

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CARREGAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO E SUA  
RELAÇÃO COM TENSÃO, DEFORMAÇÃO E FLUXOS  
NO SOLO**

**TESE DE DOUTORADO**

**André Anibal Brandt**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2009**

**CARREGAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO E SUA  
RELAÇÃO COM TENSÃO, DEFORMAÇÃO E FLUXOS NO  
SOLO**

por

**André Anibal Brandt**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

**Orientador: Prof. José Miguel Reichert**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2009**

**Brandt, André Anibal**

**B821c**

Carregamento estático e dinâmico e sua relação com tensão, deformação e fluxos no solo / por André Anibal Brandt ; orientador José Miguel Reichert. - Santa Maria, 2009.

162 f. ; il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2009.

1. Engenharia agrícola 2. Tráfego de máquinas  
3. Pressões no solo 4. Fluxos de água e ar I.  
Reichert, José Miguel, orient. II. Título

CDU: 624.131.53

Ficha catalográfica elaborada por  
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

---

© 2009

Todos os direitos autorais reservados a André Anibal Brandt. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser com autorização por escrito do autor.

Endereço: Universidade Federal de Santa Maria/Centro de Ciências Rurais/Departamento de Engenharia Rural/Av. Roraima, n. 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900.

Fone: (0xx) 31 8667-0282; End. Eletr.: andre.brandt@gmail.com

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado

**CARREGAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO E SUA RELAÇÃO COM  
TENSÃO, DEFORMAÇÃO E FLUXOS NO SOLO**

elaborada por  
**André Anibal Brandt**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutor em Engenharia Agrícola**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**José Miguel Reichert, PhD.**  
(Presidente/Orientador)

**Dalvan José Reinert, PhD. (UFSM)**

**Thomé Lovato, Dr. (UFSM)**

**Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki, Dr. (UFPEl)**

**Vanderlei Rodrigues da Silva, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 20 de março de 2009.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela presença constante.

Ao professor José Miguel Reichert, pela orientação, pelos ensinamentos e pela amizade durante a realização deste trabalho.

Ao professor Dalvan José Reinert, pela ajuda no planejamento e execução da primeira coleta.

Ao professor Rainer Horn, pela orientação e pelo apoio no exterior, disponibilizando toda a infraestrutura do Instituto de Nutrição de Plantas e Ciência do Solo da Christian Albrechts Universität zu Kiel (CAU) para realização dos trabalhos na Alemanha e no Brasil.

Aos acadêmicos da CAU, pela amizade, pelo convívio e pela ajuda incondicional nas muitas dificuldades encontradas: Steplan Gebhard, Julia Krueffel, Kristine Fruhner, Peter Hartmann, professores Heine Fleige e Stephan Peth e funcionários Stefan Becker e Jens Rostek.

Ao casal Alexander Zink e Imke Janssen, pelas informações repassadas, as quais facilitaram a minha adaptação, pela estadia em seu apartamento durante os dozes meses da minha permanência na Alemanha e também pela amizade e companheirismo; enfim, não tenho palavras para agradecer tudo o que fizeram por mim – meu MUITO OBRIGADO.

Ao Carlos Arnaldo Streck, por ter me dado inúmeras informações sobre viagem, hábitos, trabalho etc. e sobre o povo alemão.

À Embrapa Trigo, representada pelos pesquisadores Rainoldo Alberto Kochhann e José Eloir Denardin, pelo apoio financeiro, pela área concedida e pelo auxílio e disposição prestados.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão de bolsa para realização do Doutorado e do Estágio de doutoramento no exterior na modalidade “Sandwich”, através do projeto PROBRAL, sob a coordenação do professor José Miguel Reichert.

Aos funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

Ao amigo e funcionário do Laboratório de Física do Solo, Flavio Fontinelli.

A todos os bolsistas da graduação, que colaboraram de alguma forma para que este trabalho fosse concluído, desde a coleta das amostras no campo, assim como nos procedimentos de laboratório.

A todos os colegas de pós-graduação, pela companhia e convívio, pela amizade, por compartilharem os conhecimentos e, principalmente, pela amizade: Douglas Kaiser, Eduardo Suzuki, Adão Corcini, Juliana Prevedello, Eracilda Fontanela, Paulo Gubiani e Marcelo Kunz; enfim, a todos que direta ou indiretamente ajudaram na realização deste trabalho. Um agradecimento em especial ao Paulo e a Eracilda pela ajuda incondicional para a conclusão deste trabalho.

Enfim, agradeço à minha família, que, embora esteja distante, sempre me incentivou na realização deste trabalho.

Um agradecimento especial à minha noiva Jocleita, que, mesmo à distância, esteve presente em cada passo ao longo deste trabalho. Muito Obrigado pela força, inspiração, existência e por nunca ter desistido de mim. AMO VOCÊ!!!

## RESUMO

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria

### **CARREGAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO E SUA RELAÇÃO COM TENSÃO, DEFORMAÇÃO E FLUXOS NO SOLO**

AUTOR: ANDRÉ ANIBAL BRANDT

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 20 de março de 2009.

O aumento do uso dos solos para a produção de alimentos vem causando problemas referentes à compactação nos diversos sistemas de exploração do solo, agrícola, pecuária e florestal. A degradação do solo causada pela compactação muitas vezes pode ser irreversível, sendo um problema mundial que vem se agravando ano após ano, pois as máquinas vêm apresentando aumento de sua massa, mas muitas vezes não têm aumento proporcional da área de contato pneu-solo. Este estudo foi realizado para avaliar as propriedades físicas (densidade, porosidade e permeabilidade ao ar), hídricas (condutividade hidráulica do solo saturado e curva de retenção de água) e mecânicas (compressibilidade, tensão medidas *in situ*) de três solos (Latossolo, Argissolo 1 e Argissolo 2) sob dois usos: Latossolo plantio direto (PD) e mata nativa (MN); e Argissolo 1 e Argissolo 2 PD e campo nativo (CN). Os diferentes tempos de carregamento (7.200 e 600 s) não alteraram a pressão de preconsoidação ( $\sigma_p$ ) nos três solos em quatro camadas (0,00-0,07, 0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m). A  $\sigma_p$  no Latossolo e Argissolo foi maior no plantio direto, em comparação com a mata nativa e o campo nativo, nas camadas de 0,00-0,07, 0,10-0,15 e 0,25-0,30 m, fato esse devido ao tráfego das máquinas agrícolas. Assim, observa-se o sucessivo tráfego de máquinas sobre o solo no plantio direto altera a  $\sigma_p$  em camadas mais profundas. Em teoria, era esperado um efeito em profundidades no Latossolo devido à textura argilosa, em relação ao Argissolo 1 e Argissolo 2, uma vez que solos com maior teor de argila as pressões são transmitidas para profundidades maiores, aumentando desta forma a profundidade de compactação. A permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) e a condutividade hidráulica do solo saturado ( $k_s$ ) foram maiores no Latossolo sob mata nativa, com a maior macroporosidade, em particular na camada superior, onde o secamento não teve efeito sobre a  $k_a$ . A  $k_s$  para o Latossolo sob MN foi de  $754 \text{ mm h}^{-1}$ , sendo esta a maior, e a menor foi de  $3 \text{ mm h}^{-1}$  para o PD na camada superior do solo. As medições das pressões *in situ* foram feitas com o Transdutor de Tensão no Solo (Soil Stress Transducer, SST). As maiores pressões foram medidas quando o tráfego foi realizado com a colhedora no Latossolo na camada de 0,00-0,07 m, e a menor pressão foi no Argissolo 1 na camada de 0,40-0,45 m, como era esperado, pois em solos arenosos as pressões não são transmitidas em maiores profundidades. Esses resultados demonstram que o plantio direto do solo pode ser alterado significativamente pela compactação do solo e que sistemas de manejo adequados devem ser utilizados para manter o equilíbrio das propriedades físicas e fluxos de água e ar no solo.

Palavras-chave: tráfego de máquinas, pressões no solo, fluxos de água e ar.

## ABSTRACT

Doctor Thesis  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria

### STATIC AND DYNAMIC LOADING AND EFFECTS ON STRESS DISTRIBUTION, DEFORMATION AND FLOWS

AUTHOR: ANDRÉ ANIBAL BRANDT

ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Place and date of the defense: Santa Maria, March 20, 2009.

The increased land use for food production is causing problems related to soil compaction in the different systems of land use, agricultural, livestock and forestry. Soil degradation caused by compression can often be irreversible is a global problem that is getting worse year after year, because the machines are showing an increase of its mass, but often have no proportional increase in the area of tire-soil contact. This study was conducted to evaluate the physical properties (density, porosity and air permeability), water (water permeability and soil water retention curve) and mechanical (compressibility, *in situ* stress measures) of three soils (Oxisols, Alfisols 1, and Alfisols 2): Oxisols with crops under no-tillage (NT) and native forest (NF), and Alfisols 1 and Alfisols 2 with crops under no-tillage (NT) and grassland (NG). The different times of loading (7.200 and 600 s) did not affect the preconsolidation pressure ( $\sigma_p$ ) value in three soil layers (0.00-0.07, 0.10-0.15, 0.25-0.30, and 0.40-0.45 m). The  $\sigma_p$  in Oxisols and Alfisols was greater in the no-tillage soil, compared with the native forest and grassland in the layers of 0.00-0.07, 0.10-0.15 and 0.25-0.30 m, due to the traffic of agricultural machines. Thus, successive farm machinery traffic on no-tillage soil affects  $\sigma_p$  to deeper soil layers. In theory, such effect was expected in depth Oxisols, since soils with higher clay content pressure is transmitted to greater depths, thereby increasing the depth of compaction. The soil air permeability ( $k_a$ ) and saturated hydraulic conductivity ( $k_s$ ) were higher in Oxisols under native forest, with the largest macroporosity, especially in the uppermost soil layer, where soil drying had no effect on  $k_a$ . The  $k_s$  for Oxisols under NF was  $754 \text{ mm h}^{-1}$ , which is the largest, whereas the smallest was  $3 \text{ mm h}^{-1}$  in the surface layer of NT. Measurements of pressure were made *in situ* with Soil Stress Transducer, SST. When traffic was conducted with the harvester, the highest pressures were measured in the layer 0.00-0.07 m of the Oxisols, and pressure was lower in the layer 0.40-0.45 m of the Ultisol 1, as expected, because in sandy soils the pressures are not transmitted to greater depths. These results show that the no-tillage of the soil can be affected significantly by soil compaction and that appropriate management systems should be used to maintain a balance of physical properties and flow of water and air in the soil.

Keywords: farm machinery traffic, pressures in soil, water and air permeability

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Solo como um meio poroso. ....	25
FIGURA 2 – Vista geral das prensas (a) e detalhe de uma prensa (b). ....	31
FIGURA 3 - Distribuição em profundidade da pressão de preconsolidação no Latossolo submetido a dois tempos de aplicação das cargas (600 e 7.200 s), na mata nativa (a) e plantio direto (b). ....	34
FIGURA 4 - Exemplo gráfico com intervalos de ciclos de 30 s, com oito ciclos e com uma carga de 200 kPa na compressão e 0 kPa na descompressão. ....	36
FIGURA 5 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 30 s, 200 kPa na compressão e 0 na descompressão) nas quatro camadas avaliadas do Latossolo sob mata nativa e plantio direto, densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em $Mg\ m^{-3}$ . ....	38
FIGURA 6 - Distribuição em profundidade da pressão de preconsolidação no Argissolo 1 submetido a dois tempos de aplicação das cargas (600 e 7.200 s), em quatro camadas, na mata nativa (a) e plantio direto (b). ....	40
FIGURA 7 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 30 s, 200 kPa na compressão e 0 na descompressão) nas quatro camadas avaliadas do Argissolo 1 sob campo nativo e plantio direto, densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em $Mg\ m^{-3}$ . ...	42
FIGURA 8 - Distribuição em profundidade da pressão de preconsolidação no Argissolo 2 submetido a dois tempos de aplicação das cargas (600 e 7.200 s), em quatro camadas, na mata nativa (a) e plantio direto (b). ....	45
FIGURA 9 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 30 s, 200 kPa na compressão e 0 na descompressão) nas quatro camadas avaliadas do Argissolo 2 sob campo nativo e plantio direto, densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em $Mg\ m^{-3}$ . ...	46
FIGURA 10 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 7.200 s, 200 kPa na compressão e 0 na descompressão) em duas camadas avaliadas do Argissolo 2 sob campo nativo e plantio direto densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em $Mg\ m^{-3}$ . ....	47
FIGURA 11 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 30 s, 80 kPa na compressão e 0 na descompressão) em duas camadas avaliadas do Argissolo 2 sob campo nativo e plantio direto, densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em $Mg\ m^{-3}$ . ....	48
FIGURA 12 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 7.200 s, 80 kPa na compressão e 0 na descompressão) em duas camadas avaliadas do Argissolo 2 sob	

campo nativo e plantio direto, densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em $Mg\ m^{-3}$ .....	49
FIGURA 13 - Compressibilidade cíclica (300 ciclos de 30 s, 200 kPa na compressão e 0 na descompressão) em duas camadas avaliadas do Argissolo 2 sob campo nativo e plantio direto densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em $Mg\ m^{-3}$ . ....	50
FIGURA 14 - Equipamento utilizado nas medidas de condutividade ao ar em amostras com estrutura de solo preservada. Fonte: Vossbrink (2005) e adaptado por Brandt (2008). .....	72
FIGURA 15 - Esquema do permeâmetro de carga variável utilizado na determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. ....	75
FIGURA 16 - Relação entre a permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) e a tensão da água no Latossolo, em quatro camadas, sob mata nativa e plantio direto. ....	79
FIGURA 17 - Relação entre o espaço aéreo ( $\varepsilon_a$ ) e a permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) para o Latossolo, em quatro camadas do solo sob plantio direto e mata nativa. ....	80
FIGURA 18 - Condutividade hidráulica saturada ( $k_s$ ) nas quatro camadas avaliadas do Latossolo sob mata nativa e plantio direto. ....	82
FIGURA 19 - Curva característica de água no Latossolo sob mata nativa e plantio direto, em que os símbolos são os valores observados e as linhas os valores ajustados por Van Genuchten, em quatro camadas. ....	83
FIGURA 20 - Relação entre a permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) e a tensão da água no solo para o Argissolo 1, em quatro camadas, sob campo nativo e plantio direto. ....	85
FIGURA 21 - Relação entre o espaço aéreo ( $\varepsilon_a$ ) e a permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) para o Argissolo 1, nas quatro camadas avaliadas, sob plantio direto e campo nativo. ....	86
FIGURA 22 - Condutividade hidráulica do solo saturado ( $k_s$ ) nas quatro camadas do Argissolo 1 sob campo nativo e plantio direto. ....	88
FIGURA 23 - Curva característica de água no Argissolo 1 sob mata nativa e plantio direto, em quatro camadas. ....	89
FIGURA 24 - Relação entre a permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) e a tensão da água no solo para o Argissolo 2, em quatro camadas, sob campo nativo e plantio direto. ....	91
FIGURA 25 - Relação entre o espaço aéreo ( $\varepsilon_a$ ) e permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) para o Argissolo 2, nas quatro camadas avaliadas, sob Plantio Direto e Campo Nativo. ....	92

FIGURA 26 - Condutividade hidráulica de solo saturado ( $k_s$ ) nas quatro camadas do Argissolo 2 sob campo nativo e plantio direto. ....	94
FIGURA 27 - Curva característica de água no Argissolo 2 sob mata nativa e plantio direto, em quatro camadas. ....	95
FIGURA 28 - Direção das tensões agindo sobre um corpo teórico (KÉZDI, 1952). ....	113
FIGURA 29 - Tensão induzida em um elemento do solo através de um ponto de carregamento (KOOLEN; KUIPERS, 1983). ....	116
FIGURA 30 - Linhas isobáricas de pressão (bulbos de pressão), em diferentes fatores de concentração no solo (KÉZDI, 1969). ....	117
FIGURA 31 - Deformação normal (a) e deformação cisalhante (b) (KOOLEN; KUIPERS, 1983). ....	119
FIGURA 32 - Imagem da área de contato pneu-solo com a presença de palha (a) e sem a presença de palha (b) na superfície do solo. ....	125
FIGURA 33 - Área de contato de um pneu com nítida diferença da pressão de contato (modificado por ZIESAK; MATTHIES, 2001). ....	126
FIGURA 34 - Sensor do SST3 e o datalogger analógico. ....	128
FIGURA 35 - Esboço do DTS, em um desenho fora de escala (KÜHNER, 1997). ....	130
FIGURA 36 - Trincheira com a chapa em uma das laterais e escoras (a), e detalhe da instalação dos sensores do SST e do DTS (b). ....	131
FIGURA 37 - Vista geral da montagem do SST, da esfera (rolamento) e do DTS. ....	131
FIGURA 38 - Esquema de instalação dos sensores do SST e do DTS. ....	132
FIGURA 39 - Comportamento das tensões no solo no momento do tráfego com a colhedora, em três profundidades. ....	133
FIGURA 40 - Pressão de preconsolidação antes e após o tráfego da colhedora e distribuição das tensões medidas no transdutor de tensão (SST), em diferentes camadas do Latossolo Vermelho Distrófico típico (UM Passo Fundo) sob plantio direto. ....	135
FIGURA 41 - Pressão de preconsolidação antes do tráfego da colhedora e distribuição das tensões medidas no transdutor de tensão (SST), em duas condições, com palha e sem palha na superfície, em diferentes camadas do Latossolo sob plantio direto, com palha e sem palha na superfície. ....	136
FIGURA 42 - Pressão de preconsolidação antes e após o tráfego da colhedora e distribuição das tensões medidas no transdutor de tensão (SST), em diferentes camadas do Argissolo sob plantio direto. ....	137

FIGURA 43 - Pressão de preconsolidação antes do tráfego da colhedora e distribuição das tensões medidas no transdutor de tensão (SST), em diferentes camadas do Argissolo sob plantio direto, com palha e sem palha na superfície.....	139
FIGURA 44 - Pressão de preconsolidação antes e após o tráfego da colhedora e distribuição das tensões medidas no transdutor de tensão (SST), em diferentes camadas do Argissolo sob campo nativo. ....	140
FIGURA 45 - Pressão de preconsolidação antes do tráfego e distribuição das tensões, medidas no transdutor de tensão (SST), da colhedora com duas pressões internas dos pneus (179 e 103 kPa) no plantio direto (PD) e uma pressão interna do pneu (179 kPa) no campo nativo (CN), em diferentes camadas do Argissolo. ....	142
FIGURA 46 - Pressão de preconsolidação antes do tráfego e distribuição das tensões, medidas no transdutor de tensão (SST), do trator com duas pressões internas dos pneus (145 e 55 kPa) no plantio direto (PD) e uma pressão interna do pneu (145 kPa) no campo nativo (CN), em diferentes camadas do Argissolo. ....	143
FIGURA 47 - Tensão normal, medida no transdutor de tensão (SST), exercida por sete passadas da colhedora com pressão interna do pneu de 103 kPa e com palha na superfície de um Argissolo sob plantio direto. ....	144

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Teores de argila, areia e silte para o Latossolo Vermelho Distrófico típico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (Argissolo 1) e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (Argissolo 2).....	27
TABELA 2 - Especificações das máquinas agrícolas utilizadas no Latossolo e Argissolo 1.....	29
TABELA 3 - Características das máquinas utilizadas no Latossolo e Argissolo 1, calculando-se a área de contato e a pressão exercida .....	30
TABELA 4 - Ciclos de compressão e descompressão aplicados nas amostras.....	31
TABELA 5 - Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, em quatro camadas e nos tratamentos mata nativa (MN) e plantio direto (PD) para o Latossolo.....	39
TABELA 6 - Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, em quatro profundidades e nos tratamentos campo nativo (CN) e plantio direto (PD), para o Argissolo 1 .....	44
TABELA 7 - Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, em quatro profundidades e nos tratamentos campo nativo (CN) e plantio direto (PD), para o Argissolo 2 .....	51
TABELA 8 - Deformação e densidade do solo no ensaio de compressibilidade cíclica para cinco ciclos em um ensaio de 100 ciclos. PD= plantio direto; MN= mata Nativa e CN= campo Nativo.....	56
TABELA 9 - Classes de condutividade hidráulica do solo saturado .....	75
TABELA 10 - Parâmetros de regressão ( $\log M$ e $N$ ) e porosidade obstruída para o Latossolo sob mata nativa e plantio direto, nas quatro camadas.....	81
TABELA 11 - Parâmetros de regressão ( $\log M$ e $N$ ) e porosidade obstruída para o Argissolo 1 sob campo nativo (CN) e plantio direto (PD), nas quatro camadas .....	87
TABELA 12 - Parâmetros de regressão e porosidade obstruída para o Argissolo 2 sob campo nativo (CN) e plantio direto (PD), em quatro camadas .....	93
TABELA 13 - Teores de argila, areia e silte para o Latossolo Vermelho Distrófico típico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico.....	122

TABELA 14 - Condições de umidade e densidade do solo antes do tráfego das máquinas.....	123
TABELA 15 - Ciclos de compressão aplicados nas amostras.....	124
TABELA 16 - Especificações das máquinas agrícolas utilizadas no Latossolo e Argissolo .....	127
TABELA 17 - Pressões exercidas pelas máquinas em cada condição avaliada no campo .....	127
TABELA 18 - Especificações dos diferentes modelos do SST.....	128
TABELA 19 - Máquinas agrícolas e pressão exercida na área de contato pneu-solo para o Latossolo e Argissolo, utilizando-se dois modelos para os cálculos e os valores medidos no campo.....	145

# SUMÁRIO

	PÁGINA
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL ..... 17</b>
<b>2</b>	<b>HIPÓTESES .....21</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVO GERAL .....22</b>
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO 1 - PLANTIO DIRETO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SOLO .....23</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução .....23</b>
<b>4.2</b>	<b>Material e métodos.....26</b>
4.2.1	Solos e Clima ..... 26
4.2.2	Tratamentos e coleta de amostras..... 28
4.2.3	Máquinas utilizadas no manejo das áreas ..... 29
4.2.4	Análises ..... 30
4.2.4.1	Pressão de preconsolidação ..... 30
4.2.4.2	Densidade e porosidade do solo..... 32
4.2.4.3	Densidade de partículas ou densidade real do solo ..... 33
4.2.5	Análise estatística ..... 33
<b>4.3</b>	<b>Resultados.....34</b>
4.3.1	Latossolo..... 34
4.3.1.1	Pressão de preconsolidação ..... 34
4.3.1.2	Compressão cíclica..... 35
4.3.1.3	Densidade e porosidade do solo..... 39
4.3.2	Argissolo 1 ..... 40
4.3.2.1	Pressão de preconsolidação ..... 40
4.3.2.2	Compressão cíclica..... 41
4.3.2.3	Densidade e porosidade do solo..... 43
4.3.3	Argissolo 2 ..... 44
4.3.3.1	Pressão de preconsolidação ..... 44
4.3.3.2	Compressão cíclica..... 45
4.3.3.3	Densidade e porosidade do solo..... 51
<b>4.4</b>	<b>Discussão .....52</b>
4.4.1	Pressão de preconsolidação ..... 52

4.4.2	Compressão cíclica.....	53
4.4.3	Densidade do solo .....	57
<b>4.5</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>59</b>
<b>4.6</b>	<b>Referências.....</b>	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO 2 - INFLUÊNCIA DO USO SOBRE AS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E AR DO SOLO .....</b>	<b>66</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>66</b>
5.1.1	Permeabilidade do solo ao ar .....	66
5.1.2	Condutividade hidráulica do solo saturado .....	67
5.1.3	Curva característica de água no solo.....	69
<b>5.2</b>	<b>Material e métodos.....</b>	<b>71</b>
5.1.4	Condutividade ao ar e hidráulica.....	71
5.1.4.1	Condutividade e permeabilidade do solo ao ar (kl) .....	71
5.1.4.2	Condutividade hidráulica do solo saturado .....	74
5.1.5	Curva característica de água no solo.....	76
5.1.6	Análise estatística .....	76
<b>5.3</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>77</b>
5.1.7	Latossolo.....	77
5.1.7.1	Condutividade e permeabilidade do solo ao ar .....	77
5.1.7.2	Condutividade hidráulica do solo saturado .....	81
5.1.7.3	Curva característica de água do solo.....	83
5.1.8	Argissolo 1 .....	84
5.1.8.1	Condutividade e permeabilidade do solo ao ar .....	84
5.1.8.2	Condutividade hidráulica do solo saturado .....	87
5.1.8.3	Curva característica de água do solo.....	88
5.1.9	Argissolo 2 .....	90
5.1.9.1	Condutividade e permeabilidade do solo ao ar .....	90
5.1.9.2	Condutividade hidráulica do solo saturado .....	93
5.1.9.3	Curva característica de água do solo.....	94
<b>5.4</b>	<b>Discussão .....</b>	<b>96</b>
5.4.1	Condutividade e permeabilidade do solo ao ar .....	96
5.4.2	Condutividade hidráulica do solo saturado ( $k_s$ ).....	98
5.4.3	Curva característica de água do solo.....	99
<b>5.5</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>101</b>

<b>5.6</b>	<b>Referências.....</b>	<b>102</b>
<b>6</b>	<b>CAPÍTULO 3 - CARREGAMENTO DINÂMICO E SUA INFLUÊNCIA NA DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO E DEFORMAÇÃO DO SOLO.....</b>	<b>108</b>
<b>6.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>108</b>
6.1.1	Compactação do solo .....	108
6.1.2	Efeito da cobertura vegetal .....	109
6.1.3	Pressões das máquinas no solo .....	111
6.1.4	Medida das pressões no solo .....	112
6.1.4.1	Conceito da tensão tridimensional .....	113
6.1.4.2	Propagação da tensão no solo .....	116
6.1.4.3	Deformação do solo .....	118
<b>6.2</b>	<b>Material e métodos.....</b>	<b>120</b>
6.1.5	Solos e Clima.....	120
6.1.6	Análises .....	124
6.1.6.1	Pressão de preconsolidação.....	124
6.1.6.2	Pressão de contato pneu-solo .....	124
6.1.6.3	Transdutor de tensão no solo (Soil Stress Transducer, SST).....	127
6.1.6.4	Sistema transdutor de deslocamento (Displacement Transducer System, DTS).....	129
6.1.6.5	Medidas combinadas SST/DTS .....	130
6.1.6.6	Tensões de registro no tráfego da máquina sobre o SST/DTS.....	132
<b>6.3</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>134</b>
6.1.7	Avaliação da pressão exercida pelas máquinas agrícolas com o transdutor de tensão no solo (SST) e da pressão de preconsolidação .....	134
6.1.7.1	Latossolo.....	134
6.1.7.2	Argissolo .....	136
6.1.8	Modelos para cálculo das pressões exercidas pelas máquinas sob o solo em plantio direto .....	144
<b>6.4</b>	<b>Discussão .....</b>	<b>146</b>
6.1.9	SST e pressão de preconsolidação .....	146
6.1.10	Efeito dos resíduos vegetais na superfície do solo .....	148
<b>6.5</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>150</b>
<b>6.2</b>	<b>Referências.....</b>	<b>151</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>160</b>

# 1 INTRODUÇÃO GERAL

O aumento da população mundial e a má distribuição de alimentos têm levado o homem a fazer uso cada vez mais intenso do meio ambiente para atender às necessidades alimentares, devastando os ecossistemas e eliminando, assim, toda a biodiversidade existente; na maioria das vezes, ele passa a cultivar uma única espécie, geralmente a soja, o milho ou a cana-de-açúcar. Toda essa alteração da flora e fauna, geralmente, traz consequências prejudiciais ao ecossistema e ao homem.

