.Vazio – Microporos vazios; Da/Ds – quociente de densidade de agregados pela densidade do solo.

Anexo 4. Correlação de Spearman para todas as variáveis físicas e mecânicas para o Latossolo Bruno Aluminico câmbico

	Macro	Micro	Ds	Uv	PPC	IC	Kar	EA	Da/Ds
Macro	1								
Micro	-0,73	1							
Ds	-0,34	-0,13 ^{ns}	1						
Uv	-0,10 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,42	1					
PPC	-0,16 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,39	0,29 ^{ns}	1				
IC	0,53	-0,52	-0,23 ^{ns}	0,22 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	1			
Kar	0,37	-0,30	-0,27	-0,21 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,39	1		
EA	0,26 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	-0,76	-0,78	-0,46	-0,16 ^{ns}	0,22 ^{ns}	1	
Da/Ds	-0,31	-0,14 ^{ns}	0,86	0,31	0,32	-0,18 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	-0,66	1

^{ns} – Não significativo em $P < 0,05$; Macro – macroporosidade; Micro – Microporosidade; Ds – Densidade do solo; Uv – Umidade volumétrica; PPC – Pressão de pré-consolidação; IC – Índice de compressibilidade; Kar – Condutividade ao ar; EA – Espaço aéreo; Mic.Vazio – Microporos vazios; Da/Ds – quociente de densidade de agregados pela densidade do solo.

Anexo 5. Correlação de Spearman para todas as variáveis físicas e mecânicas para o Latossolo Vermelho Distrófico típico

	Macro	Micro	Ds	Uv	PPC	IC	Kar	EA	Da/Ds
Macro	1								
Micro	-0,25 ^{ns}	1							
Ds	-0,42	-0,13 ^{ns}	1						
Uv	-0,08 ^{ns}	0,44	-0,01 ^{ns}	1					
PPC	-0,13 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,26	1				
IC	0,33	-0,05 ^{ns}	-0,44	0,35	0,12 ^{ns}	1			
Kar	0,12 ^{ns}	-0,19 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	-0,50	-0,001 ^{ns}	-0,34	1		
EA	0,55	-0,24 ^{ns}	-0,26	-0,67	-0,25	-0,09 ^{ns}	0,44	1	
Da/Ds	-0,42	0,14 ^{ns}	0,76	0,43	0,15 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,45	-0,54	1

^{ns} – Não significativo em $P < 0,05$; Macro – macroporosidade; Micro – Microporosidade; Ds – Densidade do solo; Uv – Umidade volumétrica; PPC – Pressão de pré-consolidação; IC – Índice de compressibilidade; Kar – Condutividade ao ar; EA – Espaço aéreo; Mic.Vazio – Microporos vazios; Da/Ds – quociente de densidade de agregados pela densidade do solo.