O solo é um dos recursos básicos dos ecossistemas naturais e agropecuários. Por ser considerado um recurso finito, frágil e não renovável, a manutenção de sua qualidade tem adquirido importância fundamental nos últimos anos. As propriedades físicas do solo influenciam diretamente o ecossistema e a escolha do melhor manejo a ser adotado nos cultivos agrícolas. O sucesso ou fracasso de projetos agrícolas é dependente das propriedades físicas do solo utilizado. A ocorrência e o crescimento de diferentes espécies vegetais e o movimento de água estão diretamente relacionados às propriedades físicas do solo.

As máquinas e implementos agrícolas modernos e de alta eficiência para a realização das operações agrícolas, fabricados para possibilitar maior capacidade de trabalho, têm como característica o aumento de seu peso total. Contudo, a área de contato pneu-solo nem sempre é corrigida para manter a relação força/área. Em vista disso, as pressões sobre o solo são aumentadas, o que causa a compactação adicional. Como consequência, ocorre redução da qualidade e da capacidade produtiva dos solos, a qual pode comprometer a viabilidade da produção agrícola.

A compactação, tanto em áreas agrícolas como em áreas de pastagem, geralmente ocorre na camada de 0,00 a 0,02 m; em áreas florestais, a compactação pode atingir profundidades maiores. O aumento da compactação dos solos, conseqüentemente, tem aumentado a influência no rendimento das culturas, devido ao manejo reduzido do solo, sendo este manejado com máquinas cada vez maiores e, com isso, aumentando a massa por eixo; ainda, o produtor não tem tomado os devidos cuidados em relação à umidade ideal para a realização das práticas agrícolas. A compactação pode ser benéfica quando for superficial, pois, quando

ocorre a semeadura, há um contato melhor entre semente e solo, ocorrendo assim uma germinação mais rápida; há ainda uma redução da taxa de secamento do solo.

Em um solo com boa fertilidade, estando compactado, as plantas poderão não extrair os nutrientes nele presentes, devido a restrições mecânicas ao crescimento radicular. A compactação diminui a porosidade do solo e, conseqüentemente, a quantidade de oxigênio disponível na rizosfera, o que pode ser limitante no metabolismo das plantas.

Quando o preparo do solo era realizado da maneira convencional, a camada compactada era rompida pelos implementos utilizados no preparo do solo, transferindo assim a compactação para maiores profundidades, em razão do tráfego e contato dos implementos com o solo subsuperficial. Com a intensificação do uso do plantio direto ou em pastagens, não havendo revolvimento, a compactação do solo fica restrita à superfície do solo.

A adoção de plantio direto tem auxiliado na redução da degradação do solo, por conter a erosão. O intenso uso do solo sob plantio direto e, conseqüentemente, o acúmulo sucessivo do tráfego das máquinas agrícolas sobre o solo têm causado distintos graus de compactação; uma maior compactação ocorre nos locais de manobras das máquinas, ou seja, na cabeceira das lavouras, e um grau de compactação menor é observado nas regiões centrais das lavouras. Em áreas onde ocorre o pisoteio de animais, a compactação do solo também é desuniforme, pois os animais não permanecem o mesmo tempo parados sobre toda a área de pastagem.

O efeito da compactação tem influência direta sobre a água no solo, a qual é um componente essencial em todo o ecossistema. Embora a água seja uma das mais simples substâncias químicas presentes no solo, ela possui propriedades únicas, as quais promovem inúmeros processos físicos, químicos e biológicos. Esses processos influenciam praticamente todos os aspectos do desenvolvimento e comportamento do solo, desde o intemperismo à decomposição da matéria orgânica, e do crescimento das plantas à contaminação do lençol freático.

A água gera uma expansão e contração das partículas do solo, a aderência e a formação estrutural dos agregados. Ela está presente em inúmeras reações químicas, liberando ou retendo nutrientes, criando acidez e intemperizando minerais.

Por essas razões, é de extrema importância que o solo tenha uma boa conformação estrutural, isto é, uma estrutura capaz de propiciar adequado suprimento de ar, água e nutrientes, e que seja estável à ação da água. Quando se

tem o rompimento do arranjo estrutural, ocorre uma alteração das condições de aeração e umidade, podendo dessa forma alterar o desenvolvimento das culturas.

O plantio direto, entretanto, possui características que podem ser maximizadas com vistas a reduzir o processo de compactação e suas consequências, como a restrição do crescimento radicular. Destaca-se a contínua adição de resíduos vegetais na superfície, os quais formam uma cobertura morta e enriquecem as camadas superficiais com matéria orgânica. Esses materiais orgânicos podem atuar de duas formas: primeiramente, quando ainda íntegros na superfície do solo, amortecem parte da pressão exercida pelas rodas das máquinas e pelo pisoteio animal; em segundo lugar, a matéria orgânica do solo resultante da decomposição dos resíduos aumenta a elasticidade e a resistência do solo à compactação, como uma consequência do aumento dos limites de umidade em que ele pode ser trabalhado mecanicamente.

Em vista dessas relações, há necessidade de haver critérios para selecionar os equipamentos e os sistemas de produção, bem como o manejo de ambos, visando evitar níveis de compactação elevados ao longo do perfil do solo, que sejam restritivos ao crescimento das culturas.

Muitos pesquisadores sugerem que os indicadores de qualidade do solo deveriam abranger não somente os atributos físicos, mas também químicos e biológicos, incorporando a variabilidade das propriedades, a sensibilidade às variações a longo prazo, ser de fácil determinação e baixo custo, ser utilizados em uma variedade de classes e condições dos solos, além de serem de fácil adaptação aos diversos sistemas. Em relação aos indicadores físicos, os pesquisadores sugerem o uso daqueles que tenham influência direta sobre a produção das culturas, ou seja, que alterem a disponibilidade de ar e água e que ofereçam maior resistência ao crescimento radicular.

Vários atributos são indicadores da qualidade física do solo, como a profundidade efetiva do sistema radicular, a porosidade (distribuição do tamanho e continuidade dos poros), a textura, a densidade do solo, a resistência do solo à penetração das raízes, a infiltração de água e a estabilidade dos agregados.

Quando essas propriedades do solo são modificadas pelo manejo inadequado, ocorre redução da produção, aumento da suscetibilidade do solo à erosão e compactação. Esta última traz consequências, como o aumento da

potência necessária para o preparo do solo e o plantio, principalmente quando este for direto.

O presente estudo tem uma fundamental importância para a manutenção e sustentabilidade dos agroecossistemas, com a ideia de gerar soluções para reduzir o efeito da compactação do solo através do tráfego de máquinas e implementos agrícolas, tanto de manejo do solo como de concepção de máquinas. A compactação dos solos, na maioria das vezes, não recebe tanta importância nos diversos agroecossistemas, em razão de ser um fenômeno que não está à vista das pessoas por estar abaixo da superfície do solo.

Nota-se uma lacuna no estudo da interação dinâmica máquina-solo, particularmente em solos não mobilizados. Tem-se estudado isoladamente a caracterização do solo compactado, a eficiência e o desempenho das máquinas, mas raramente a resposta dinâmica do solo durante o efeito compressivo da máquina em movimento. Este estudo pretende contribuir para o entendimento desses efeitos.

O objetivo deste estudo foi determinar as alterações das propriedades físicas em três solos, Latossolo, Argissolo 1 e Argissolo 2, os quais são manejados sob plantio direto, comparando-se a mata nativa (Latossolo) e o campo nativo (Argissolo 1 e Argissolo 2).

## 2 HIPÓTESES

- (i) Quando os solos são submetidos ao intenso uso agrícola no plantio direto, sem controle das condições de solo e máquinas, eles acabam apresentando uma qualidade física não ideal para o desenvolvimento das plantas.
- (ii) As pressões exercidas pelas máquinas no solo são reduzidas pelo acúmulo de palha na sua superfície, devido ao aumento da área de contato pneu-solo e/ou à absorção de parte da energia gerada pelas máquinas.
- (iii) As pressões são transmitidas em profundidades maiores com o tráfego sucessivo de máquinas sobre o solo.
- (iv) A pressão interna dos pneus influencia a pressão transmitida em profundidade no solo.

### 3 OBJETIVO GERAL

Avaliar as alterações em três solos (Latossolo, Argissolo 1 e Argissolo 2) sob plantio direto, em relação à mata nativa (Latossolo) e campo nativo (Argissolo 1 e Argissolo 2), no tocante a pressão de preconsolidação, fluxos de água e ar, quando o solo é submetido ao tráfego de máquinas, com ensaios em laboratório e determinação da distribuição das pressões exercidas *in situ*.

## 4 CAPÍTULO 1

# PLANTIO DIRETO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SOLO

### 4.1 Introdução

A compactação do solo é definida como o adensamento dos solos pela aplicação de energia mecânica (HOLTZ; KOVACS, 1981). A compactação pode ser considerada do ponto de vista da engenharia civil ou do agrônomo (HILLEL, 1998). Do ponto de vista agrônomo, a compactação é uma consequência da intensa mecanização. Os impactos resultantes desse processo são percebidos pela diminuição da produtividade das culturas; em casos extremos, o solo pode se tornar completamente impeditivo para o crescimento das culturas.

A compactação é um processo pelo qual o solo sofre diminuição do volume, aumento da densidade e mudança estrutural, devido às constantes pressões exercidas pelas máquinas agrícolas e animais. Esses fatores causadores da compactação são elementos que têm preocupado agricultores, fabricantes de máquinas agrícolas e, principalmente, os pesquisadores envolvidos nesses segmentos.

Atendendo à demanda crescente por máquinas agrícolas mais robustas, a indústria reagiu produzindo máquinas agrícolas maiores, o que aumentou o potencial de compactação do solo. Estudos de Bedard et al. (1997), Abu-Hamdeh et al. (1995) e Wood et al. (1990) evidenciaram a relação entre o aumento da compactação do solo e o aumento do peso das máquinas agrícolas.

A sustentabilidade do solo vem sendo muito discutida e, nesse contexto, a compactação do solo representa uma ameaça à agricultura; portanto, deveria ser evitada (HORN et al., 2000, PAGLIAI; JONES 2002). A compactação do solo é

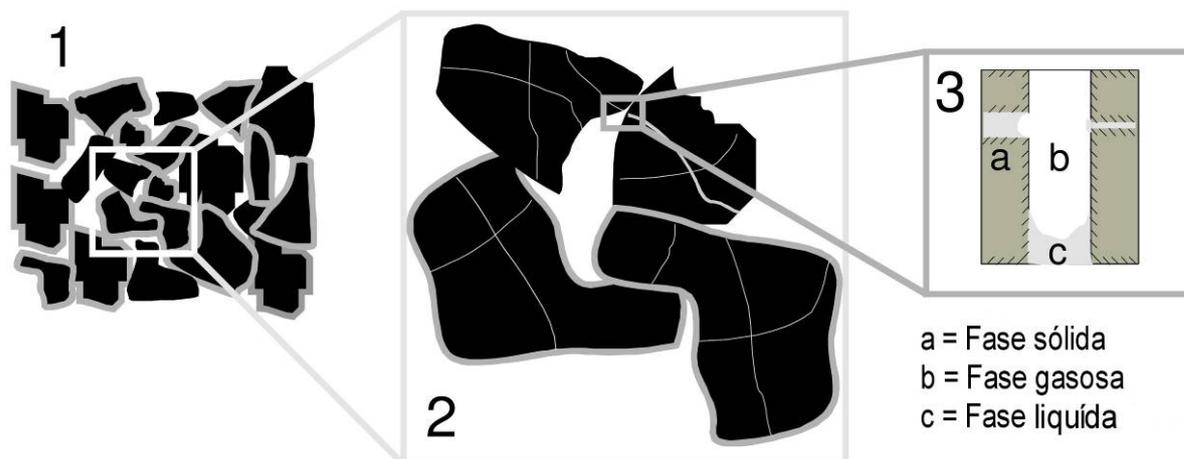
determinante para as relações entre ar, água e temperatura, e esses fatores influenciam diretamente o desenvolvimento das plantas (LETEY, 1985; DA SILVA et al., 1994).

O uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas pode modificar as propriedades do solo. Camadas compactadas subsuperficiais, originadas do intenso tráfego de máquinas e implementos agrícolas, os quais provocam pressões na superfície do solo, têm sido detectadas (MANTOVANI, 1987). Como resultado, ocorre aumento na densidade (MORAES; BENEZ, 1996), modificações na macroestrutura e redução do grau de floculação da argila do solo (PRADO; CENTURION, 2001). Segundo Beltrame e Taylor, (1980) a mecanização intensa é a responsável pela deterioração rápida das condições físicas do solo; o tráfego excessivo, sem o controle das diversas condições do solo, é o principal responsável pela compactação, ocasionada tanto pelo exagerado número de operações, como pelo simples tráfego do trator sobre o solo.

O peso das máquinas e equipamentos e a intensidade de uso do solo tem aumentado. Contudo, não houve aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, e isso têm promovido significativas alterações nas propriedades físicas do solo (STRECK et al., 2004).

Muitos pesquisadores citam que a compactação do solo em superfície, até 0,25 m, está relacionada com a área de contato pneu-solo, enquanto a compactação em profundidade se deve à carga sobre o eixo das máquinas agrícolas (SMITH; DICKSON, 1990). Outros pesquisadores relatam que a compactação do solo, devido ao tráfego sequencial de máquinas agrícolas, é dependente das condições iniciais em que o solo se encontra (SOANE et al., 1981).

O solo é um meio poroso, heterogêneo, trifásico, granuloso e dispersivo, onde o limite do volume das fases sólida, gasosa e líquida pode ser grande (Figura 1).



**Figura 1 - Solo como um meio poroso.**

Fenômenos como adsorção de água e substâncias químicas, troca de íons, adesão, expansão e contração, dispersão, floculação e capilaridade são controlados pela área superficial específica do solo e pelas reações físico-químicas associadas a essa superfície. Esses fatores são ao mesmo tempo o resultado da interação das fases do solo e com os condicionantes da estabilidade estrutural (BEAR, 1972; HILLEL, 1998; SCHEFFER; SCHACHTSCHABEL, 2002). Por conseguinte a estrutura do solo está em constante mudança de acordo com as alterações das fases do solo, as quais são contínuas, assim como o clima e a vegetação; o manejo, resultado das tomadas de decisão, controla a intensidade dessas mudanças e suas consequências (HILLEL, 1998).

O objetivo deste estudo foi avaliar propriedades físicas e mecânicas de três solos (Latosolo, Argissolo 1 e Argissolo 2), sob dois usos: plantio direto, mata nativa e/ou campo nativo.

## 4.2 Material e métodos

### 4.2.1 Solos e Clima

Os experimentos foram conduzidos em três solos distintos:

- 1<sup>o</sup>) Argiloso: Latossolo Vermelho Distrófico típico (SANTOS et al., 2006) e, pela classificação regional do solo (BRASIL, 1973; STRECK et al., 2008), unidade de mapeamento (UM) Passo Fundo, localizado na área experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Trigo, no município de Passo Fundo, na região fisiográfica do Planalto Médio do Estado do Rio Grande do Sul, com latitude 28°10'00" sul, longitude 52°19'00" oeste e altitude de aproximadamente 650 metros. Caracteriza-se pela ocorrência de precipitação pluvial mínima de 60 mm mensais, distribuída ao longo de todos os meses do ano (NIMER, 1989); o clima da região enquadra-se nas zonas "Cfa" e "Cfb" da classificação de Köppen.
- 2<sup>o</sup>) Arenoso: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (SANTOS et al., 2006) e, pela classificação regional do solo (BRASIL, 1973; STRECK et al., 2002), unidade de mapeamento (UM) São Pedro, aqui denominado Argissolo 1, localizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, no município de Santa Maria, na região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, com latitude 29°41'00" sul, longitude 53°48'00" oeste e altitude de 95 metros aproximadamente. O clima da região enquadra-se na classificação "Cfa" de Köppen, clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, e a temperatura do mês mais frio entre -3°C e 18°C (MORENO 1961).
- 3<sup>o</sup>) Arenoso: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (SANTOS et al., 2006) aqui denominado Argissolo 2, localizado no município de São Francisco de Assis, na região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul. As coordenadas geográficas do local são 29°34'00" de latitude sul, 55°07'00" de longitude oeste e 95 metros de altitude, aproximadamente. O clima da região enquadra-se na classificação anterior.

A determinação da granulometria dos solos estudados foi feita conforme o método Embrapa (1997), em que foram utilizadas três repetições para cada camada. Os teores de argila, areia e silte estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Teores de argila, areia e silte para o Latossolo Vermelho Distrófico típico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (Argissolo 1) e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (Argissolo 2)**

<b>Local e uso <sup>(1)</sup></b>	<b>Argila</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>
	----- g kg <sup>-1</sup> -----		
<b>Camada de 0,00-0,07 m</b>			
<b>PF_MN</b>	450	349	201
<b>PF_PD</b>	451	348	201
<b>SM_CN</b>	83	635	282
<b>SM_PD</b>	101	629	270
<b>SFA_CN</b>	78	882	40
<b>SFA_PD</b>	112	793	95
<b>Camada de 0,10-0,15 m</b>			
<b>PF_MN</b>	619	210	171
<b>PF_PD</b>	477	325	198
<b>SM_CN</b>	72	632	296
<b>SM_PD</b>	86	621	293
<b>SFA_CN</b>	76	875	49
<b>SFA_PD</b>	139	788	73
<b>Camada de 0,25-0,30 m</b>			
<b>PF_MN</b>	566	249	185
<b>PF_PD</b>	567	352	81
<b>SM_CN</b>	86	626	288
<b>SM_PD</b>	99	610	291
<b>SFA_CN</b>	117	825	58
<b>SFA_PD</b>	177	738	85
<b>Camada de 0,40-0,45 m</b>			
<b>PF_MN</b>	472	323	205
<b>PF_PD</b>	557	279	164
<b>SM_CN</b>	78	596	326
<b>SM_PD</b>	107	574	319
<b>SFA_CN</b>	128	793	79
<b>SFA_PD</b>	184	710	106

<sup>(1)</sup> PF = Passo Fundo (Latosolo); SM = Santa Maria (Argissolo 1); SFA = São Francisco de Assis (Argissolo 2); MN = Mata Nativa; PD = Plantio Direto; e CN = Campo Nativo.

#### 4.2.2 Tratamentos e coleta de amostras

Os tratamentos foram constituídos pelos locais e usos apresentados na Tabela 1. As coletas foram realizadas em novembro de 2005 nos três distintos solos. Em cada tratamento, as amostras foram coletadas em um único ponto no campo. Essa metodologia de coleta foi usada seguindo os padrões do grupo da Universidade de Kiel (Alemanha) e em função do curto período de permanência dos pesquisadores alemães no Brasil para auxílio nas coletas. Em cada ponto e camada (Tabela 1) foi coletado um conjunto de amostras (variável dependendo do local), que constituíram as repetições do tratamento. Para cada análise foi utilizada parte desse conjunto de amostras. Portanto, para cada análise será apresentado o número de amostras utilizadas (n).

No Latossolo foram coletadas amostras em áreas sob mata nativa (MN) e plantio direto (PD). No Argissolo 1 e no Argissolo 2, as amostras foram coletadas em áreas sob campo nativo (CN) e PD. Em todos os locais, o PD havia sido implantado há 14 anos. A condição de uso da lavoura representa as práticas culturais e de manejo, características do sistema de PD adotado em cada região. No Latossolo, durante o inverno, a área de PD é cultivada com trigo e durante o verão com soja e milho. No Argissolo 1 e Argissolo 2 na área do PD durante o verão é cultivado soja, e no inverno o solo fica coberto com aveia e azevém, os quais são dessecados para implantação da próxima safra de soja. A MN no Latossolo não sofreu cargas externas geradas pelos animais e/ou máquinas agrícolas. O CN no Argissolo 1 e Argissolo 2 recebia esporadicamente o pisoteio de animais.

Para os ensaios de compressibilidade e para a determinação da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), foram usados anéis com 0,10 m de diâmetro interno e 0,03 m de altura para a coleta das amostras com estrutura preservada. Para a determinação da densidade, da macroporosidade, da microporosidade e da porosidade total, foram coletadas amostras com estrutura preservada em anéis com 0,058 m de diâmetro interno e 0,04 m de altura. Os cilindros de solo foram coletados a partir do limite superior de cada camada, com exceção da camada de 0,00-0,07 m, onde foi retirada uma camada superficial de aproximadamente 0,02 m e, a partir daí, coletados os cilindros de solo, sendo as demais camadas de coleta de 0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m. Amostras de solo com estrutura não preservada para as análises de densidade de partículas e granulometria foram coletadas nessas mesmas camadas.

#### 4.2.3 Máquinas utilizadas no manejo das áreas

Na Tabela 2 são apresentadas as especificações das máquinas usadas no manejo das áreas com plantio direto e, na Tabela 3, as pressões e a área de contato pneu-solo. O trator MF 265 - 4x2 utilizado no tráfego no Latossolo estava com lastros de ferro e água nos pneus traseiros. Para o Argissolo 2, as máquinas não foram especificadas, pois o proprietário da fazenda utilizava diversas máquinas, as quais foram substituídas nos últimos anos, não sendo possível sua caracterização.

**Tabela 2 - Especificações das máquinas agrícolas utilizadas no Latossolo e Argissolo 1**

Máquina <sup>(1)</sup>	Tipo de pneu	Massa, Mg
<b>Latossolo</b>		
Colhedora MF 3640	18.4-26 R1	7,83
Trator MF 265 - 4x2	14.9-28 R1	4,08
<b>Argissolo 1</b>		
Colhedora MF 3640	23.1-26 R2	7,83
Trator MF 275 - 4x2	18.4-30 PD22	3,76

<sup>(1)</sup> Máquinas utilizadas na implantação, manejo e colheita das culturas.

A área de contato teórica foi calculada com base na equação desenvolvida por Inns; Kilgour (1978):

$$A = 0,87 \cdot L \cdot 0,31 \cdot Dt \quad [1]$$

em que:

$A$  = área de contato pneu solo,  $\text{cm}^2$ ;

$L$  = largura do pneu, cm;

$Dt$  = diâmetro total do pneu, cm.

A pressão exercida pelo pneu sobre a superfície do solo foi calculada com a equação desenvolvida por Wasterlund (1994):

$$p_c = \frac{W}{A} \cdot 98,07 \quad [2]$$

Em que:

$p_c$  = pressão pneu-solo, kPa;

$W$  = massa do trator sobre o pneu, kg;

$A$  = área de contato pneu-solo,  $\text{cm}^2$ .

**Tabela 3 - Características das máquinas utilizadas no Latossolo e Argissolo 1, calculando-se a área de contato e a pressão exercida**

<b>Latossolo</b>			
Trator		Colhedora	
Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
<b>Pressão interna do pneu, kPa</b>			
300	150	150	300
<b>Área de contato pneu-solo, m<sup>2</sup></b>			
0,044	0,140	0,183	0,054
<b>Pressão exercida no solo, kPa</b>			
59,8	123,7	168,6	141,8
<b>Argissolo 1</b>			
<b>Pressão interna do pneu, kPa</b>			
300	150	180	300
<b>Área de contato pneu-solo, m<sup>2</sup></b>			
0,044	0,189	0,263	0,098
<b>Pressão exercida no solo, kPa</b>			
30,5	89,7	120,6	67,7

#### 4.2.4 Análises

##### 4.2.4.1 Pressão de preconsolidação

As amostras foram saturadas por um período de 24 horas e, em seguida, colocadas sobre placas porosas de cerâmica e náilon, nas quais foi aplicada uma tensão de 30 kPa. Sob essa tensão, as amostras do Latossolo permaneceram durante 12 dias, e as amostras do Argissolo 1 e do Argissolo 2, por sete dias. Essa diferença de tempo para o equilíbrio da tensão da água nas amostras se deve ao fato de o solo argiloso reter mais a água e, conseqüentemente, necessitar de mais tempo para atingir o equilíbrio. Depois de equilibradas, as amostras foram pesadas e submetidas à análise com os diferentes ciclos de compressão (Tabela 4). Para cada uso e camada de solo, foram feitas três repetições de laboratório.

**Tabela 4 - Ciclos de compressão e descompressão aplicados nas amostras**

Solo	Cargas aplicadas (kPa)	Tempo de carga (s)
<b>Compressibilidade estática</b>		
Latossolo, Argissolo 1 e Argissolo 2	20, 30, 40, 50, 70, 100 120, 150, 200, 300, 400	600 e 7.200
<b>Compressibilidade cíclica</b>		
Latossolo, Argissolo 1 e Argissolo 2	200	30 (100 ciclos)
	80	30 (100 ciclos)
Argissolo 2	80 e 200	120 (100 ciclos)
	200	30 (300 ciclos)

Os ensaios para obtenção da  $\sigma_p$  foram realizados com o auxílio de prensas automatizadas, as quais foram construídas pelo grupo de pesquisadores da Universidade de Kiel (ROSTEK et al., 2006). A  $\sigma_p$  foi determinada conforme metodologia de Casagrande (HOLTZ; KOVACS, 1981), de forma manual, sem auxílio de software.

Com o sistema desenvolvido por Rostek et al. (2006), é possível a aquisição dos dados eletronicamente, com o auxílio de um computador e um datalogger. Em cada carga aplicada, os dados de tensão de água na amostra, de deformação e de carga aplicada são armazenados (Figura 2 a,b).



**Figura 2 – Vista geral das prensas (a) e detalhe de uma prensa (b).**

#### 4.2.4.2 Densidade e porosidade do solo

As determinações da densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo foram feitas nas amostras utilizadas para determinação da curva característica de água no solo. Para a determinação de macroporosidade e microporosidade, as amostras foram submetidas à tensão de 6 kPa em coluna de areia.

Nos cálculos da densidade e porosidade foram utilizadas as seguintes equações:

Densidade do solo ( $D_s$ )

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V} \quad [3]$$

em que:

$D_s$  = densidade do solo, Mg m<sup>3</sup>;

$M_{ss}$  = massa de solo seco em estufa a 105 °C, g; e

$V$  = volume do cilindro, cm<sup>3</sup>.

Porosidade total do solo ( $P_t$ )

$$P_t = 1 - \left( \frac{D_s}{D_p} \right) \quad [4]$$

sendo:

$P_t$  = porosidade total, cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;

$D_s$  = densidade do solo, Mg m<sup>3</sup>; e

$D_p$  = densidade de partículas, Mg m<sup>3</sup>.

Microporosidade do solo ( $mp$ )

$$mp = \frac{M_{su6} - M_{ss}}{V} \quad [5]$$

em que:

$mp$  = microporosidade, cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;

$M_{su6}$  = massa de solo úmido na tensão de 6 kPa, g;

$M_{ss}$  = massa de solo seco em estufa a 105°, g; e

$V$  = volume do cilindro, cm<sup>3</sup>.

Macroporosidade do solo ( $Mp$ )

$$Mp = Pt - mp \quad [6]$$

em que:

$Mp$  = macroporosidade,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$Pt$  = porosidade total,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; e

$mp$  = microporosidade,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

#### 4.2.4.3 Densidade de partículas ou densidade real do solo

A densidade de partículas ou densidade real do solo foi determinada pelo método do balão volumétrico modificado (Gubiani et al., 2006) e calculada pela equação:

$$Dp = \frac{PB + S - PB}{50 - \left( \frac{PB + S + A - (PB + S)}{DA} \right)} \quad [7]$$

sendo:

$Dp$  = densidade de partículas,  $\text{Mg m}^3$ ;

$PB$  = peso do balão, g;

$S$  = peso do solo, g;

$A$  = peso do álcool, g; e

$DA$  = densidade do álcool,  $\text{Mg m}^3$ .

#### 4.2.5 Análise estatística

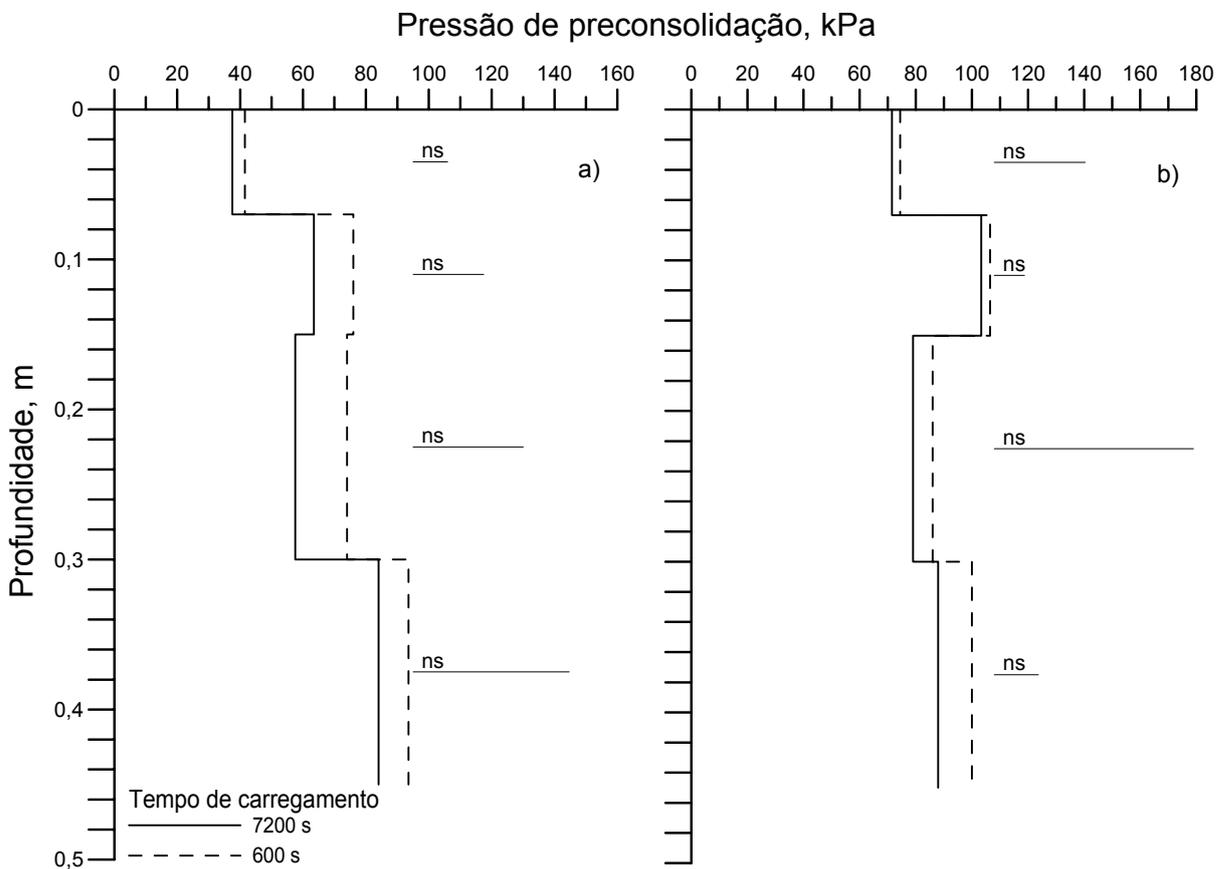
Na análise estatística foi utilizado o pacote estatístico SAS, onde foi feita a análise de variância e o teste de comparação de médias pela diferença mínima significativa (DMS), considerando 5% de significância.

## 4.3 Resultados

### 4.3.1 Latossolo

#### 4.3.1.1 Pressão de preconsolidação

A pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), nos dois diferentes tempos de carregamento, para o Latossolo sob mata nativa (MN) e plantio direto (PD) é apresentada na Figura 3.



**Figura 3 - Distribuição em profundidade da pressão de preconsolidação no Latossolo submetido a dois tempos de aplicação das cargas (600 e 7.200 s), na mata nativa (a) e plantio direto (b).**

As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa pelo teste DMS (5%) e comparam as médias dos tempos de carregamento em cada camada. \* = diferença significativa; ns = diferença não significativa.

Os diferentes tempos de aplicação das cargas (600 ou 7.200 s) não tiveram efeito significativo no aumento da  $\sigma_p$ . As pressões de preconsolidação foram

menores em todas as camadas quando o tempo de carregamento de cada pressão foi de 7.200 s. Isso se deve ao fato de que o solo, ficando mais tempo sob a carga, se deforma mais. Com isso, há um deslocamento para baixo da curva de compressão e uma conseqüente redução no espaço poroso do solo. Na prática, isso mostra que operações agrícolas realizadas com uma velocidade maior compactam menos, pois as máquinas ficam menos tempo comprimindo o solo, reduzindo assim a deformação.

No solo sob uso da MN a  $\sigma_p$  foi menor em todas as camadas, comparada à  $\sigma_p$  no PD. Isso porque a área com MN nunca sofreu cargas adicionais de máquinas agrícolas e/ou animais e, por conseguinte, a  $\sigma_p$  é mais elevada na camada (0,40-0,45 m) que na superfície. Ao contrário, no solo sob PD a ocorrência dos maiores valores de  $\sigma_p$  na superfície (camada de 0,10-0,15 m) evidencia o efeito do tráfego de máquinas e animais.

A  $\sigma_p$  na camada de 0,10-0,15 m do PD foi bem superior à das demais, mostrando que ela é a mais afetada pelo tráfego de máquinas. Na camada de 0,25-0,30 m também foi observado incremento na  $\sigma_p$  no solo sob plantio direto em relação à  $\sigma_p$  do solo sob mata nativa, mas não tão acentuado como na camada superior. A camada de 0,40-0,45 m foi a menos alterada, pois nela as pressões de preconsolidação são semelhantes tanto no solo sob plantio direto quanto naquele sob mata nativa.

#### 4.3.1.2 Compressão cíclica

A compressibilidade cíclica pode ser definida como a aplicação de cargas cíclicas a uma frequência constante de carga e descarga, com um tempo predefinido.

A determinação da pressão de preconsolidação sob a aplicação de cargas estáticas pode não ser semelhante o bastante com as condições de campo, onde o solo sofre repetidamente carregamento/descarregamento por um curto período de tempo ou, ainda, recargas com elevado número de cargas ao longo do tempo. Essas condições são carregamentos dinâmicos, por exemplo, passadas múltiplas de máquinas ou em pastagens devido ao pisoteio dos animais.

Um exemplo típico de um gráfico de deformação e variação da tensão da água no solo, no decorrer do tempo, resultante da análise de compressibilidade

cíclica, é apresentado na Figura 4. Essa figura tem por finalidade apenas ilustrar o comportamento da deformação e da tensão da água na amostra. Os demais resultados serão apresentados, na sequência, com o tempo sendo representado pelo número de ciclos de compressão/descompressão.

O gráfico mostra que logo após a primeira carga ser aplicada (carga 200 kPa) ocorre grande deformação; nos ciclos seguintes, o incremento de deformação vai reduzindo gradativamente a cada ciclo de compressão/descompressão. Percebe-se que a tensão da água na amostra varia inversamente com a carga, ou seja, aumenta e diminui, respectivamente com a compressão e descompressão. Quando a tensão da água na amostra chega aos extremos, na compressão/descompressão, ela lentamente volta à tensão inicial ou próxima a ela. Quando a amostra é comprimida ou descomprimida num ciclo subsequente, a tensão da água também diminui gradativamente em relação à tensão do ciclo anterior (Figura 4).

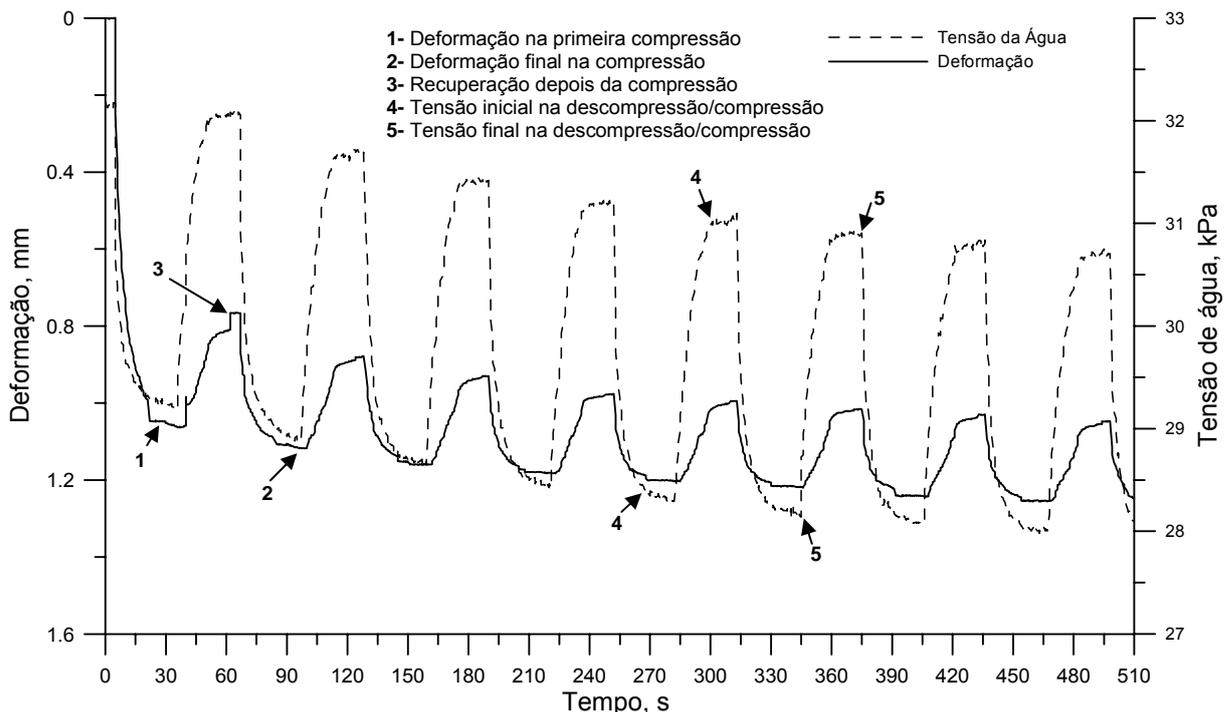


Figura 4 - Exemplo gráfico com intervalos de ciclos de 30 s, com oito ciclos e com uma carga de 200 kPa na compressão e 0 kPa na descompressão.

A compressibilidade cíclica, com intervalos para cada ciclo de 30 s (compressão/descompressão), com 100 ciclos, sendo a carga de compressão de 200 kPa e a de descompressão de 0 kPa, para o Latossolo com uso de MN e PD é apresentada na Figura 5. Os dados da tensão da água na

compressão/descompressão e das tensões máxima e mínima não estão plotados em sua totalidade, a fim de facilitar a visualização nos gráficos.

Observou-se que em todas as camadas a tensão da água nas amostras do solo diminui com o aumento de ciclos de compressão e descompressão, devido a uma redução do volume da amostra de solo, ou seja, uma diminuição da porosidade total.

Na área sob MN, o comportamento das curvas de compressão/descompressão e das tensões máximas e mínimas é semelhante em todas as camadas. A tensão da água no solo no início da aplicação da carga não teve variação elevada quanto a deformação que ocorreu nos primeiros ciclos de compressão/descompressão. É visível a grande deformação do solo nos primeiros ciclos (cinco ciclos); depois disso a deformação é mais lenta, praticamente imperceptível.

Na camada de 0,00-0,07 m, observa-se que ocorreu deformação acentuada (6,5 mm) na primeira carga aplicada. Isso pode ter ocorrido em razão da baixa densidade inicial ( $D_{s_i}$ ), que era de  $0,97 \text{ Mg m}^{-3}$ . Após os 100 ciclos de compressão/descompressão a densidade final ( $D_{s_f}$ ) foi de  $1,29 \text{ Mg m}^{-3}$ , um incremento de 33% na densidade do solo ( $D_s$ ).

Nas camadas de 0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m, a deformação, quando na aplicação da primeira carga, foi menor (3,0 mm). Nessas camadas o incremento da  $D_{s_i}$  ( $1,08$ ,  $1,09$  e  $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ ) não foi tão acentuado, sendo os valores da  $D_{s_f}$  de  $1,27$ ,  $1,30$  e  $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ , com incremento de 18, 19 e 12%, respectivamente.

Nas amostras coletadas na área de PD, a deformação foi menor em relação ao MN nas três primeiras camadas e praticamente igual na última camada.

A deformação do solo sob PD, de maneira geral, foi semelhante em todas as camadas, e a  $D_s$  teve incremento médio de 12%. Na Figura 5 pode-se observar esse comportamento.

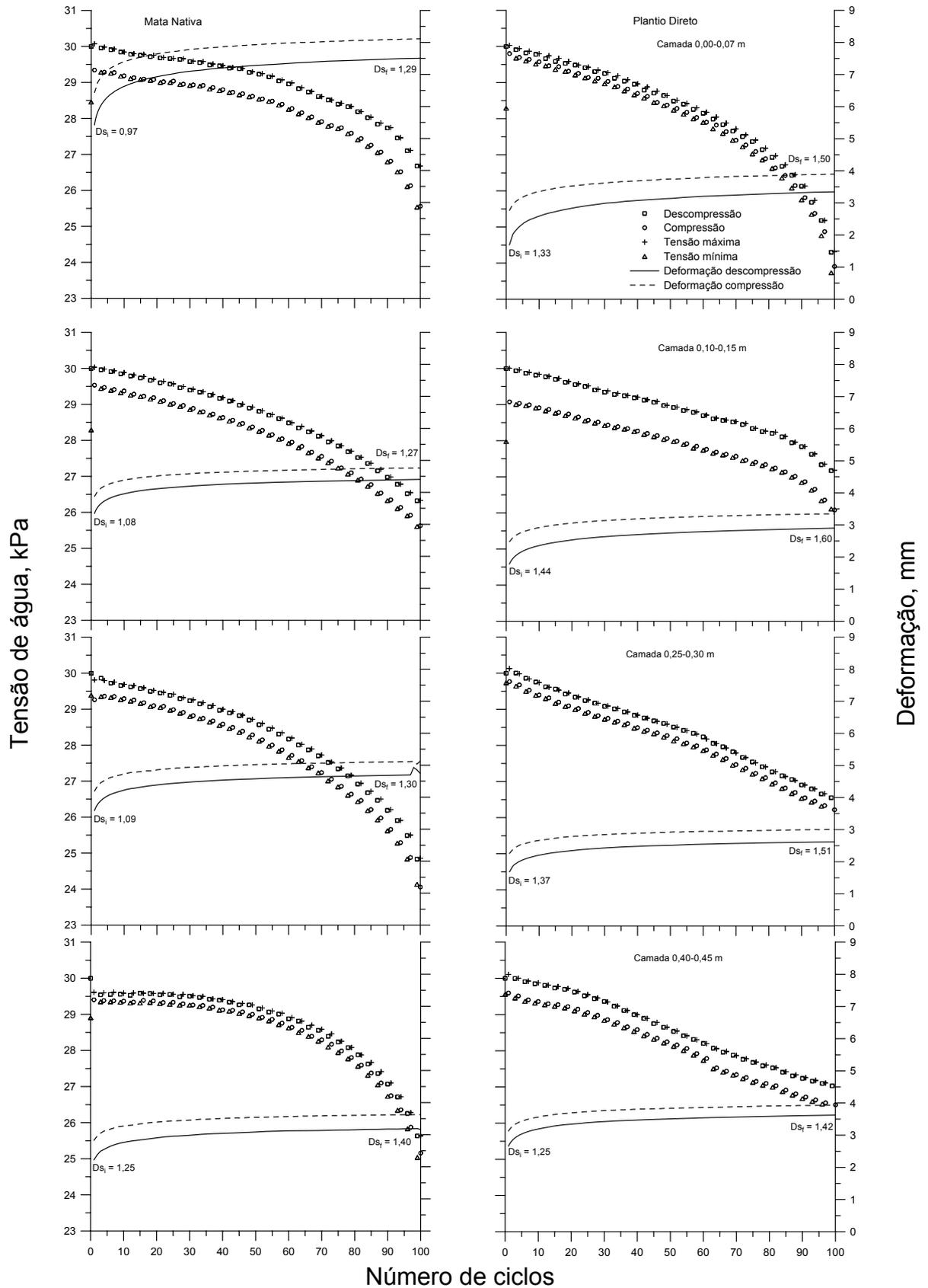


Figura 5 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 30 s, 200 kPa na compressão e 0 na descompressão) nas quatro camadas avaliadas do Latossolo sob mata nativa e plantio direto, densidade inicial ( $D_{si}$ ) e densidade final ( $D_{sf}$ ), em  $Mg\ m^{-3}$ .

#### 4.3.1.3 Densidade e porosidade do solo

Na Tabela 5 são apresentados os dados de densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total. Nas camadas de 0,00-0,07, 0,10-0,15 e 0,25-0,30 m, a densidade foi significativamente menor na MN, o que era esperado, pois, como esta nunca sofreu cargas externas, a sua densidade é menor.

Em relação à macroporosidade, os usos MN e PD diferiram significativamente em todas as camadas. A macroporosidade na MN foi maior nas camadas de 0,00-0,07, 0,10-0,15 e 0,25-0,30 m, o que se deve ao fato de não ter havido tráfego de máquinas e por ser melhor estruturado. Na camada de 0,40-0,45 m, o maior valor encontrado foi no solo sob PD, fato esse que poder estar relacionado a algum bioporo.

As microporosidades, em todas as camadas, foram significativamente diferentes; o maior número de microporos foi encontrado na MN, o que não está coerente, pois, como não há tráfego de máquinas, não ocorre diminuição da macroporosidade e consequente aumento da microporosidade.

**Tabela 5 - Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, em quatro camadas e nos tratamentos mata nativa (MN) e plantio direto (PD) para o Latossolo**

Tratamento	Densidade	Macroporosidade	Microporosidade	Porosidade Total
	Mg m <sup>3</sup>	----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----		
<b>Camada de 0,00-0,07 m</b>				
<b>MN</b>	0,84 b	0,28 a	0,41 a	0,68 a
<b>PD</b>	1,41 a	0,12 b	0,35 b	0,47 b
<b>Camada de 0,10-0,15 m</b>				
<b>MN</b>	1,06 b	0,16 a	0,44 a	0,60 a
<b>PD</b>	1,43 a	0,12 b	0,34 b	0,46 b
<b>Camada de 0,25-0,30 m</b>				
<b>MN</b>	1,10 b	0,14 a	0,45 a	0,58 a
<b>PD</b>	1,40 a	0,10 b	0,37 b	0,47 b
<b>Camada de 0,40-0,45 m</b>				
<b>MN</b>	1,23 a	0,09 b	0,44 a	0,54 a
<b>PD</b>	1,27 a	0,13 a	0,39 b	0,52 a

Em cada camada, as médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de DMS (5%).

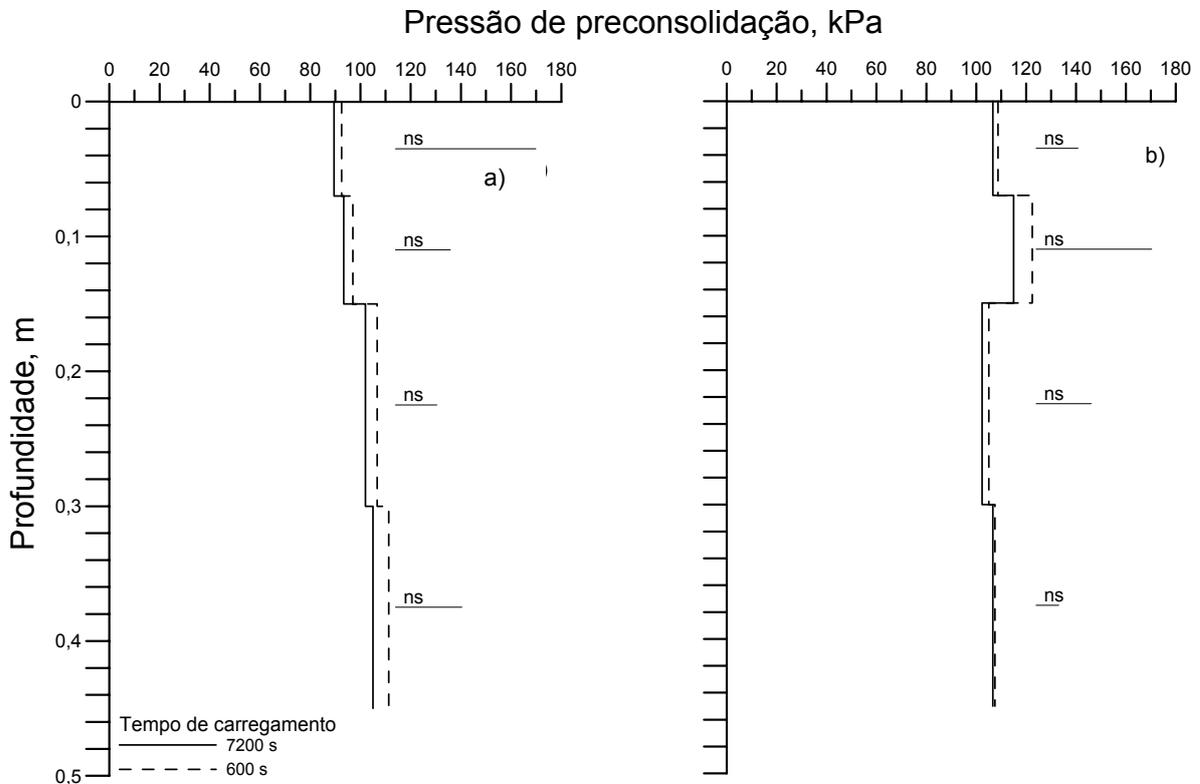
A porosidade total foi significativamente diferente nas camadas de 0,00-0,07, 0,10-0,15 e 0,25-0,30 m. A maior porosidade total foi observada na MN, devido à não ocorrência de tráfego de máquinas agrícolas e ao pisoteio de animais domésticos. Na camada de 0,40-0,45 m, a porosidade total não diferiu significativamente, mostrando que o tráfego das máquinas na área não altera a porosidade total em maiores profundidades.

#### 4.3.2 Argissolo 1

#### 4.3.3 Pressão de preconsolidação

Na Figura 6 estão apresentados os valores das pressões de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) para o Argissolo 1, sob campo nativo e plantio direto.

Como já observado no Latossolo, também no Argissolo 1 não houve diferença na  $\sigma_p$  entre os diferentes tempos de aplicação das cargas. No solo sob campo nativo houve incremento da  $\sigma_p$  com o aumento da profundidade.



**Figura 6 - Distribuição em profundidade da pressão de preconsolidação no Argissolo 1 submetido a dois tempos de aplicação das cargas (600 e 7.200 s), em quatro camadas, na mata nativa (a) e plantio direto (b).**

As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa pelo teste DMS (5%) de e comparam as médias dos tempos de carregamento em cada camada. \* = diferença significativa; ns = diferença não significativa.

Na camada de 0,00-0,07, a pressão de preconsolidação teve um incremento de aproximadamente de 17 kPa no solo sob plantio direto, em relação ao solo sob campo nativo, e na camada de 0,10-0,15 o incremento foi ainda maior, em torno de 22 kPa, mostrando que o tráfego de máquinas agrícolas sobre o solo aumenta a  $\sigma_p$ . Nas camadas de 0,25-0,30 e de 0,40-0,45 esse incremento é quase inexistente, o que mostra que as máquinas que trafegam nessa área não causam compactação em profundidades maiores do que 0,15 m.

#### 4.3.3.1 Compressão cíclica

A deformação, com intervalos de 30 s para cada ciclo, com 100 ciclos, sendo a carga de compressão de 200 kPa e a de descompressão de 0 kPa, e a tensão para o Argissolo 1 sob CN e PD são apresentadas na Figura 7.

Em todas as camadas no solo sob CN, ocorreu uma deformação rápida nos primeiros 20 ciclos de compressão/descompressão; após essa deformação inicial, a deformação pouco variou. Em razão disso, a tensão de água no solo teve comportamento semelhante, com rápida diminuição inicial e, após, não ocorrendo maiores deformações nos ciclos seguintes.

Ao final dos testes, a  $D_s$  do solo sob CN pouco aumentou, mas foi de maneira crescente em profundidade, o que pode ter ocorrido devido ao pisoteio esporádico de bovinos; dessa forma, o solo já sofreu cargas externas, apresentando assim aumento da  $D_s$ . A  $D_s$  na camada de 0,00-0,07 m teve um incremento de 5% (de 1,61 para 1,69  $\text{Mg m}^{-3}$ ). Na segunda camada (0,10-0,15 m) o aumento da  $D_s$  foi de 6% (de 1,52 para 1,61  $\text{Mg m}^{-3}$ ). Nas camadas de 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m esse aumento foi de 8% (de 1,50 e 1,53, respectivamente, para 1,62 e 1,65).

No solo sob PD, a tensão de água na camada de 0,00-0,07 m teve uma variação elevada e também uma diferença grande entre a tensão da água na compressão e na descompressão. Esse comportamento pode ser em função da maior quantidade de matéria orgânica na superfície do solo. Nas camadas de 0,10-0,15 e 0,25-30 m o comportamento da tensão de água foi semelhante: houve grande diminuição inicial nos primeiros 20 ciclos e, após, praticamente se manteve constante. Na quarta camada (0,40-0,45 m) a tensão da água apresentou comportamento diferente do das demais. No início da aplicação do ciclo de carregamento, a tensão permaneceu praticamente constante. No final do ciclo de compressão/descompressão a tensão diminuiu um pouco.

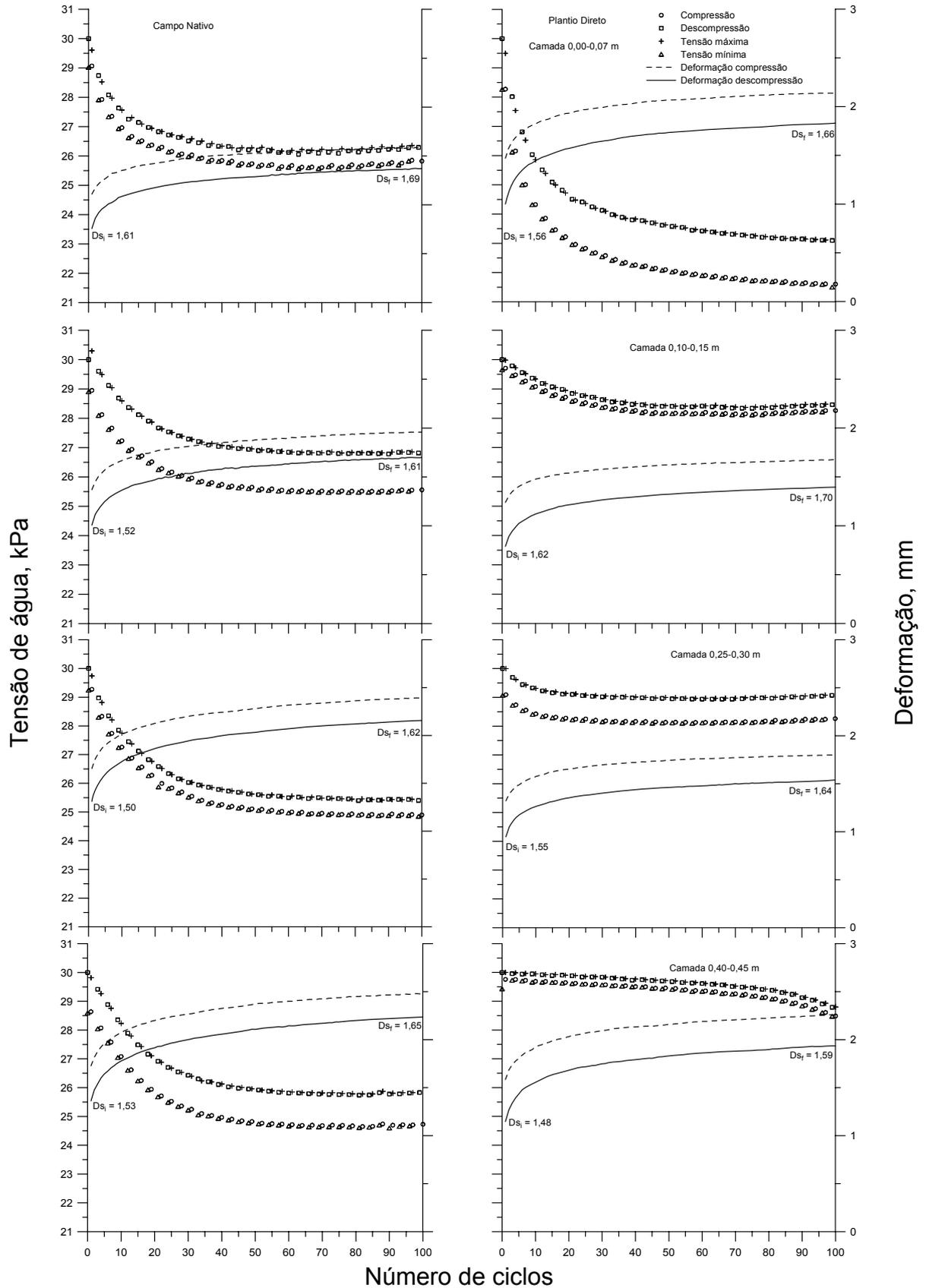


Figura 7 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 30 s, 200 kPa na compressão e 0 na decompressão) nas quatro camadas avaliadas do Argissolo 1 sob campo nativo e plantio direto, densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em  $Mg\ m^{-3}$ .

#### 4.3.3.2 Densidade e porosidade do solo

A densidade do solo não apresentou diferença significativa nas camadas de 0,00-0,07 e 0,40-0,45 m (Tabela 6), embora se esperasse que no CN a densidade fosse menor que no PD, pelo fato de que este apresenta tráfego de máquinas agrícolas; contudo, além do tráfego nesta camada, há palha, raízes, matéria orgânica e a ação dos órgãos ativos das semeadoras, entre outros fatores. Na camada de 0,10-0,15 m, no PD, foi encontrado o maior valor de densidade, a qual diferiu do CN. Essa maior densidade se deve ao fato de que é nesta camada que ocorre o maior acúmulo das tensões exercidas pelo tráfego das máquinas agrícolas. Na camada de 0,25-0,30, a maior densidade encontrada foi no PD e diferiu significativamente do CN.

A macroporosidade não apresentou diferença significativa em nenhuma camada, embora fosse esperada redução significativa no PD em relação ao CN, em razão do acúmulo de tráfego e conseqüente aumento da densidade e redução da macroporosidade. Isso pode estar ocorrendo em função da porosidade biológica do solo.

Já a microporosidade não apresentou diferença significativa somente na camada de 0,00-0,07 m. Nas demais camadas houve diferença significativa; o menor valor da microporosidade foi encontrado no PD, nas camadas de 0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m. A porosidade total não teve diferença significativa nas camadas de 0,00-0,07 e 0,40-0,45 m, embora se esperasse encontrar diferença significativa na camada de 0,00-0,07 m, o que pode não ter ocorrido pelo acúmulo de matéria orgânica na superfície do solo do PD. Nas camadas de 0,10-0,15 e 0,25-0,30 m houve diferença significativa, com maior porosidade no CN.

**Tabela 6 - Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, em quatro profundidades e nos tratamentos campo nativo (CN) e plantio direto (PD), para o Argissolo 1**

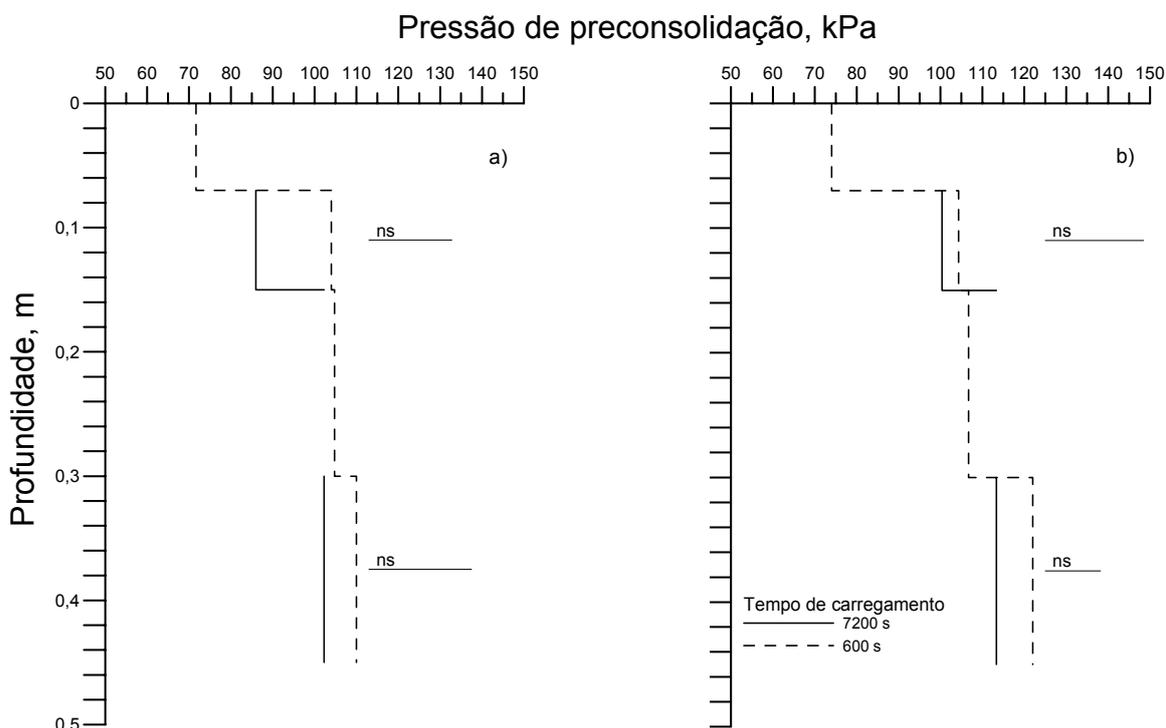
Tratamento	Densidade	Macroporosidade	Microporosidade	Porosidade Total
	Mg m <sup>3</sup>	----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----		
<b>Camada 0,00-0,07 m</b>				
<b>CN</b>	1,57 a	0,20 a	0,21 a	0,41 a
<b>PD</b>	1,57 a	0,18 a	0,22 a	0,41 a
<b>Camada 0,10-0,15 m</b>				
<b>CN</b>	1,55 b	0,20 a	0,22 a	0,42 a
<b>PD</b>	1,65 a	0,19 a	0,19 b	0,38 b
<b>Camada 0,25-0,30 m</b>				
<b>CN</b>	1,51 b	0,21 a	0,22 a	0,43 a
<b>PD</b>	1,57 a	0,21 a	0,19 b	0,41 b
<b>Camada 0,40-0,45 m</b>				
<b>CN</b>	1,51 a	0,22 a	0,21 a	0,43 a
<b>PD</b>	1,48 a	0,23 a	0,20 b	0,44 a

Em cada camada de solo, as médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de DMS (5%).

#### 4.3.4 Argissolo 2

##### 4.3.4.1 Pressão de preconsolidação

Para o Argissolo 2, não foram realizados ensaios com o tempo de 7.200 s nas camadas de 0,00-0,07 e 0,25-0,30 m, pelo fato de o número de cilindros coletados não ter sido igual em virtude da realização de outros testes nessas camadas. Da mesma forma que no Latossolo e Argissolo 1, o tempo de carregamento não teve efeito significativo nos valores da  $\sigma_p$ . Na camada de 0,00-0,07 m, no solo sob uso de CN, foi observado o menor valor de  $\sigma_p$ , o que pode ser devido ao sistema radicular da gramínea e ao acúmulo de matéria orgânica (Figura 8). Na camada de 0,10-0,15 m, também como verificado no Latossolo e Argissolo 1, a maior  $\sigma_p$  foi observada no solo sob plantio direto, provavelmente devido ao tráfego das máquinas agrícolas. Nas camadas de 0,25-0,30 e 0,40-0,45 o incremento da  $\sigma_p$  foi baixo, pois as pressões das máquinas não alteram a  $\sigma_p$  nessas camadas.



**Figura 8 - Distribuição em profundidade da pressão de preconsolidação no Argissolo 2 submetido a dois tempos de aplicação das cargas (600 e 7.200 s), em quatro camadas, na mata nativa (a) e plantio direto (b).**

As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa pelo teste DMS (5%) e comparam as médias dos tempos de carregamento em cada camada. \* = diferença significativa; ns = diferença não significativa.

#### 4.3.4.2 Compressão cíclica

A tensão de água no solo sob CN nas camadas de 0,00-0,07 e 0,10-0,15 m tem comportamento semelhante e redução praticamente linear (Figura 9). Nas camadas de 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m, a redução da tensão da água é maior a partir dos 50 ciclos de compressão/descompressão. A deformação nas camadas de 0,00-0,07, 0,10-0,15 e 0,40-0,45 m são praticamente iguais. Na camada de 0,25-0,30 m, a deformação foi menor em relação às demais.

Na camada de 0,00-0,07 m, o solo sob CN sofreu incremento da  $D_s$  em torno de 8%, aumentando de 1,62 para 1,75  $Mg\ m^{-3}$ . Nas demais camadas, o incremento da  $D_s$  ficou em torno de 5%. Era de se esperar um menor incremento na camada superficial, pois esta deve ter maior teor de matéria orgânica.

No PD, as tensões de água no solo nas camadas de 0,00-0,07, 0,10-0,15 e 0,40-0,45 m apresentaram um comportamento semelhante, com redução linear até os 50 ciclos de compressão/descompressão, quando houve redução mais elevada.

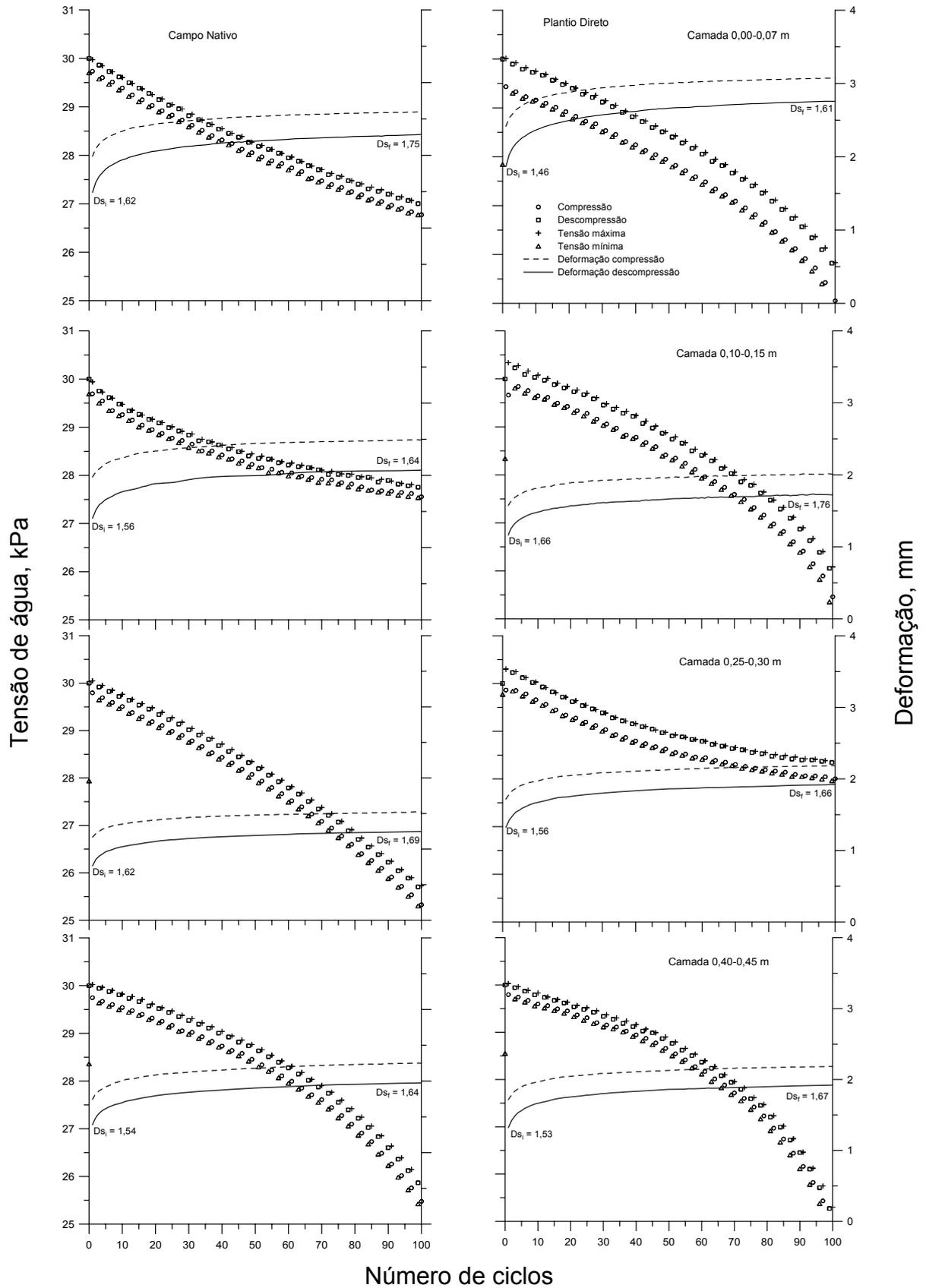


Figura 9 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 30 s, 200 kPa na compressão e 0 na descompressão) nas quatro camadas avaliadas do Argissolo 2 sob campo nativo e plantio direto, densidade inicial ( $D_{si}$ ) e densidade final ( $D_{sf}$ ), em  $Mg\ m^{-3}$ .

A deformação do solo sob PD na camada de 0,00-0,07 m foi de aproximadamente 3 mm, sendo 1 mm maior do que nas demais. Essa maior deformação se deve a menor  $D_s$  do solo na camada superficial, por efeito do maior teor de matéria orgânica e também do revolvimento superficial do solo pela semeadora.

Com o aumento do tempo de compressão/descompressão, era esperado aumento significativo da deformação, mas isso não ocorreu. A tensão de água no solo para esses ensaios apresentou pouca variação entre a compressão e a descompressão, devido provavelmente a problemas nos transdutores de pressão.

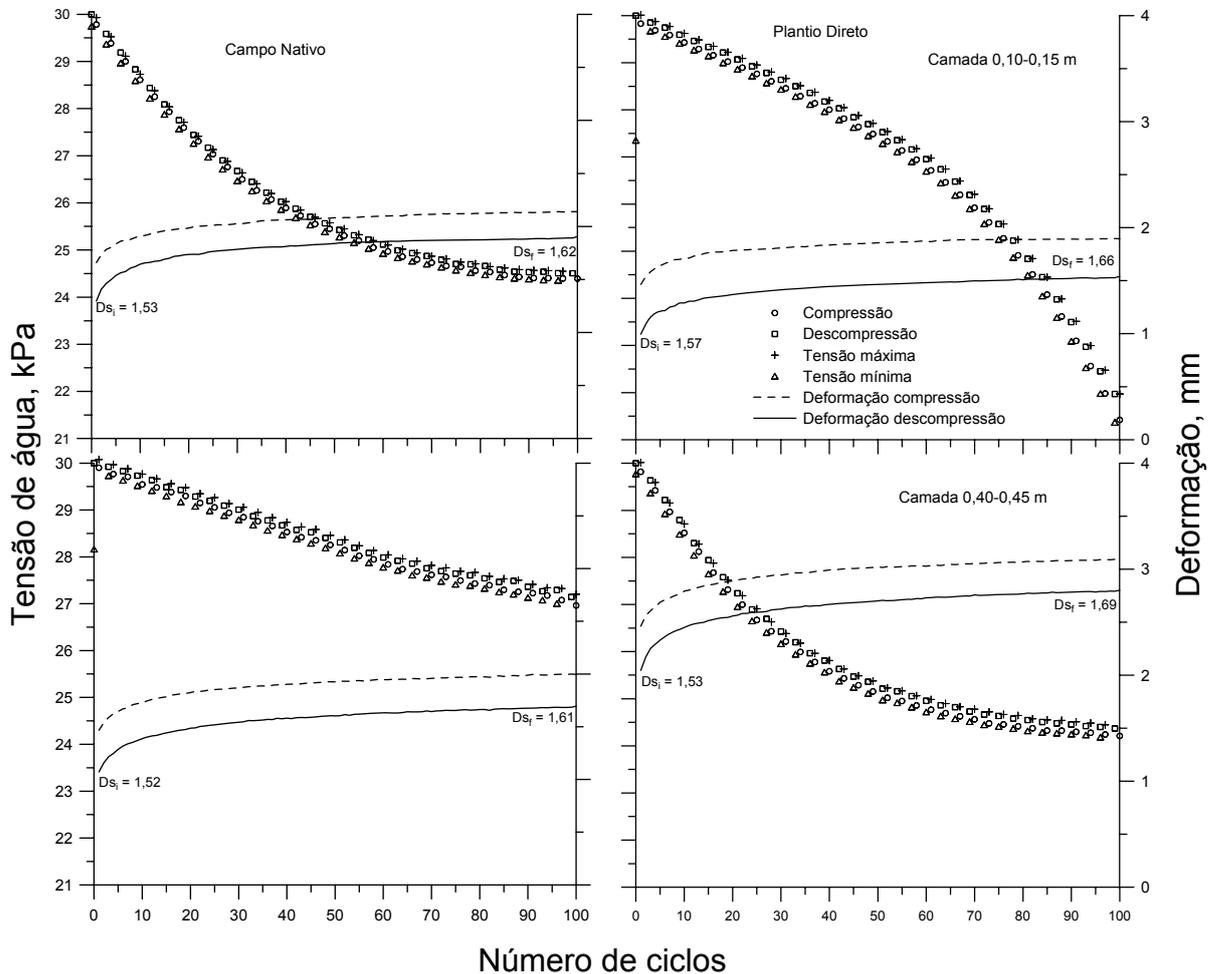


Figura 10 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 7.200 s, 200 kPa na compressão e 0 na descompressão) em duas camadas avaliadas do Argissolo 2 sob campo nativo e plantio direto densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em  $Mg\ m^{-3}$ .

Os resultados obtidos para a compressibilidade cíclica, com intervalos de 30 e 120 s para cada ciclo, com 100 ciclos, com carga de compressão de 80 kPa e de descompressão de 0 kPa, bem como a deformação para o Argissolo 2 com uso de CN e PD em duas camadas (0,10-0,15 e 0,40-0,45 m) são apresentados nas Figuras 11 e 12.

Nesses ensaios, os transdutores de pressão também apresentaram problema, como pode ser observado nas Figuras 11 e 12, porém os dados da deformação do solo não foram prejudicados. Observou-se que o tempo e a aplicação da carga não alteraram a deformação do solo, nas duas camadas e nos dois usos avaliados (CN e PD).

É importante ressaltar que a carga aplicada sobre o solo interferiu nos valores de deformação, ao contrário do tempo de aplicação de cada carga.

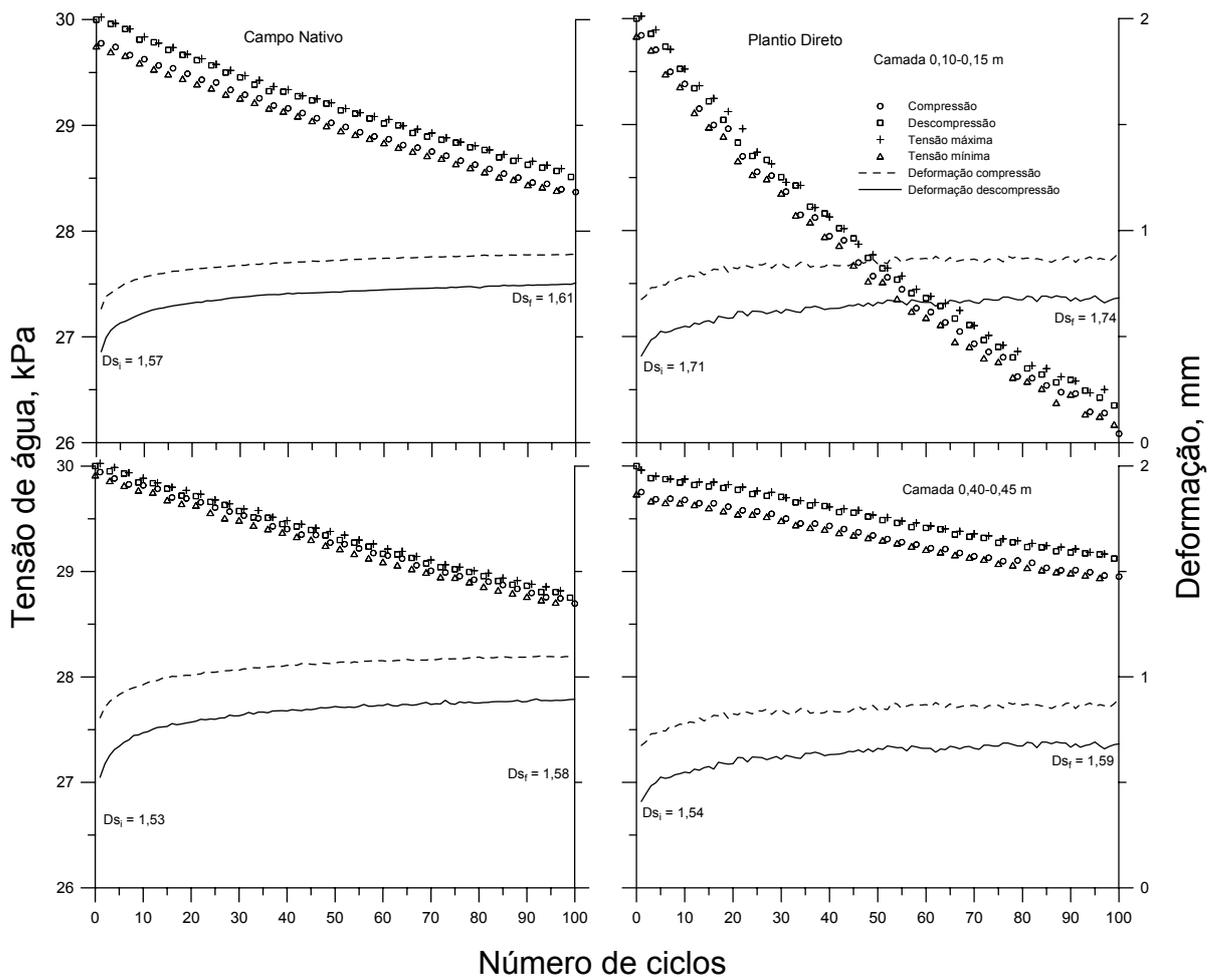
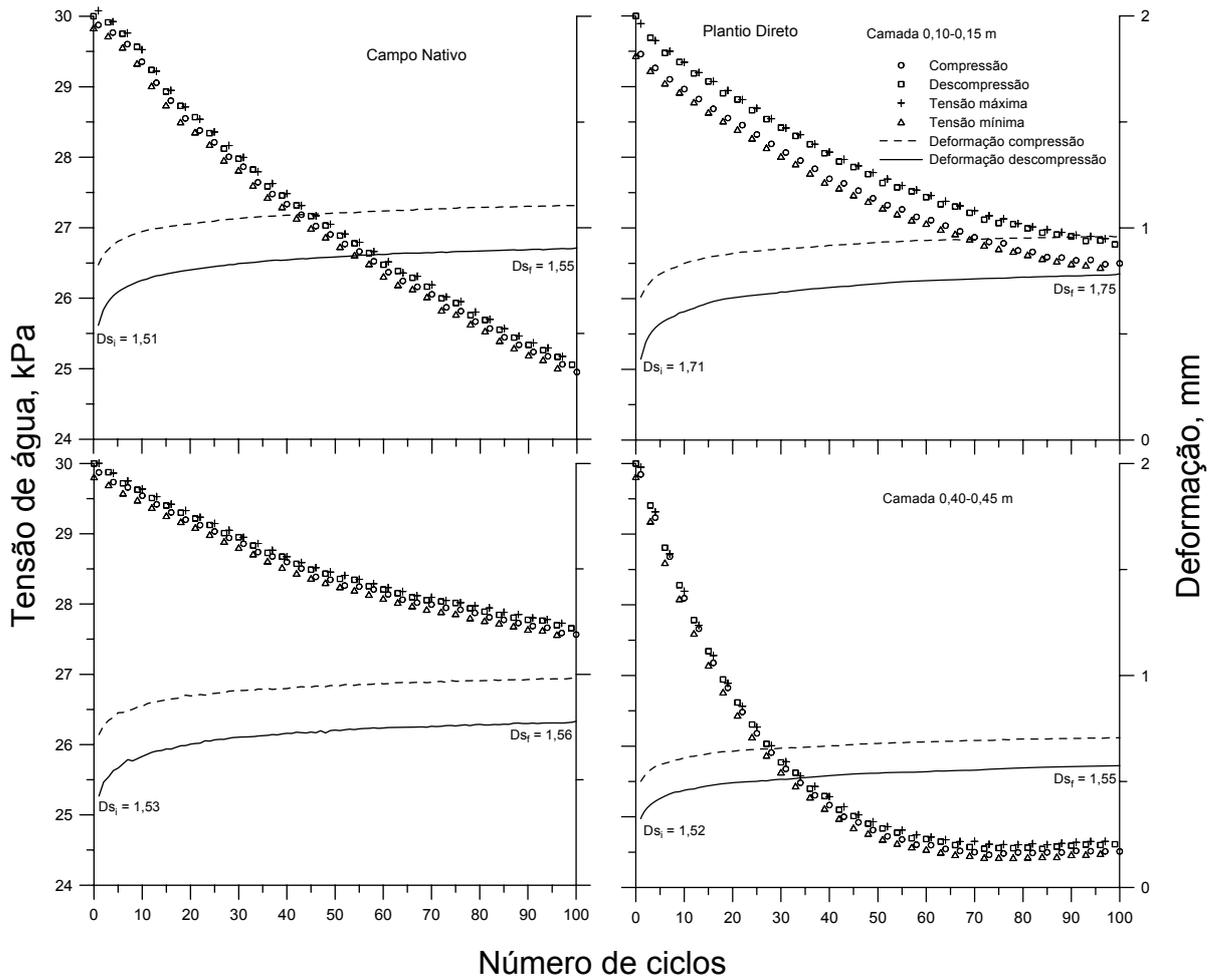


Figura 11 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 30 s, 80 kPa na compressão e 0 na descompressão) em duas camadas avaliadas do Argissolo 2 sob campo nativo e plantio direto, densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em  $Mg\ m^{-3}$ .



**Figura 12 - Compressibilidade cíclica (100 ciclos de 7.200 s, 80 kPa na compressão e 0 na decompressão) em duas camadas avaliadas do Argissolo 2 sob campo nativo e plantio direto, densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em  $Mg\ m^{-3}$ .**

Os resultados obtidos para a compressibilidade cíclica, com intervalos de 30 s para cada ciclo, com 300 ciclos, com carga de compressão de 200 kPa e de decompressão de 0 kPa, bem como a deformação para o Argissolo 2 com uso de CN e PD em duas camadas de 0,10-0,15 e 0,40-0,45 m, são apresentados na Figura 13.

Nesses ensaios, os tensiômetros ou os transdutores de pressão também não funcionaram de forma correta, prejudicando assim os dados das tensões de água no solo. Com o aumento do número de ciclos de compressão/decompressão, a deformação do solo aumenta pouco, pois esta ocorre nos primeiros 15 a 20 ciclos, o que mostra que o solo chega à sua compactação máxima para a tensão da água de 30 kPa.

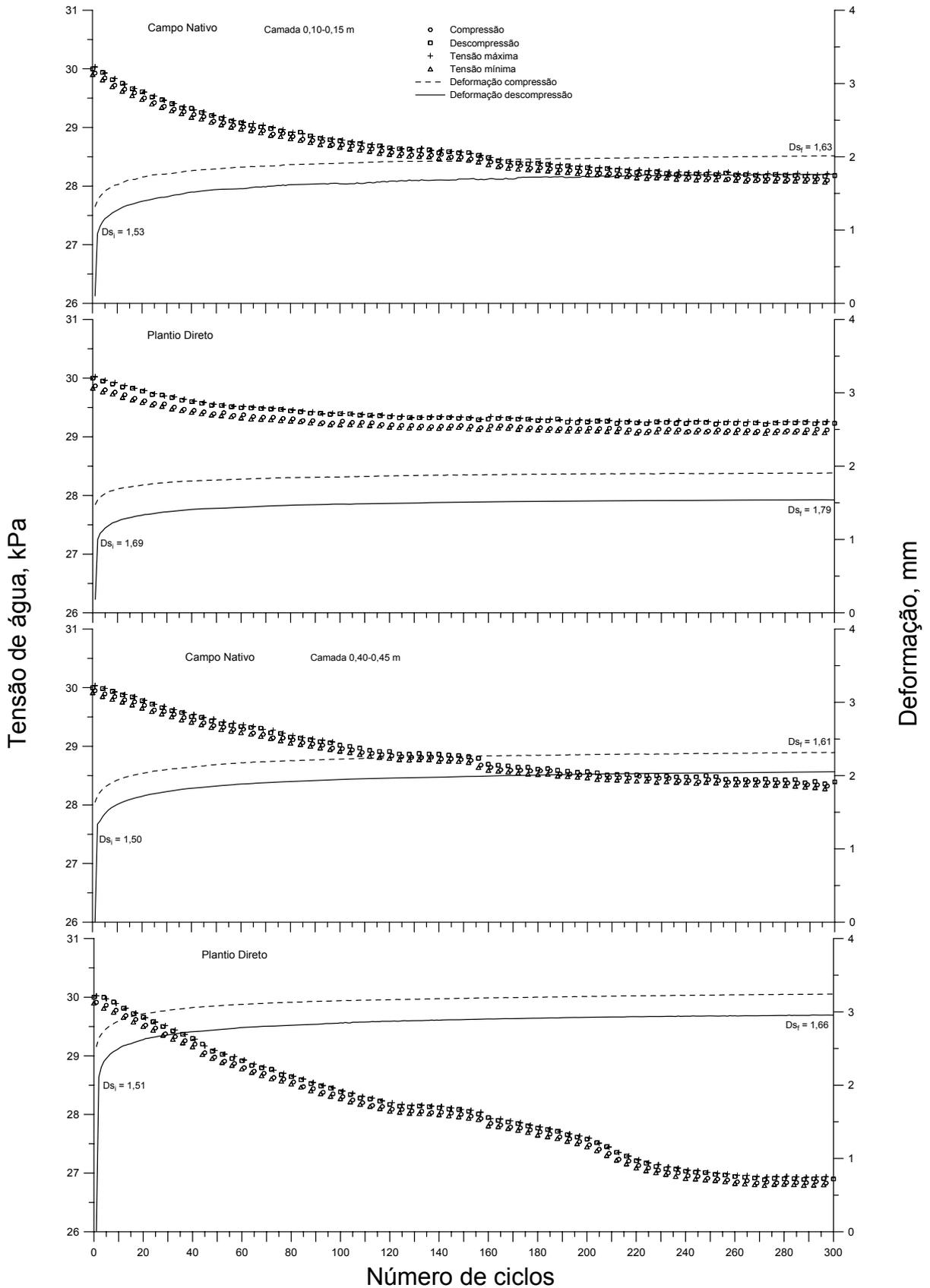


Figura 13 - Compressibilidade cíclica (300 ciclos de 30 s, 200 kPa na compressão e 0 na descompressão) em duas camadas avaliadas do Argissolo 2 sob campo nativo e plantio direto densidade inicial ( $D_{s_i}$ ) e densidade final ( $D_{s_f}$ ), em  $\text{Mg m}^{-3}$ .

#### 4.3.4.3 Densidade e porosidade do solo

A densidade do solo não apresentou diferenças significativas em nenhuma das camadas avaliadas, o que pode ter ocorrido em razão do maior teor de areia desse solo (Tabela 7).

A macroporosidade mostrou diferença significativa somente na camada de 0,00-0,07 m, sendo o maior valor encontrado no PD. Isso pode ser explicado pelo fato de, que com o apodrecimento das raízes, ocorre formação de bioporos. As demais camadas não apresentaram diferença significativa entre CN e PD, podendo isso estar associado à granulometria do solo, pois o Argissolo 2 apresenta textura arenosa, o que dificulta a acomodação das partículas, devido à forma e ao tamanho das partículas da areia.

**Tabela 7 - Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, em quatro profundidades e nos tratamentos campo nativo (CN) e plantio direto (PD), para o Argissolo 2**

Tratamento	Densidade	Macroporosidade	Microporosidade	Porosidade Total
	Mg m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>		
<b>Camada de 0,00-0,07 m</b>				
CN	1,56 a	0,24 b	0,18 a	0,41 a
PD	1,44 a	0,32 a	0,13 b	0,46 a
<b>Camada de 0,10-0,15 m</b>				
CN	1,62 a	0,25 a	0,15 a	0,40 a
PD	1,64 a	0,22 a	0,16 a	0,39 a
<b>Camada de 0,25-0,30 m</b>				
CN	1,58 a	0,22 a	0,18 a	0,40 a
PD	1,62 a	0,21 a	0,18 a	0,39 a
<b>Camada de 0,40-0,40 m</b>				
CN	1,53 a	0,23 a	0,19 a	0,42 a
PD	1,54 a	0,22 a	0,20 a	0,42 a

Em cada camada, as médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de DMS (5%).

A microporosidade, assim como a macroporosidade, apresentou diferença significativa somente na camada de 0,00-0,07 m, onde o menor valor foi encontrado no PD, o que está coerente, pois a macroporosidade nesta mesma camada é maior.

Nas demais camadas não houve diferença significativa, o que indica que o tráfego das máquinas não altera essa propriedade física do solo em profundidades maiores.

A porosidade total não apresentou diferença significativa em nenhuma camada avaliada, nem mesmo na de 0,00-0,07 m, onde a macroporosidade e microporosidade diferiram.

## 4.4 Discussão

### 4.4.1 Pressão de preconsolidação

Uma das consequências das alterações observadas é o maior conteúdo de água retido na menor tensão estudada (6 kPa), verificado no solo sob plantio direto e sistema convencional, o que, por outro lado, deve alterar o seu comportamento compressivo (SMITH et al., 1997).

Os dois tempos de carregamento aplicados (600 e 7.200 s) não apresentaram diferenças significativas em nenhum dos três solos (Latossolo, Argissolo 1 e Argissolo 2), assim como nas quatro camadas (0,00-0,07, 0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m). Silva et al. (2000), em ensaios de compressibilidade realizados com diferentes tempos de carregamento, concluíram que cinco minutos de carregamento foi suficiente para que ocorressem 99% da deformação do solo. Suzuki (2005) observou que um ou três minutos de aplicação de carga em uma amostra de solo é suficiente para que ocorram, respectivamente, 95 ou 99% de deformação do solo no ensaio de compressão. Entretanto, Silva et al. (2004) concluíram que o intervalo de tempo entre cada carregamento deve ser superior a 15 min para que o próximo carregamento seja aplicado em condições de solo não saturado. Isso pode explicar por que os valores das pressões de preconsolidação não aumentaram quando as cargas foram aplicadas por 600 s, tempo insuficiente para que a água drenasse do solo. Como resultado, ocorreram pressões positivas nas amostras, dificultando a compressão destas.

A  $\sigma_p$  para o Latossolo e Argissolo 1 foi alterada nas camadas de 0,00-0,07 e 0,10-0,15 m em função do tráfego das máquinas agrícolas. No entanto, Oliveira et al. (2003), em estudo para verificar o comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho argiloso da região do cerrado, o qual era submetido a diferentes usos e

diferentes tensões de água, verificaram que na camada de 0,00-0,07 m os índices de compressão não foram diferentes.

Uma das consequências das alterações em relação à  $\sigma_p$ , é um maior conteúdo de água retido no solo sob o uso do PD, na tensão de 6 kPa, alterando dessa forma o efeito compressivo do solo (SMITH et al., 1997).

Era esperado que no Latossolo as pressões das máquinas agrícolas fossem transmitidas a uma maior profundidade em relação ao Argissolo 1, pois, segundo Horn (1988), quanto maior o teor de argila, maior a profundidade em que a pressão é transmitida e, conseqüentemente, maior é a espessura da camada compactada.

O CN do Argissolo 1 sofre pisoteio animal com pouca frequência. As pressões exercidas na superfície pelo pisoteio causaram menor compactação na superfície que em profundidade, esta última provocada pelas pressões exercidas pelo peso das camadas superiores do solo.

O Argissolo 2 não apresentou diferença significativa em nenhuma das quatro camadas estudadas. Lima et al. (2004) afirmam que o atrito entre as partículas é maior em solos arenosos, o que dificulta a movimentação das partículas sólidas e a deformação do solo. Entretanto, solos formados de partículas de diferentes tamanhos são, normalmente, mais suscetíveis à compactação, pois as partículas menores podem se encaixar nos espaços formados por partículas maiores (TORRES et al., 1993).

#### 4.4.2 Compressão cíclica

Com o aumento da umidade do solo, ocorre a saturação do sistema de poros da estrutura do solo, ficando a estrutura enfraquecida devido à perda da coesão das partículas do solo, tornando-se, conseqüentemente, mais suscetível a compactação (JUNGE, 1999; BAUMGARTL, 2003).

A resistência do solo é dependente do rearranjo das partículas, sendo este responsável pelo aumento da densidade do solo, a qual pode confirmar o aumento da  $\sigma_p$ , devido ao pastoreio e pisoteio dos animais (KRÜMMELBEIN et al., 2006).

Devido a forças externas que são aplicadas no solo, as partículas deste sofrem um rearranjo, ocorrendo assim aumento da densidade; conseqüentemente, a estrutura do solo se torna mais estável, de forma que forças maiores podem ser aplicadas sobre sem que sofra um novo rearranjo de partículas ou sem que ocorra

uma compactação adicional. Isso ocorre em agregados e também em partículas primárias do solo (HARTGE; HORN, 1999). O conceito de pressão de preconsolidação assume que o carregamento mecânico sobre o solo, provocando tensões que ficam abaixo da  $\sigma_p$ , gera uma deformação elástica do solo (HORN, 1998). Entretanto, se considerar a aplicação repetida da mesma carga, os solos tendem a mostrar ligeira compactação (deformação plástica), embora a pressão de preconsolidação não seja ultrapassada pelo fato de a tensão de água no solo aumentar e, por conseguinte, não permitir uma maior deformação do solo. Isso pode ser resumido em deformação plástica padrão da curva de tensão deformação (O'SULLIVAN et al., 1999; FAZEKAS; HORN, 2005; PETH; HORN, 2006, 2004).

Nos resultados obtidos nos ensaios da compressibilidade cíclica durante os 100 ciclos de carregamento/descarregamento (200/0 kPa), com carga aplicada maior do que a  $\sigma_p$ , foi detectada uma deformação plástica no solo. Portanto, o carregamento cíclico em função da poro pressão pode gerar mudanças que induzem a uma diminuição da resistência entre as partículas do solo e agregados, embora a carga seja mantida abaixo da pressão de preconsolidação do solo (LARSON; GUPTA, 1980; FAZEKAS, 2005; PETH; HORN, 2006;). Essa deformação é chamada de lenta (WANG, 2000; PETH; HORN, 2006).

Além disso, deve ser considerado o menor efeito da tensão da água devido à mudança da altura da amostra durante o carregamento/descarregamento, resultando em enfraquecimento adicional do solo. Isso está relacionado com a diminuição da tensão da água durante o carregamento e o seu aumento durante o descarregamento; a diferença da tensão da água entre o carregamento e o descarregamento aumenta com o incremento da carga.

A não deformação durante o carregamento/descarregamento repetido vai depender do estado de equilíbrio quanto a tensão de rearranjo das partículas e redução da tensão da água no solo, pois é de suma importância e ambos são menores do que a força interna no solo. Peth e Horn (2006) afirmaram que não houve equilíbrio em amostras homogêneas de solo arenoso mesmo depois de 100 ciclos de carregamento/descarregamento, enquanto em solo com estrutura preservada não detectaram um ponto de equilíbrio depois de predefinir a pressão após 20 ciclos. Os valores de pressão de preconsolidação sob pressão cíclica de carregamento/descarregamento são, em geral, dependentes do número de ciclos de carga ou do tempo de descarregamento. Se for considerado o primeiro

carregamento de 30 s, não se pode detectar uma situação de equilíbrio definitiva da amostra. Com as repetidas cargas e descargas, ocorre uma reorganização espacial dos agregados do solo, os quais com o tempo atingem uma reorganização máxima para um dado número de ciclos e pressão. Isso é de se esperar, pois o movimento da água, do ar e das partículas do solo exige certo tempo para ocorrer (HARTGE; HORN, 1999).

A intensidade da tensão e o tempo necessário para atingir o equilíbrio dependem da condutividade hidráulica, da continuidade de poros e da incompressibilidade da água. Assim, é de se esperar menores valores de  $\sigma_p$  devido ao enfraquecimento da estrutura do solo e à dependência da drenagem da água para fora dos poros durante os ciclos de carregamento/descarregamento, o que pode ser observado nos ensaios. No entanto, a magnitude dessas alterações, bem como os efeitos da deformação total para a determinação da pressão de preconsolidação, requer novos estudos. Se forem comparados os dados obtidos dos testes com cargas estáticas com os dados de cargas cíclicas, observa-se que os testes com carregamento estático resultam em maior deformação e menor pressão de preconsolidação. Além disso, também se observa que o carregamento estático mínimo é semelhante à resistência do solo, como já confirmado por Lebert et al. (1989).

Krümmelbein et al. (2008) não observaram diferença significativa na  $\sigma_p$  em áreas com cobertura de gramínea nos primeiros 20 ciclos de carregamento/descarregamento, ao passo que, nas áreas sem cobertura, a  $\sigma_p$  diminuiu significativamente com a aplicação de 20 ciclos. De maneira geral, nas áreas sem cobertura de gramínea, a  $\sigma_p$  depende do tipo de determinação, porém essa dependência diminui com a maior intensidade de pastejo. Sabe-se que o histórico de carregamentos do solo tem influência direta sobre o carregamento mecânico, sendo os carregamentos cíclicos dependentes da tensão em que o solo se encontra (KOBA; STYPULKOWSKI, 1980).

É importante frisar que a deformação e recuperação do Latossolo na camada de 0,00-0,07 m foram maiores em relação às das demais camadas (Tabela 8). Isso pode ser explicado em função da maior quantidade de matéria orgânica, pois, como não há revolvimento do solo, todo o material orgânico permanece na superfície do solo. O menor incremento da  $D_s$  no Argissolo 1 sob PD se deve ao fato

de que este já sofreu e continua sofrendo cargas externas geradas pelas máquinas agrícolas utilizadas para implantação, manejo e colheita das culturas agrícolas.

**Tabela 8 - Deformação e densidade do solo no ensaio de compressibilidade cíclica para cinco ciclos em um ensaio de 100 ciclos. PD= plantio direto; MN= mata Nativa e CN= campo Nativo**

Solo	Camada m	Manejo	Deformação, mm					Densidade, Mg m <sup>-3</sup>				
			Ciclos de compressão									
			0	10	20	50	100	0	10	20	50	100
Latosolo	0,00-0,07	MN	0,0	7,21 a	7,46 a	7,74 a	7,93 a	0,99 b	1,30 b	1,32 b	1,33 b	1,34 b
		PD	0,0	3,69 b	3,87 b	4,08 b	4,22 b	1,40 a	1,59 a	1,60 a	1,62 a	1,63 a
	0,10-0,15	MN	0,0	4,35 a	4,48 a	4,64 a	4,73 a	1,08 b	1,27 b	1,27 b	1,28 b	1,29 b
		PD	0,0	2,92 b	3,06 b	3,23 b	3,35 b	1,44 a	1,59 a	1,60 a	1,61 a	1,62 a
	0,25-0,30	MN	0,0	4,73 a	4,85 a	5,02 a	5,13 a	1,09 b	1,29 b	1,30 b	1,31 b	1,31 b
		PD	0,0	2,66 b	2,78 b	2,92 b	3,01 b	1,37 a	1,51 a	1,51 a	1,52 a	1,53 a
	0,40-0,45	MN	0,0	3,56 a	3,68 a	3,84 a	3,92 a	1,23 a	1,40 a	1,40 a	1,41 a	1,42 a
		PD	0,0	3,56 a	3,70 a	3,84 a	3,93 a	1,25 a	1,42 a	1,43 a	1,44 a	1,44 a
Argissolo 1	0,00-0,07	CN	0,0	1,34 b	1,41 b	1,51 b	1,57 b	1,62 a	1,70 a	1,70 a	1,71 a	1,71 a
		PD	0,0	1,82 a	1,93 a	2,07 a	2,14 a	1,57 a	1,69 a	1,69 a	1,70 a	1,68 a
	0,10-0,15	CN	0,0	1,67 a	1,77 a	1,88 a	1,96 a	1,52 b	1,63 b	1,62 b	1,62 b	1,63 b
		PD	0,0	1,48 a	1,54 a	1,63 a	1,68 a	1,62 a	1,71 a	1,71 a	1,71 a	1,72 a
	0,25-0,30	CN	0,0	2,02 a	2,13 a	2,28 a	2,40 a	1,50 a	1,61 a	1,62 a	1,62 a	1,64 a
		PD	0,0	1,58 a	1,66 a	1,74 b	1,80 b	1,55 a	1,64 a	1,64 a	1,65 a	1,65 a
	0,40-0,45	CN	0,0	2,08 a	2,2 a	2,38 a	2,48 a	1,53 a	1,64 a	1,65 a	1,66 a	1,67 a
		PD	0,0	2,02 a	2,13 a	2,28 a	2,38 a	1,48 a	1,59 a	1,59 a	1,60 a	1,62 a
Argissolo 2	0,00-0,07	CN	0,0	2,33 a	2,43 a	2,54 a	2,60 a	1,62 a	1,76 a	1,76 a	1,77 a	1,77 a
		PD	0,0	2,78 a	2,88 a	3,00 a	3,07 a	1,46 b	1,61 a	1,61 a	1,62 a	1,63 a
	0,10-0,15	CN	0,0	1,65 a	1,71 a	1,79 a	1,84 a	1,56 a	1,65 a	1,65 a	1,65 a	1,66 a
		PD	0,0	1,81 a	1,89 a	1,96 a	2,01 a	1,66 a	1,76 a	1,77 a	1,77 a	1,77 a
	0,25-0,30	CN	0,0	1,35 a	1,41 a	1,48 a	1,52 a	1,62 a	1,69 a	1,70 a	1,70 a	1,70 a
		PD	0,0	1,97 a	2,05 a	2,13 a	2,18 a	1,56 a	1,67 a	1,67 a	1,68 a	1,68 a
	0,40-0,45	CN	0,0	2,00 a	2,08 a	2,18 a	2,25 a	1,53 a	1,64 a	1,65 a	1,65 a	1,66 a
		PD	0,0	2,43 a	2,52 a	2,63 a	2,70 a	1,53 a	1,67 a	1,67 a	1,68 a	1,68 a

Em cada camada, as médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de DMS (5%).

Em relação à deformação do solo, é possível observar que esta ocorre basicamente nos 10 primeiros ciclos de aplicação da carga em todas as camadas e nos três diferentes solos, ou seja, nos três primeiros minutos. Esses resultados corroboram os de Suzuki (2005), que em ensaio de compressão verificou que 99% da deformação ocorreu nos três primeiros minutos de aplicação de cada carga,

independentemente da textura do solo. Como na deformação, a densidade também tem um incremento expressivo nos 10 primeiros ciclos, e depois esse incremento é reduzido. Assim como na deformação, o maior incremento da densidade do solo também ocorreu nos 10 primeiros ciclos dos ensaios nos três solos.

#### 4.4.3 Densidade do solo

A densidade do solo é a propriedade física mais monitorada e estudada. Os dados de densidade e porosidade têm uma estreita relação e, por isso, geralmente são apresentados juntos, porque a variação da densidade, de forma geral, está relacionada às diferenças do volume total de poros. Segundo Allmaras (1973), os solos cultivados no sistema de preparo convencional têm aumento da sua densidade e perda de matéria orgânica abaixo da camada de corte dos implementos de preparo do solo. Em solos onde o sistema de cultivo é o plantio direto, tem-se constatado que a ocorrência da compactação é mais superficial, em torno dos 0,10 m, principalmente em solos argilosos, devido ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas (FERNANDES et al., 1983; ELTZ et al., 1989; DERPSCH et al., 1991). Nos três solos (Latossolo, Argissolo 1 e Argissolo 2) deste estudo, nas áreas sob plantio direto, também foi constatado aumento na densidade e diminuição da porosidade total na camada de 0,10-0,15 m. No Latossolo sob mata nativa e no Argissolo 1 e Argissolo 2 sob campo nativo não foi verificado aumento da densidade e diminuição da porosidade total na camada de 0,10-0,15 m, o que indica que a alteração dessas propriedades se deve ao tráfego repetitivo das máquinas e implementos agrícolas em condições inadequadas de umidade no solo.

Ao contrário da pressão de preconsoidação, a qual sofreu efeito do tráfego até a camada de 0,10-0,15 m, a densidade e a porosidade total no Latossolo e Argissolo 1 sofreram alterações, comparadas à mata nativa e ao campo nativo, até a camada de 0,25-0,30 m.

No Latossolo, na camada de 0,40-0,45 m, não houve diferença significativa, o que mostra que o tráfego das máquinas agrícolas utilizadas para plantio, manejo e colheita não provocou alterações na densidade do solo em profundidade maior que 0,40 m. No entanto, se esse solo for trafegado com uma umidade maior do que a utilizada no ensaio e/ou por máquinas de maior peso que as usadas neste trabalho, poderão ocorrer alterações nessa profundidade.

Outra observação a ser feita é que no PD, como não há revolvimento do solo, os restos culturais ficam acumulados na superfície do solo, aumentando assim o teor de matéria orgânica e, com isso, evitando uma maior compactação do solo.

Em solos arenosos, é natural que os valores médios de densidade do solo sejam maiores do que em solos argilosos; por isso, o valor absoluto da densidade do solo deve ser evitado e deve-se usar o valor do teor de argila como referência nas avaliações do estado de compactação do solo. Bowen (1981) considera que, para a condição de capacidade de campo, valores de densidade do solo de  $1,55 \text{ Mg m}^3$  em solos francoargilosos e argilosos e de  $1,85 \text{ Mg m}^3$  para solos arenosos a francoarenosos são críticos para o desenvolvimento radicular; a partir daí, ocorrem restrições ao seu crescimento e, portanto, são considerados compactados.

De maneira geral, com base nos experimentos realizados e em alguns resultados relatados na literatura disponível, Reinert et al. (2001) propuseram os seguintes valores críticos de densidade do solo, caracterizando dessa forma determinado estado de compactação como solo compactado: para solos de textura média, com teor de argila entre 200 e  $550 \text{ g kg}^{-1}$ , a densidade crítica é de  $1,55 \text{ Mg m}^3$  (Latossolo); e, para solos de textura arenosa com menos de  $200 \text{ g kg}^{-1}$ , a densidade crítica é de  $1,65 \text{ Mg m}^3$  (Argissolo 1 e Argissolo 2).

Observou-se que os valores de densidade do solo com o tráfego de máquinas agrícolas aumentou nos três solos estudados, mas em nenhum deles a densidade ultrapassou os valores críticos. No Latossolo, a maior densidade no PD foi observada na camada de 0,10-0,15 m:  $1,43 \text{ Mg m}^3$ ; dessa forma, não foi limitante para o desenvolvimento radicular das culturas.

No Argissolo 1 e Argissolo 2, as densidades máximas também foram observadas na camada de 0,10-0,15 m, sendo elas de  $1,65$  e  $1,64 \text{ Mg m}^3$ , respectivamente, as quais estão no limite máximo para o desenvolvimento radicular.

## 4.5 Conclusões

O tráfego de máquinas e implementos altera a pressão de preconsolidação, a qual aumenta nas camadas de 0,00-0,07 e 0,10-15 m no Latossolo e Argissolo 1; no Argissolo 2 não houve alteração dessa pressão.

Nos ensaios de compressibilidade cíclica, no Latossolo, na camada de 0,00-0,07 m, a matéria orgânica tem grande influência na recuperação da deformação.

A maior deformação do solo nos ensaios de compressibilidade cíclica ocorre nos 10 primeiros ciclos de compressão/descompressão; dessa forma, trafegando com máquinas mais que 10 vezes sobre o solo, não haverá uma deformação/compactação significativa.

Com o tráfego de máquinas agrícolas ocorre aumento da densidade do solo no plantio direto em relação à mata nativa e campo nativo; contudo esse aumento não se torna prejudicial para o desenvolvimento das culturas, pois as densidades estão abaixo dos níveis críticos.

## 4.6 Referências

ABU-HAMDEH, N. et al. **Soil physical response to various tire and track systems**. St. Joseph: ASAE, 1995. (ASAE Paper n°. AETC 95032).

ALLMARAS, R. R.; BLACK, A. L.; RICKMAN, R. W. Tillage soil environment, and root growth. In: NATIONAL CONFERENCE SOIL CONSERVATION SOCIETY AMERICAN, 1973, Ankeny. **Proceedings...** Ankeny, 1973. p. 62–86. 1973.

BAUMGARTL, T. **Kopplung von mechanischen und hydraulischen bodenzustandsfunktionen zur bestimmung und modellierung von zugspannungen und volumenänderungen in porösen Medien**. 2003. 62 p. Dissertation (Doktorgrades der Agrar) - Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian Albrechts University, Kiel.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. Elsevier: New York, p. 764, 1972.

BEDARD, Y. et al. Soil compaction by manure spreaders equipped with standard and oversized tires and multiple axles. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v. 40, n. 1, p. 37-43, 1997.

BELTRAME, L. F. S.; TAYLOR, J. C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 32, p. 59-62, 1980.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Previsão climática e sua aplicação na agricultura. In: REINERT, J. R. et al. (Eds.) **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, 2001, 165 p.

BOWEN, H. D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. (Eds). **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981. p.21-57.

DERPSCH, R. et al. **Controle de erosão no Paraná, Brasil**: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1991. 272 p.

ELTZ, F. L. F.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 259-267, mar./abr. 1989.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FAZEKAS, O.; HORN, R. Zusammenhang zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilität in Abhängigkeit von der Belastungsdauer. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 168, n. 1, p. 60-67, Feb. 2005.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H. M.; BRONSON, R. D. Efeito de três sistemas de preparo de solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros em dois solos. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Campinas, v. 7, n. 3, p. 329-333, maio/jun. 1983.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 664-668, mar./abr. 2006.

HARTGE, K. H.; HORN, R. **Einführung in die Bodenphysik**. 3. Aufl. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1999.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

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

HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, Reiskirchen, v.11, p. 53-71, 1988. Suppl.

\_\_\_\_\_. **Assessment, prevention and rehabilitation of soil degradation caused by compaction and surface sealing**. Reiskirchen, Catena Verlag, p. 527-538, 1998. (Advances in GeoEcology, v. 31).

HORN, R.; van DER AKKER, J. J. H.; ARVIDSON, J. Subsoil compaction - distribution, processes and consequences. Reiskirchen, Catena Verlag, 2000. 462 p. (Advances in Geoecology, v. 32).

INNS, F. M.; KILGOUR, J. **Agricultural tyres**. London: Dunlop, 1978. 70 p.

JUNGE, T. **Zur Bedeutung des Porenwasserdruckes für die Zugfestigkeit von Böden**. 1999. 114 p. Dissertation (Doktorgrades der Agrar) - Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian Albrechts University, Kiel.

KOBA, H.; STYPULKOWSKI, B. The mechanical properties of cement stabilised soils in the conditions of load repetitions. Soils under cyclic and transient loading. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SOILS UNDER CYCLIC AND TRANSIENT LOADING, 1980, Swansea. **Proceedings...** Balkema, 1980.

KRÜMMELBEIN, J. et al. Influence of various grazing intensities on soil stability, soil structure and water balance of grassland soils in Inner Mongolia, P.R. China. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 18., 2006, Philadelphia. **Proceedings...** Philadelphia, 2006. p. 93-101. (Advances in GeoEcology, v. 38).

KRÜMMELBEIN, J.; PETH, S.; HORN, R. Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, n. 2, p. 139-148, June 2008.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C. Estimating Critical Stress in Unsaturated Soils from Changes in Pore Water Pressure During Confined Compression. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 6, p. 1127-1132, Nov./Dec. 1980.

LEBERT, M.; BURGER, N.; HORN, R. Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. In: LARSON, W. E. et al. (Eds.) **Mechanics and related processes in structured agricultural soils**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1989. p. 73-80. (NATO ASI Series E, Applied Science, v.172)

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. In: STEWART, B. A. (Ed.). **Advances in Soil Science**, New York: Springer-Verlag, 1985. p. 277-294. v.1

LIMA, C. L. R. et al. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 409-414, maio/jun. 2004.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 147, p. 52-55, mar./abr. 1987.

MORAES, M. H.; BENEZ, S. H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma terra roxa estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 2, p. 31-41, maio/ago. 1996.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 46 p.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 442 p.

O'SULLIVAN, M. F.; HANSHALL, J. K.; DICKSON, J. W. A simplified method for estimating soil compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 4, p. 325-335, Jan. 1999.

OLIVEIRA, G. C. de et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 291-299, fev. 2003.

PAGLIAI, M.; JONES, R. Sustainable land management environmental protection a soil physical approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MANAGEMENT FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION: SOIL PHYSICAL ASPECTS, 2001, Florence. **Proceedings...** Florence, 2002. 588 p. (Advances in GeoEcology, v. 35).

PETH, S., HORN, R. The mechanical behaviour of soils under cyclic loading-implications for soil deformation and stress distribution. **Proceedings of the Eurosoil**, Freiburg, p. 101, Sept. 2004.

PETH, S.; HORN, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 169, n. 3, p. 401-410, June 2006.

PRADO, R. de M.; CENTURION, J. F. Alterações na cor e no grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 1, p. 197-203, jan. 2001.

ROSTEK, J.; PETH, S.; HORN, R. Development of a multistep oedometer to analyze the soil behaviour due to cyclic loading. In: INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANISATION CONFERENCE, 17., 2006, Kiel **Proceedings...** Kiel, 2006.

SANTOS, H. G. et al. (Eds.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SCHEFFER, F. et al. **Lehrbuch der Bodenkunde**. Heidelberg: Spektrum; Berlin: Akademischer Verlag, 2002. 593 p. v.15.

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

SILVA, V. R. da et al. Variações no potencial matricial e na deformação do solo durante o ensaio de compressibilidade e de cisalhamento direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, 2004.

SILVA, V. R. da; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 239-249, mar./abr. 2000.

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

SMITH, D. L.; DICKSON; J. W. Contributions to vehicle weight and ground pressure to soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Edingburgh, v. 46, p. 13-29, May/Aug. 1990.

SOANE, B. D. et al. Compaction by agricultural vehicles: A review II. Compaction under tyres and other running gear. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 1, p. 373-400, Dec. 1981.

STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, maio/jun. 2004.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Emater/RS/, 2008. 222 p.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

TORRES, E.; ODILON, F. S.; GALERANI, P. R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1993. 71 p. (Circular Técnica, 12).

WANG, Z. Behaviour of soils and foundation structures under cyclic loads. mitteilungen aus dem fachgebiet grundbau und bodenmechanik. 2000. 123 p. Dissertation (Doktorgrades der Agrar) - Universität Duisburg-Essen, Verlag Glückauf, Essen.

WASTERLUND, I. Enviromentally soft machines. **Small Scale Forestry**, v.1, p.13 - 15, 1994.

WOOD, R. L. et al. **Soil physical properties as affected by traffic**: single, dual and flotation tires. St. Joseph: ASAE. 1990. (ASAE Paper, n<sup>o</sup>, 90-1550)

## 5 CAPÍTULO 2

# INFLUÊNCIA DO USO SOBRE AS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E AR DO SOLO

### 5.1 Introdução

#### 5.1.1 Permeabilidade do solo ao ar

A água e o ar são fluidos armazenados e conduzidos pelos poros do solo (HILLEL, 1998). Por isso, a quantidade de poros, principalmente os macroporos, e sua continuidade influenciam a permeabilidade da água e do ar e, por consequência, o transporte de solutos.

A condutividade, assim como a característica do material, está ligada diretamente ao fluxo médio, sendo depende da permeabilidade (às vezes, permeabilidade intrínseca) não sobre a qualidade do líquido, sendo assim a permeabilidade somente uma característica do meio poroso e sua geometria (HILLEL, 1998). Em razão disso, os fatores geométricos, juntamente com a distribuição do tamanho de poros, a forma do sistema poroso, a continuidade e a tortuosidade, são estimados (BEAR, 1972; HARTGE; HORN, 1999; HILLEL, 1998).

Na literatura são descritas análises que tentam encontrar uma relação entre permeabilidade e geometria dos poros. Corey (1986) afirma que os fatores geométricos para a medida da permeabilidade ao ar podem ser descritos. Ball et al. (1988) afirmam que a permeabilidade ao ar e o volume de poros que está cheio de ar podem ser estimados pela equação de Kozeny-Carman, de forma semelhante à equação desenvolvida por Ahuja et al. (1984).

$$k_a = M \times \varepsilon_a^N \quad [8]$$

em que:

$k_a$  = permeabilidade ao ar,  $\mu\text{m}^2$ ;

$\varepsilon_a$  = volume de poros cheio de ar,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$M$  e  $N$  = constantes empíricas, em que  $N$  é um índice de continuidade.

O volume de poros impermeáveis para o fluxo de ar, ou seja, o volume de poros bloqueados, pode ser definido. Esse volume de poros bloqueados ( $\varepsilon_b$ ) é obtido através da seguinte equação:

$$\varepsilon_b = 10^{\frac{-\log M}{N}} \quad [9]$$

A permeabilidade do solo ao ar é dependente da macroporosidade (BALL, 1981). Diversos autores, porém, relacionaram a permeabilidade ao ar com outras propriedades e processos. Nesses estudos procurou-se verificar o efeito do manejo do solo, da rotação de culturas, da trafegabilidade em relação ao conteúdo de água e ar, do desenvolvimento do sistema radicular e da densidade do solo sobre a permeabilidade ao ar (BALL, 1981; GROENEVELT et al., 1984; BLACKWELL et al., 1989; BLACKWELL et al., 1990; ROSEBERG; MCCOY, 1992; SCHJÖNNING et al., 2002). Esses autores observaram que, quando o solo era revolvido, ocorria aumento na permeabilidade do ar, devido ao aumento da porosidade total. Abaixo da camada mobilizada a permeabilidade ao ar diminuiu, devido ao não revolvimento do solo.

Em processos de compactação, os poros maiores, nos quais o fluxo gasoso é facilitado, tendem a diminuir e, conseqüentemente, ocorre redução da aeração (BOONE; VEEN, 1994). Esses autores verificaram também que, durante o cultivo de feijão no verão, o plantio direto com compactação adicional apresentou uma faixa estreita de umidade ótima em relação ao plantio direto sem compactação adicional.

### 5.1.2 Condutividade hidráulica do solo saturado

Com base no conceito de potencial e fluxo linear, a equação de Darcy (DARCY, 1856) descreve o fluxo de água para condições de solo saturado, e a equação geral de Buckingham (1907) representa o fluxo de água em solo não saturado:

$$\vec{q} = K \times \vec{\nabla} \psi_h \quad [10]$$

em que:

$\vec{q}$  = vetor hidráulico de densidade de fluxo,  $\text{cm h}^{-1}$ ;

$K$  = condutividade hidráulica,  $\text{cm h}^{-1}$ ;

$\psi_h$  = potencial hidráulico,  $\text{cm cm}^{-1}$ .

A condutividade de um poro aumenta proporcionalmente à quarta potência em relação ao raio, e os poros maiores têm uma ligação mais forte com o fluxo. A água nos macroporos, em função da capilaridade, tem uma força de ligação mais fraca, pois são os primeiros na qual a água é drenada. Isso também leva a afirmar que a condutividade hidráulica do solo não saturado está forte e diretamente ligada ao conteúdo de água no solo (BAVER et al., 1972).

A condutividade hidráulica em solo saturado, geralmente, apresenta alta variabilidade (SILVA, 2003). Genro Junior (2002), Abreu et al. (2004) e Lima et al. (2006) obtiveram, respectivamente, coeficientes de variação de 104%, 53% e 112 a 248%, sendo o último em laboratório. Warrich e Nielsen (1980) afirmam que, o coeficiente de variação da condutividade hidráulica do solo saturado pode chegar a valores maiores que 420%. Gurovich (1982) afirma que, devido à grande variabilidade, é comum não encontrar diferenças significativas entre os tratamentos. O mesmo afirmam Lal et al. (1999) e Lima et al. (2006).

A condutividade hidráulica de solo saturado tem se mostrado sensível à compactação. Em um Latossolo Vermelho Distrófico com diferentes níveis de compactação, Beutler et al. (2003) verificaram que o aumento da compactação reduziu a condutividade hidráulica; houve alto coeficiente de correlação negativo e significativo a 1% com a densidade do solo, e positivo com a porosidade total e macroporosidade. Nesse mesmo trabalho, correlação negativa, mas não significativa, foi verificada entre a microporosidade e a condutividade hidráulica, demonstrando, assim, que a microporosidade é um parâmetro com baixa sensibilidade à variação da compactação. Também foi observado que a condutividade hidráulica reduziu em torno de três vezes no maior estado de compactação, comparada com a condutividade hidráulica no baixo estado de compactação.

Em avaliação de infiltração de água, utilizando o método dos anéis concêntricos, não foi observada diferença na infiltração entre diferentes níveis de compactação; contudo, observou-se uma diferença entre os solos avaliados, em que os fatores principais foram o teor de argila, o manejo, o tempo de implantação do plantio direto e a rotação de culturas (SILVA, 2003). Esse autor verificou que a

rotação de culturas teve efeito benéfico sobre a infiltração de água no solo mesmo quando as condições eram de alta densidade.

Segundo Mesquita e Moraes (2004), as medidas da condutividade hidráulica do solo saturado e da macroporosidade são provenientes do mesmo espaço poroso; portanto, espera-se uma correlação entre essas variáveis. Outra afirmação dos autores é de que um “megaporo”, em uma amostra de solo, vai alterar pouco a macroporosidade, mas muito a condutividade hidráulica. Segundo a lei de Poiseville, a densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional ao quadrado de seu diâmetro; por isso, comum obter valores discrepantes para a condutividade devido a um “megaporo”, e a macroporosidade não apresentará essa tendência.

A escarificação do solo altera a sua estrutura e aumenta a macroporosidade e, conseqüentemente, a condutividade hidráulica (SILVA, 2003). Segundo esse autor, isso ocorre somente na camada onde o solo é revolvido; abaixo dessa camada a condutividade é menor, em função do não revolvimento do solo.

A drenagem da água e a aeração estão relacionadas com a macroporosidade, enquanto a retenção da água está ligada à microporosidade. Em dois solos, um Latossolo Vermelho Distrófico e um Latossolo Vermelho Distroférico, Silva (2003) ajustou em laboratório um modelo exponencial entre a condutividade hidráulica e a macroporosidade. Apesar de os modelos terem se ajustado de maneira significativa, os coeficientes de determinação obtidos foram baixos, em razão da alta variabilidade dos dados.

### 5.1.3 Curva característica de água no solo

A retenção de água no solo é afetada por vários fatores; entre estes, a textura do solo é um dos principais, por determinar a área de contato entre partículas sólidas do solo e a água e a proporção de poros de diferentes tamanhos. A estrutura do solo também afeta a retenção de água, pois os diferentes arranjos das partículas determinam a distribuição dos poros no solo (REICHARDT, 1990).

A tensão da água retida nos poros é inversamente proporcional ao tamanho destes. Assim, quanto menor o poro, maior a sucção necessária para esvaziá-lo (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Os diferentes sistemas de manejo são responsáveis pelas alterações dos atributos físicos dos solos. Essas alterações também são diferenciadas, devido aos diferentes graus de cobertura e de mobilização. Dessa forma, a dinâmica da água é

controlada pelo manejo dado ao solo. Tem-se observado maior retenção de água no solo sob plantio direto, principalmente em camadas superficiais e quando submetido ao processo de secagem (SALTON; MIELNICZUK, 1995).

Em um Argissolo Vermelho, Collares (2005) verificou que a compactação residual causada por quatro passadas de uma máquina de 10 Mg, um ano antes das determinações, reduziu a retenção de água até a tensão de 6 kPa para a camada de 0,10 a 0,15 m e até 33 kPa para a de 0,15-0,20 m, em relação ao plantio direto há 12 anos e escarificação. Logo após a compactação, esse autor observou que as camadas mais profundas (0,20-0,30 m) retiveram um menor conteúdo de água.

Na investigação do sistema água-solo-plantas, uma atenção considerável tem sido dada ao fator água, e a umidade do solo é um dos fatores limitantes para a produtividade. Estudando o regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal, Centurion e Andrioli (2000) observaram que o conteúdo de água nas tensões correspondentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente esteve relacionado positivamente com as frações mais finas do solo. Esses autores mencionaram que a matéria orgânica atuou indiretamente nesse processo por meio da estruturação.

Em um Latossolo Vermelho Distrófico e num Latossolo Vermelho Distroférico, Silva (2003) não observou diferença significativa na quantidade de água armazenada nos diferentes níveis de compactação e em área escarificada. Observou também que, com o aumento da densidade do solo, para os dois distintos solos, a água disponível diminuiu (quantidade de água compreendida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente).

O uso e o manejo do solo alteraram a porosidade e a distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho e, por consequência, houve considerável mudança no traçado da curva característica de água no solo (KLEIN; LIBARDI, 2002). Esses autores verificaram que, na condição de solo saturado, a umidade foi maior no solo sob mata ( $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), enquanto na tensão de 8 kPa, assumida para esse solo como condição de capacidade de campo, e no ponto de murcha permanente (1.500 kPa) os valores da umidade foram, respectivamente,  $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  superiores no irrigado.

## 5.2 Material e métodos

Os solos, o clima, os tratamentos, a coleta de amostras e as máquinas utilizadas no manejo das áreas estão descritos em material e métodos do capítulo 1.

### 5.1.4 Condutividade ao ar e hidráulica

Nas amostras de solo com estrutura preservada foram determinadas a condutividade ao ar e a condutividade hidráulica do solo saturado. As medidas de condutividade ao ar servem para informar se as plantas terão, na condição de umidade atual, a quantidade de ar necessária para o seu bom desenvolvimento, ao passo que a condutividade hidráulica de solo saturado informa sobre a capacidade de infiltração e transporte de água nas camadas de solo. De forma geral, em locais onde a precipitação for superior a 2.000 mm ano<sup>-1</sup>, pode haver excesso de umidade e deficiência de ar no solo para o adequado desenvolvimento das plantas (VOSSBRINK, 2005).

#### 5.1.4.1 Condutividade e permeabilidade do solo ao ar ( $k_l$ )

A condutividade do solo ao ar ( $k_l$ ) foi medida nas mesmas amostras utilizadas para a determinação da curva característica de água no solo. Foram usadas cinco repetições (cilindros com 0,058 m de diâmetro, 0,04 m de altura e volume de 0,000106 m<sup>3</sup>) em todos os usos e camadas. Essas amostras foram equilibradas nas tensões de 3 e 6 kPa, em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), e 15, 30 e 50 kPa, em placas porosas de cerâmica e náilon. Após o equilíbrio da tensão de água nas amostras, estas foram submetidas ao ensaio de permeabilidade ao ar. O fluxo de ar foi ajustado para gerar um gradiente de pressão de 0,1 kPa (Figura 14). Essa metodologia foi descrita por Peth (2004), e a classificação da permeabilidade ao ar foi feita conforme Kmoch e Hanus (1965).

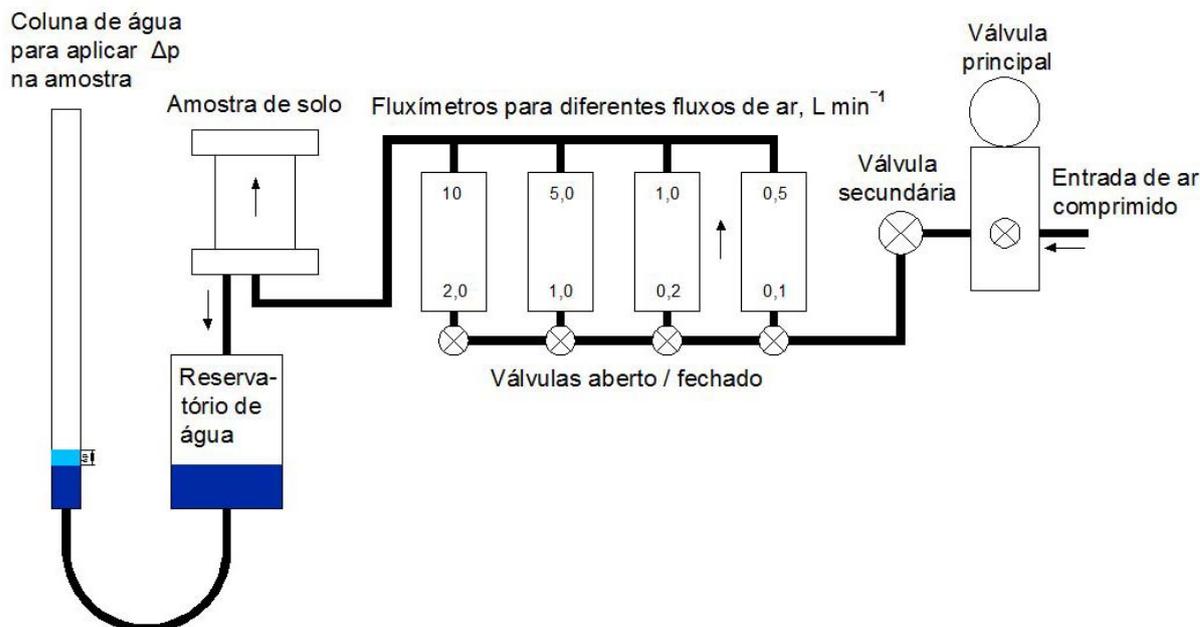


Figura 14 - Equipamento utilizado nas medidas de condutividade ao ar em amostras com estrutura de solo preservada. Fonte: Vossbrink (2005) e adaptado por Brandt (2008).

O equipamento é dividido em quatro setores e funciona da seguinte maneira:

- ✓ O ar comprimido que chega a 15 bar é rebaixado a uma pressão menor através da válvula principal de regulagem de fluxo.
- ✓ O fluxo de ar é regulado por uma válvula de precisão, o que torna possível a medida do ar que passa pelos fluxímetros, os quais vão de uma escala de 0,1  $L \text{ min}^{-1}$  até 10  $L \text{ min}^{-1}$ .
- ✓ O ar passa pela amostra e a leitura é feita em um dos fluxímetros.
- ✓ Com o auxílio de um manômetro, é feita a medida da diferença de pressão entre a pressão do ambiente e a do fluxo de ar do equipamento.
- ✓ A temperatura ambiente é medida com auxílio do termômetro várias vezes durante as análises.

Com a medida da quantidade de ar que passa pela amostra, é realizado o cálculo da condutividade do solo ao ar através da seguinte equação:

$$k_l = \rho_l \times g \times \frac{\Delta V \times l}{\Delta t \times \Delta p \times A} \quad [11]$$

em que:

- $k_l$  = condutividade ao ar do solo,  $\text{m s}^{-1}$ ;
- $\rho_l$  = densidade do ar na hora da medição,  $\text{kg m}^{-3}$ ;
- $g$  = aceleração da gravidade,  $9,81 \text{ m s}^{-2}$ ;
- $\Delta V$  = quantidade de ar que passa pela amostra no  $\Delta t$ ,  $\text{m}^3$ ;
- $\Delta t$  = variação do tempo, s;
- $l$  = altura da amostra, m;
- $\Delta p$  = pressão do ar que passa pela amostra, 0,1 kPa; e
- $A$  = área do cilindro,  $\text{m}^2$ .

Como a densidade do ar e a pressão atmosférica são dependentes da temperatura do ar, a densidade do ar foi corrigida para cada medição, por meio da seguinte equação:

$$\rho_l = \rho_n \times \left( \frac{T_n}{T} \times \frac{p}{p_n} \right) \quad [12]$$

em que:

- $\rho_l$  = densidade do ar,  $\text{kg m}^{-3}$ ;
- $\rho_n$  = densidade do ar,  $\text{kg m}^{-3}$ , sob condição padrão (1013 mbar, 273,15 °K);
- $p$  = pressão atmosférica durante a medição, mbar;
- $T$  = temperatura ambiente durante a medição, °C.

Após obtenção da condutividade do ar, foi calculada a permeabilidade ao ar através da seguinte equação:

$$k_a = k_l \times \frac{\eta}{\rho_l \times g} \quad [13]$$

em que:

- $k_a$  = permeabilidade ao ar,  $\mu\text{m}^2$ ;
- $k_l$  = condutividade ao ar do solo,  $\text{cm s}^{-1}$ ;
- $\eta$  = viscosidade do ar,  $\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ;
- $\rho_l$  = densidade do ar,  $\text{kg m}^{-3}$ ; e

$g$  = aceleração da gravidade,  $9,81 \text{ m s}^{-2}$ .

Foi estimado o espaço aéreo ou porosidade de aeração ( $\varepsilon_a$ ) pela diferença entre a porosidade total e o conteúdo volumétrico de água nas tensões específicas. A porosidade obstruída ( $\varepsilon_b$ ) foi estimada pela seguinte equação:

$$\varepsilon_b = 10^{\left(\frac{-\log M}{N}\right)} \quad [14]$$

O índice de continuidade de poros ( $N$ ) foi estimado pela equação de Ball et al. (1988), a partir da relação entre  $k_a$  e  $\varepsilon_a$ :

$$N = \frac{k_a}{\varepsilon_a} \quad [15]$$

em que  $k_a$  e  $\varepsilon_a$  foram relacionados por um modelo exponencial, também modificado por Ball et al. (1988), como segue:

$$\log(K_a) = \log(M) + N \times \log(\varepsilon_a) \quad [16]$$

em que  $M$  e  $N$  são parâmetros empíricos.

#### 5.1.4.2 Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado ( $k_s$ ) serve como parâmetro indicador da continuidade e do diâmetro dos poros. A condutividade hidráulica é muito sensível à diminuição e à tortuosidade dos poros; assim, pode ser afetada no preparo das amostras. Por esse motivo, nos três distintos solos e em cada camada, foram feitas cinco repetições com os cilindros de 0,058 m de diâmetro, 0,04 m de altura e 0,000106 m<sup>3</sup> de volume.

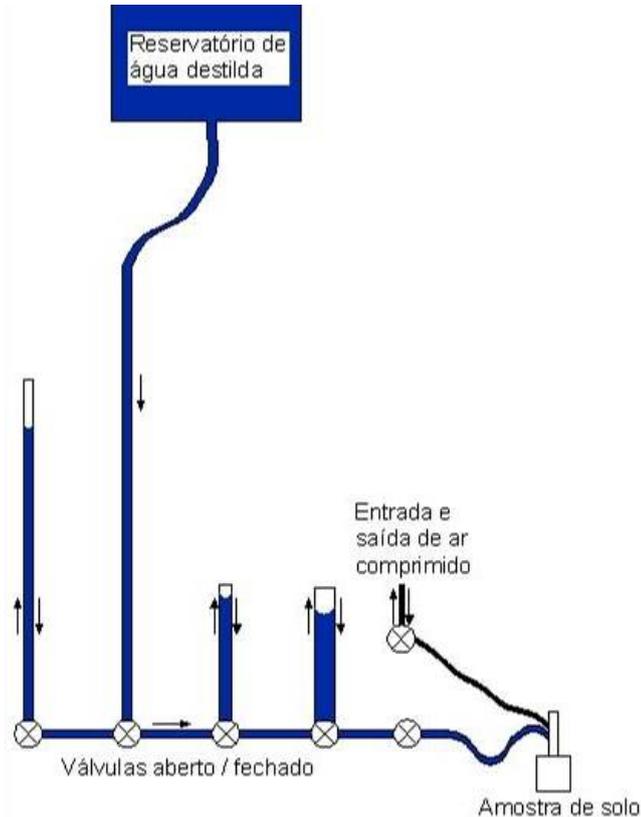
A  $k_s$  foi determinada com um permeâmetro de carga variável (HARTGE, 1967), conforme esquema da Figura 15. As amostras foram colocadas em uma bandeja e saturadas por 24 horas por capilaridade. Após a saturação total das amostras, elas foram submersas com água até o nível desejado. Para o cálculo da condutividade hidráulica em condição de carga variável, foi utilizada a equação de Darcy modificada.

$$k_s = \frac{a \times h}{t \times A} \times \ln \frac{h_0}{h_1} \quad [17]$$

em que:

$k_s$  = condutividade hidráulica saturada,  $\text{cm s}^{-1}$ ;

- $a$  = área do tubo,  $\text{cm}^2$ ;  
 $h$  = altura da amostra,  $\text{cm}$ ;  
 $A$  = área da amostra,  $\text{cm}^2$ ;  
 $h_0, h_1$  = altura da carga hidráulica inicial e final no tubo,  $\text{cm}$ ;  
 $t$  = tempo decorrido entre  $h_0$  e  $h_1$ ,  $\text{s}$ .



**Figura 15 - Esquema do permeômetro de carga variável utilizado na determinação da condutividade hidráulica do solo saturado.**

De acordo com o U.S. Bureau of Plant Industry and Agricultural Engineering, os solos podem ser classificados, segundo a condutividade hidráulica do solo saturado, em sete classes, conforme Tabela 9.

**Tabela 9 - Classes de condutividade hidráulica do solo saturado**

Classe	Condutividade hidráulica do solo saturado ( $k_s$ ), $\text{mm h}^{-1}$
Muito lenta	< 1,3
Lenta	1,3 a 5,1
Moderadamente lenta	5,1 a 20
Moderada	20 a 63
Moderadamente rápida	63 a 127
Rápida	127 a 254
Muito rápida	> 254

### 5.1.5 Curva característica de água no solo

A curva característica de água no solo foi determinada nas mesmas amostras com estrutura preservada utilizadas para determinar a condutividade ao ar e hidráulica (cinco repetições). As amostras foram saturadas por 24 horas e depois submetidas às tensões de 3 e 6 kPa, em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), e de 15, 30 e 50 kPa em placas porosas de cerâmica e náilon. Em todos os potenciais foi calculada a umidade volumétrica. Após a aplicação do último potencial, as amostras foram colocadas na estufa a 105 °C durante 24 horas, para secar. Posteriormente, as amostras foram pesadas para obtenção da massa de solo seco. A determinação da umidade volumétrica na tensão de 1.500 kPa foi feita no Laboratório de Solos da Universidade de Kiel, na Alemanha (amostras enviadas), pelo método descrito por Hartge e Horn (1989). As curvas foram ajustadas aos pares de tensão e umidade pelo *software Soil Water Retention Curve - SWRC* (DOURADO NETO et al., 2001), usando o modelo de van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980), conforme a equação:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi_m)^n]^m} \quad [18]$$

em que:

$\theta$  = umidade volumétrica,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\theta_r$  = umidade volumétrica na tensão de 1500 kPa,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\theta_s$  = umidade volumétrica do solo saturado,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\Psi_m$  = potencial mátrico da água no solo, kPa; e

$\alpha, m, n$  = coeficientes empíricos de ajuste da equação.

### 5.1.6 Análise estatística

Na análise estatística foi utilizado o pacote estatístico SAS, onde foram feitas as comparações de médias pela diferença mínima significativa (DMS) com 5% de significância.

## 5.3 Resultados

### 5.1.7 Latossolo

#### 5.1.7.1 Condutividade e permeabilidade do solo ao ar

Na Figura 16 é apresentada a relação entre a permeabilidade do solo ao ar e a tensão da água no solo, nas quatro camadas avaliadas. Na camada de 0,00-0,07 m, nas quatro tensões, houve diferença significativa entre a mata nativa e o plantio direto. Observa-se que a permeabilidade do solo ao ar, para a mata nativa, praticamente não teve incremento com o aumento da tensão de sucção da água, mostrando que a maioria dos macroporos torna-se vazia na tensão de 6 kPa. Acima de 6 kPa também houve retirada da água do solo, liberando mais poros. No entanto, o aumento na  $k_a$  foi pequeno. No plantio direto, com o aumento da tensão de sucção da água, a permeabilidade ao ar aumentou em todas as tensões. O solo sob plantio direto libera maior quantidade de água em tensões mais elevadas.

A segunda camada (0,10-0,15 m) não apresentou diferença significativa nas tensões de água aplicadas. Observa-se que, com o aumento da tensão da água no solo, a permeabilidade ao ar vai aumentando, pois, quanto mais poros vazios no solo, maior o fluxo do ar.

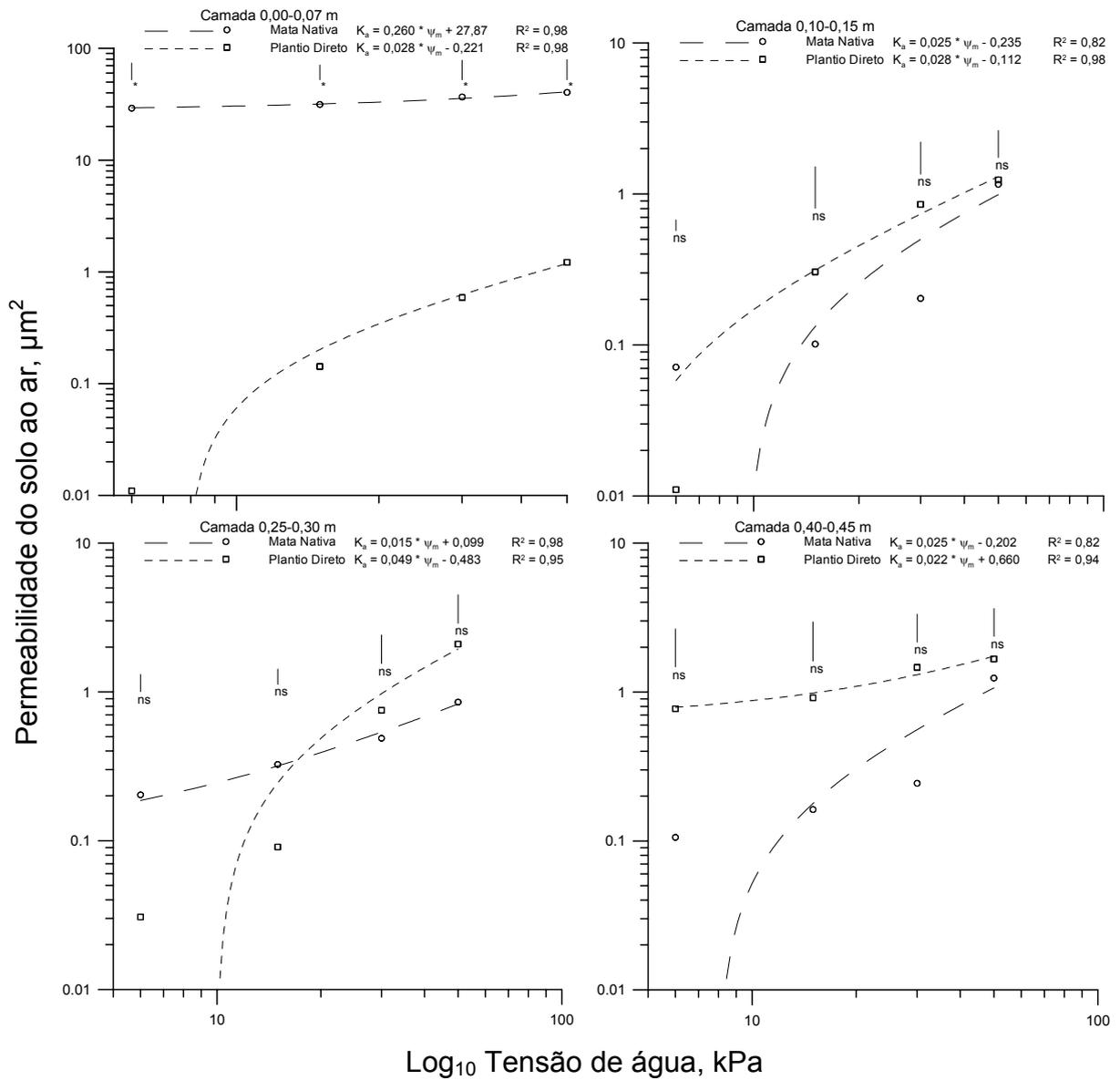
Na camada de 0,25-0,30 m não foram encontradas diferenças significativas, porém nela foi observado que nas tensões de 30 e 50 kPa houve inversão da permeabilidade do ar no solo. Nessas tensões, o PD apresentou maior permeabilidade ao ar.

A última camada (0,40-0,45 m) não apresentou diferença significativa em nenhuma das quatro tensões aplicadas.

As relações entre a permeabilidade do solo ao ar com o espaço aéreo do solo estão apresentadas na Figura 17. Em todas as camadas a relação foi positiva; quanto maior o espaço aéreo, maior é a permeabilidade do solo ao ar.

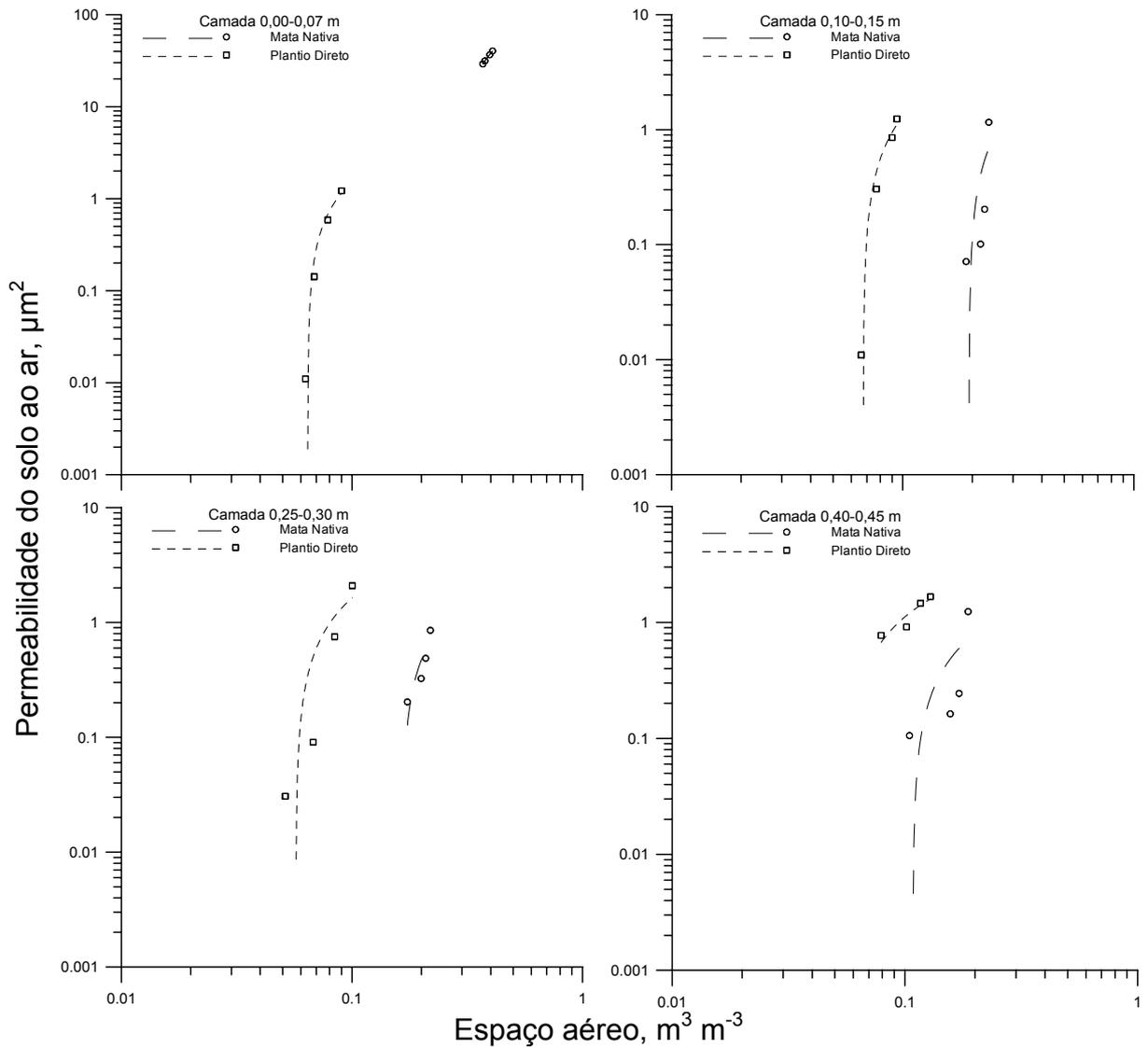
Na camada de 0,00-0,07 m observou-se grande diferença entre a mata nativa e o plantio direto. Tanto o espaço aéreo como a permeabilidade ao ar foram maiores na MN.

Na camada de 0,40-0,45 m, observa-se que no PD o espaço aéreo e consequentemente a permeabilidade do solo ao ar foram maiores do que na MN.



**Figura 16 - Relação entre a permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) e a tensão da água no Latossolo, em quatro camadas, sob mata nativa e plantio direto.**

As linhas verticais indicam a diferença mínima significativa pelo teste DMS (5%) e comparam as médias dos sistemas de uso do solo em cada tensão. \* = significativo; ns = não significativo.



**Figura 17 - Relação entre o espaço aéreo ( $\epsilon_a$ ) e a permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) para o Latossolo, em quatro camadas do solo sob plantio direto e mata nativa.**

Os parâmetros de regressão ( $\log M$  e  $N$ ) e a porosidade obstruída ( $\epsilon_b$ ) estão apresentados na Tabela 10 para a mata nativa e plantio direto, nas quatro camadas avaliadas. O maior valor obtido de  $\epsilon_b$  foi de 5,61% (camada de 0,00-0,07 m) na mata nativa; mesmo assim, esta ainda tem a maior porosidade de aeração e condutividade.

**Tabela 10 - Parâmetros de regressão ( $\log M$  e  $N$ ) e porosidade obstruída para o Latossolo sob mata nativa e plantio direto, nas quatro camadas**

<b>Preparo</b>	<b><math>\log M</math></b>	<b><math>N</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>\varepsilon_b</math></b> <b>Vol. %</b>
	-	-	-	
<b>Camada de 0,00-0,07 m</b>				
<b>MN</b>	142,41	113,86	0,99	5,61
<b>PD</b>	9,34	3,40	0,97	0,18
<b>Camada de 0,10-0,15 m</b>				
<b>MN</b>	5,75	3,50	0,44	2,28
<b>PD</b>	8,90	3,30	0,95	0,20
<b>Camada de 0,25-0,30 m</b>				
<b>MN</b>	4,45	2,47	0,75	1,58
<b>PD</b>	8,35	2,92	0,77	0,14
<b>Camada de 0,40-0,45 m</b>				
<b>MN</b>	2,92	1,31	0,39	0,59
<b>PD</b>	5,46	1,88	0,87	0,12

#### 5.1.7.2 Condutividade hidráulica do solo saturado

Os valores da condutividade hidráulica do solo saturado ( $k_s$ ) para o Latossolo, sob MN e PD, estão apresentados na Figura 18.

Na camada de 0,00-0,07 m observa-se uma diferença significativa. Para a mata nativa o valor obtido de  $k_s$  foi de  $754 \text{ mm h}^{-1}$ , classificada como muito rápida; o solo sob plantio direto teve uma  $k_s$  de  $2,5 \text{ mm h}^{-1}$ , classificada como lenta. A grande diferença da  $k_s$  da mata nativa em relação ao plantio direto se deve ao fato de que, na superfície do solo da mata nativa há grande quantidade de material orgânico proveniente da queda de folhas e galhos das árvores. Solos com maior teor de matéria orgânica apresentam agregados maiores e mais estáveis, sendo mais bem estruturados.

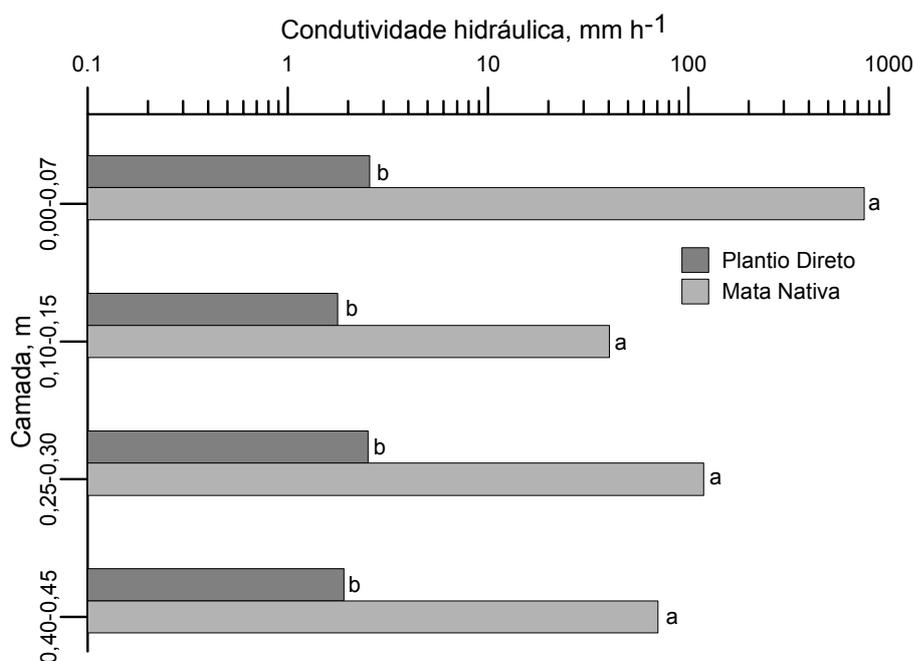
O acúmulo de matéria orgânica também ocorre no solo sob PD. Contudo, devido ao tráfego das máquinas e implementos agrícolas para o plantio, manejo e colheita das culturas, reduzindo o volume dos macroporos, e à maior incidência da chuva e do sol sobre os resíduos, estes acabam se deteriorando mais rapidamente e são incorporados ao solo, não tendo assim um efeito tão acentuado na  $k_s$ .

Na camada de 0,10-0,15 m houve diferença significativa, devido à grande redução da  $k_s$  sob mata nativa, de 754 mm h<sup>-1</sup> para 40 mm h<sup>-1</sup>, sendo esta classificada como moderada. No plantio direto também houve redução da  $k_s$  de 2,5 para 1,8 mm h<sup>-1</sup>, ambas classificadas como lenta. Nesta camada foi verificado o menor valor de  $k_s$ , pois é nela que ocorre o maior efeito de compactação em função do tráfego das máquinas agrícolas (ASSIS; LANÇAS, 2005).

Na camada de 0,25-0,30 m houve diferença significativa, devido ao aumento da  $k_s$  na mata nativa na camada de 0,10-0,15 m, de 40 para 119 mm h<sup>-1</sup>, classificada como moderadamente rápida. Isso pode ser explicado pela presença de raízes em grande quantidade avaliadas de forma visual, o que dificultou a coleta das amostras nos anéis e, conseqüentemente, desestruturando às vezes a amostra. No plantio direto também houve aumento na camada de 0,25-0,30 m da  $k_s$  de 1,8 para 2,5 mm h<sup>-1</sup>, classificada como lenta.

Na camada de 0,40-0,45 m a  $k_s$  diferiu significativamente, sendo que na mata nativa a  $k_s$  foi de 70 mm h<sup>-1</sup>, classificada como moderadamente rápida, e, no plantio direto, a  $k_s$  foi de 1,9 mm h<sup>-1</sup>, classificada como lenta.

De modo geral, analisando somente a  $k_s$ , observa-se que o tráfego das máquinas agrícolas alterou essa propriedade física do solo nas quatro camadas avaliadas.



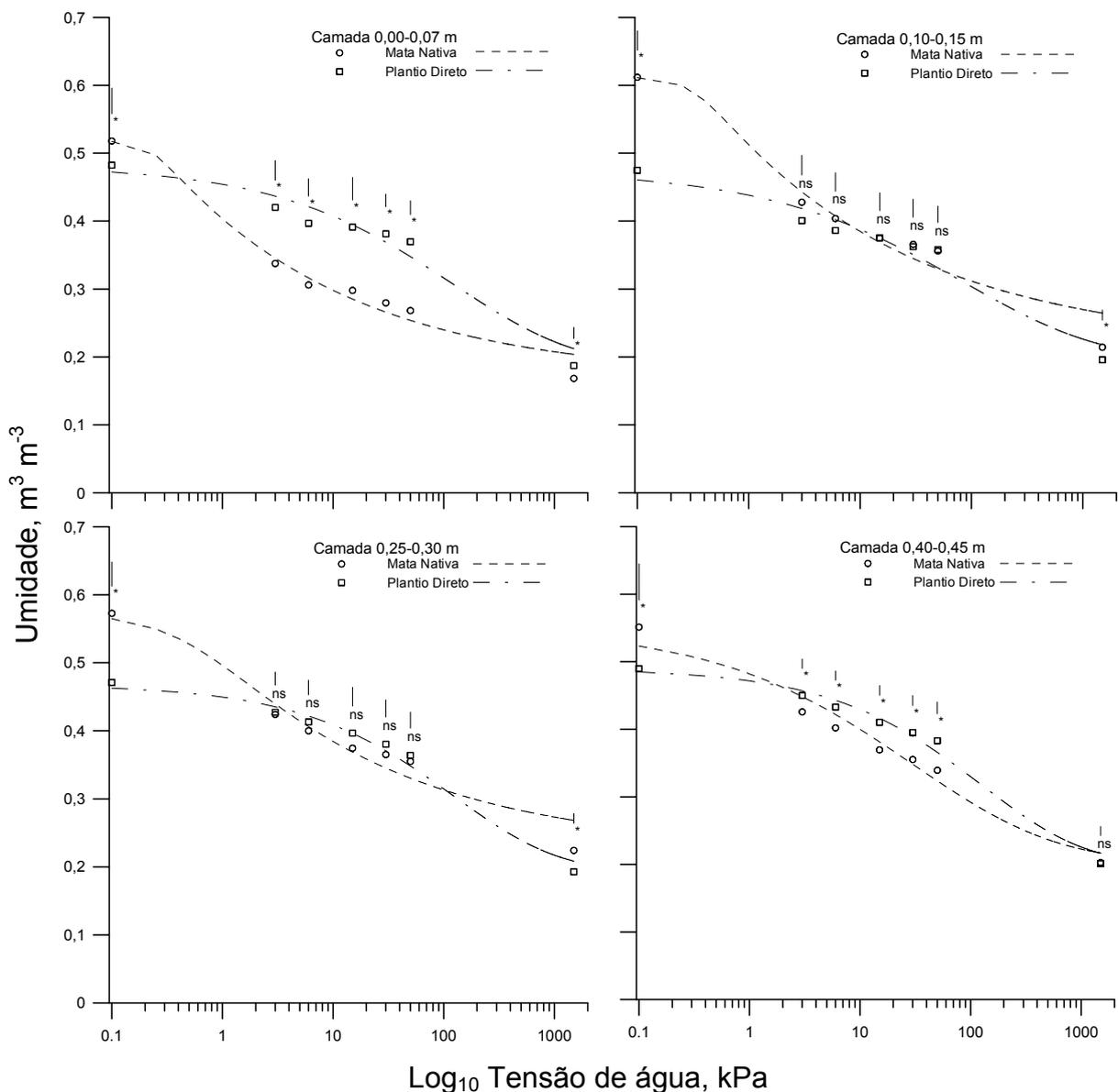
**Figura 18 - Condutividade hidráulica saturada ( $k_s$ ) nas quatro camadas avaliadas do Latossolo sob mata nativa e plantio direto.**

As colunas seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de DMS (5%) e comparam as médias dos sistemas de uso em cada camada.

### 5.1.7.3 Curva característica de água do solo

Os dados observados e o ajuste das curvas características da água no solo pela equação de van Genuchten para o Latossolo estão apresentados na Figura 19.

Para a camada de 0,00-0,07 m houve diferença significativa em todas as tensões de água no solo. É importante ressaltar que, na condição de saturação, o solo sob mata nativa apresentou maior conteúdo de água.



**Figura 19 - Curva característica de água no Latossolo sob mata nativa e plantio direto, em que os símbolos são os valores observados e as linhas os valores ajustados por Van Genuchten, em quatro camadas.**

As linhas verticais indicam a diferença mínima significativa pelo teste DMS (5%) e comparam as médias dos sistemas de uso do solo em cada tensão. \* = significativo; ns = não significativo.

A partir da tensão de 3 kPa, o solo sob plantio direto reteve mais água a uma mesma tensão. Isso se deve ao fato de o solo sob mata nativa ter maior volume de macroporos, sendo facilmente esvaziados, como pode ser observado na camada de 0,00-0,07 m (Figura 19). Na tensão de 1.500 kPa a diferença diminui, visto que a retenção de água em tensões elevadas é função mais da granulometria do que da estrutura.

Nas camadas de 0,10-0,15 e 0,25-0,30 m houve diferença significativa somente na saturação e na tensão de 1.500 kPa. Na camada de 0,40-0,45 m não houve diferença significativa somente na tensão de 1.500 kPa.

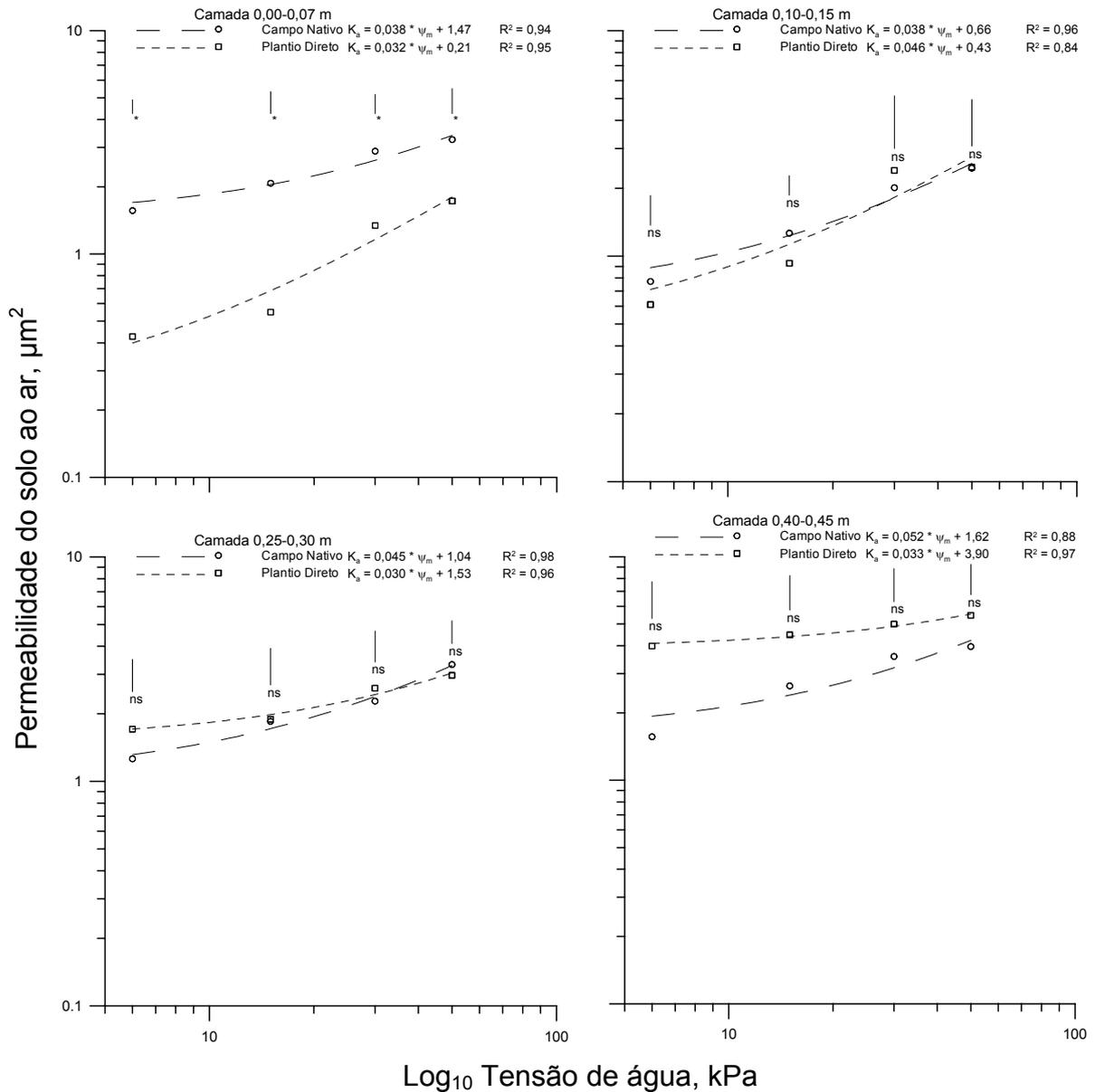
### 5.1.8 Argissolo 1

#### 5.1.8.1 Condutividade e permeabilidade do solo ao ar

A relação entre a permeabilidade do solo ao ar e a tensão da água no solo sob campo nativo e plantio direto, nas quatro camadas avaliadas, é apresentada na Figura 20.

Na camada de 0,00-0,07 m, a permeabilidade apresentou diferença significativa entre o campo nativo e o plantio direto nas quatro tensões de água. A permeabilidade do solo ao ar aumentou com o aumento na tensão da água, o que é esperado, pois, quanto mais poros sem água, maior a permeabilidade do solo ao ar.

As camadas de 0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m não apresentaram diferenças significativas entre o campo nativo e o plantio direto. Nas camadas de 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m, com o aumento da tensão de água no solo, a permeabilidade deste ao ar não teve um aumento acentuado, pois os poros com maior diâmetro foram esvaziados a baixas tensões.



**Figura 20 - Relação entre a permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) e a tensão da água no solo para o Argissolo 1, em quatro camadas, sob campo nativo e plantio direto.**

As linhas verticais indicam a diferença mínima significativa pelo teste DMS (5%) e comparam as médias dos sistemas de uso do solo em cada tensão. \* = significativo; ns = não significativo.

Na Figura 21 são apresentadas as relações entre a permeabilidade ao ar e o espaço aéreo do solo; em todas das camadas avaliadas, a relação foi positiva. Nas camadas de 0,00-0,07 e 0,10-0,15 m o espaço aéreo é menor do que nas de 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m, tanto no CN como no PD.

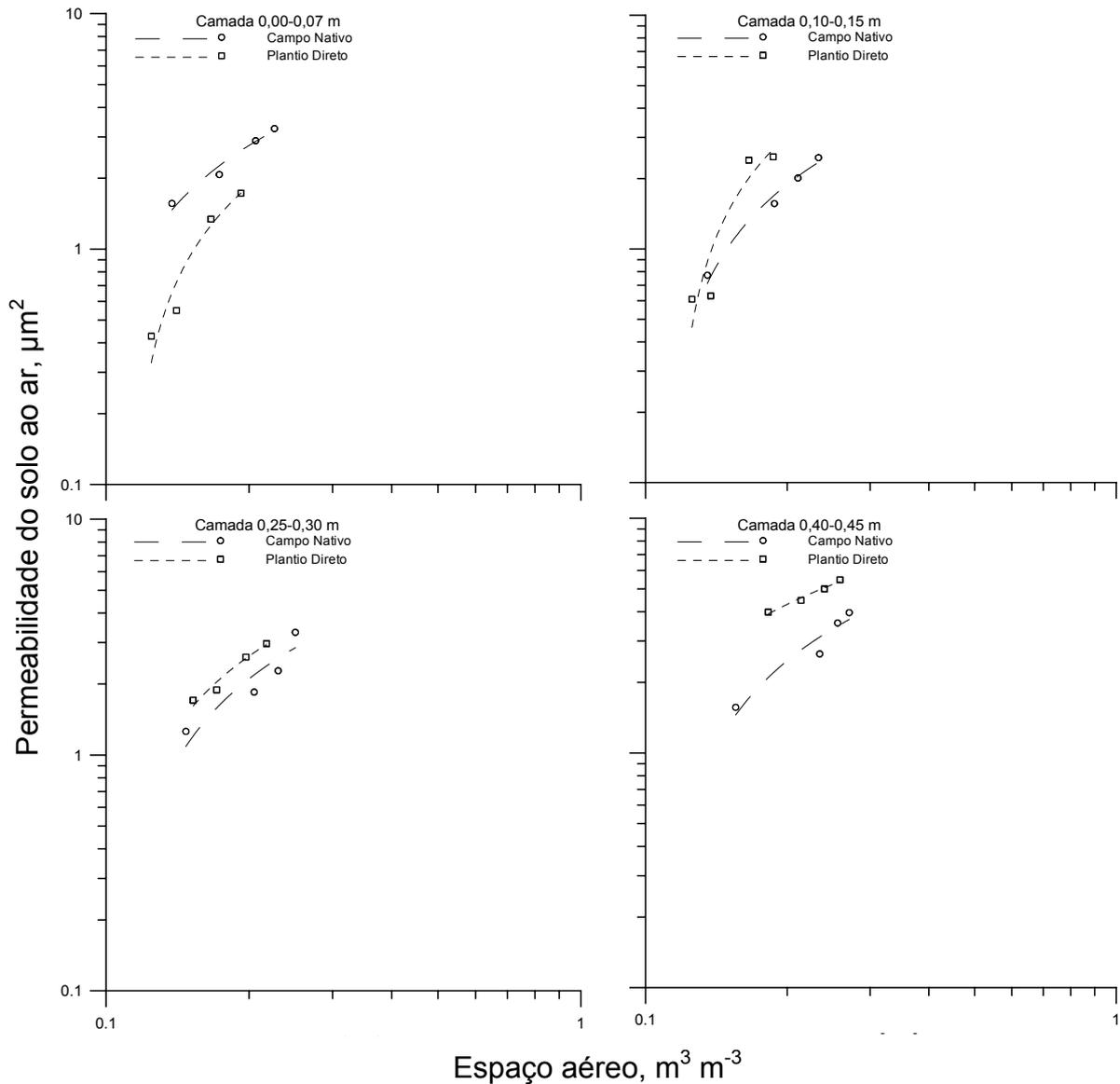


Figura 21 - Relação entre o espaço aéreo ( $\epsilon_a$ ) e a permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) para o Argissolo 1, nas quatro camadas avaliadas, sob plantio direto e campo nativo.

Os parâmetros de regressão ( $\log M$  e  $N$ ) e a porosidade obstruída ( $\epsilon_b$ ) estão apresentados na Tabela 11 para o campo nativo e plantio direto, nas quatro camadas avaliadas. O menor valor obtido de  $\epsilon_b$  foi na camada de 0,00-0,07 m no campo nativo, e mesmo assim ele apresentou a maior porosidade de aeração e permeabilidade.

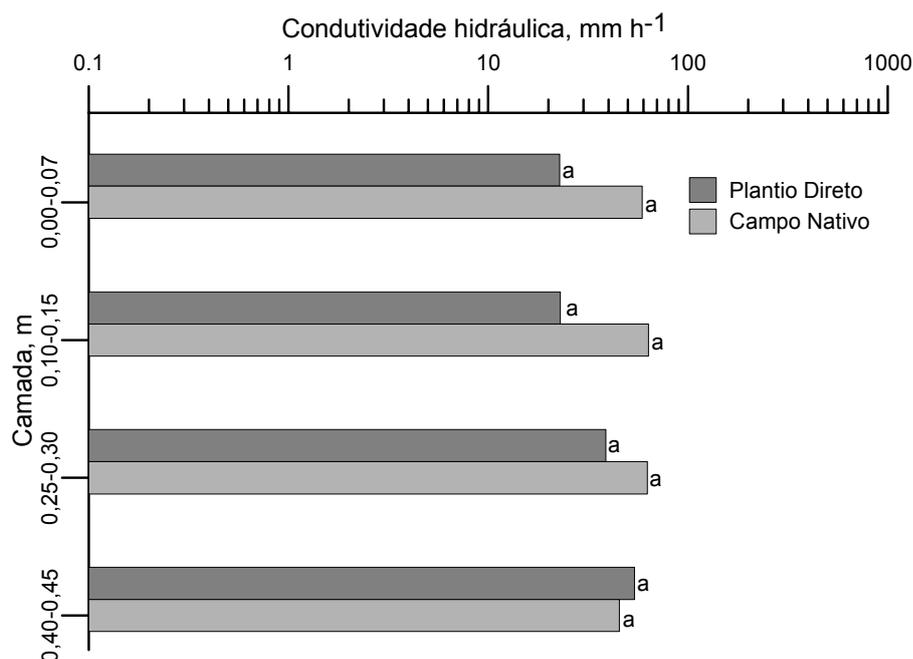
**Tabela 11 - Parâmetros de regressão ( $\log M$  e  $N$ ) e porosidade obstruída para o Argissolo 1 sob campo nativo (CN) e plantio direto (PD), nas quatro camadas**

Uso	$\log M$	$N$	$R^2$	$\varepsilon_b$ Vol. %
	-	-	-	
<b>Camada de 0,00-0,07 m</b>				
CN	8,3	3,45	0,97	0,39
PD	7,05	3,22	0,96	0,65
<b>Camada de 0,10-0,15 m</b>				
CN	6,73	3,01	0,98	0,58
PD	12,00	5,56	0,90	0,69
<b>Camada de 0,25-0,30 m</b>				
CN	7,46	3,33	0,80	0,58
PD	8,63	3,73	0,97	0,49
<b>Camada de 0,40-0,45 m</b>				
CN	9,00	4,06	0,91	0,61
PD	11,00	4,16	0,98	0,23

#### 5.1.8.2 Condutividade hidráulica do solo saturado

Na Figura 22 é apresentada a  $k_s$  para o Argissolo 1 sob campo nativo e plantio direto.

No Argissolo 1 não foram verificadas diferenças significativas entre os usos em nenhuma camada avaliada. Isso pode ser explicado pelo alto CV, o qual ficou em 91, 72, 37 e 59%, respectivamente para as camadas de 0,00-0,07, 0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45. Esses altos coeficientes de variação se devem à grande variabilidade espacial do solo; para reduzir o CV nas análises da  $k_s$ , seria necessário aumentar o número de repetições, o que tornaria o trabalho inviável. No PD a condutividade hidráulica aumentou com o incremento da profundidade, enquanto no CN essa tendência não ocorreu.



**Figura 22 - Condutividade hidráulica do solo saturado ( $k_s$ ) nas quatro camadas do Argissolo 1 sob campo nativo e plantio direto.**

As colunas seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de DMS (5%) e comparam as médias dos usos em cada camada.

### 5.1.8.3 Curva característica de água do solo

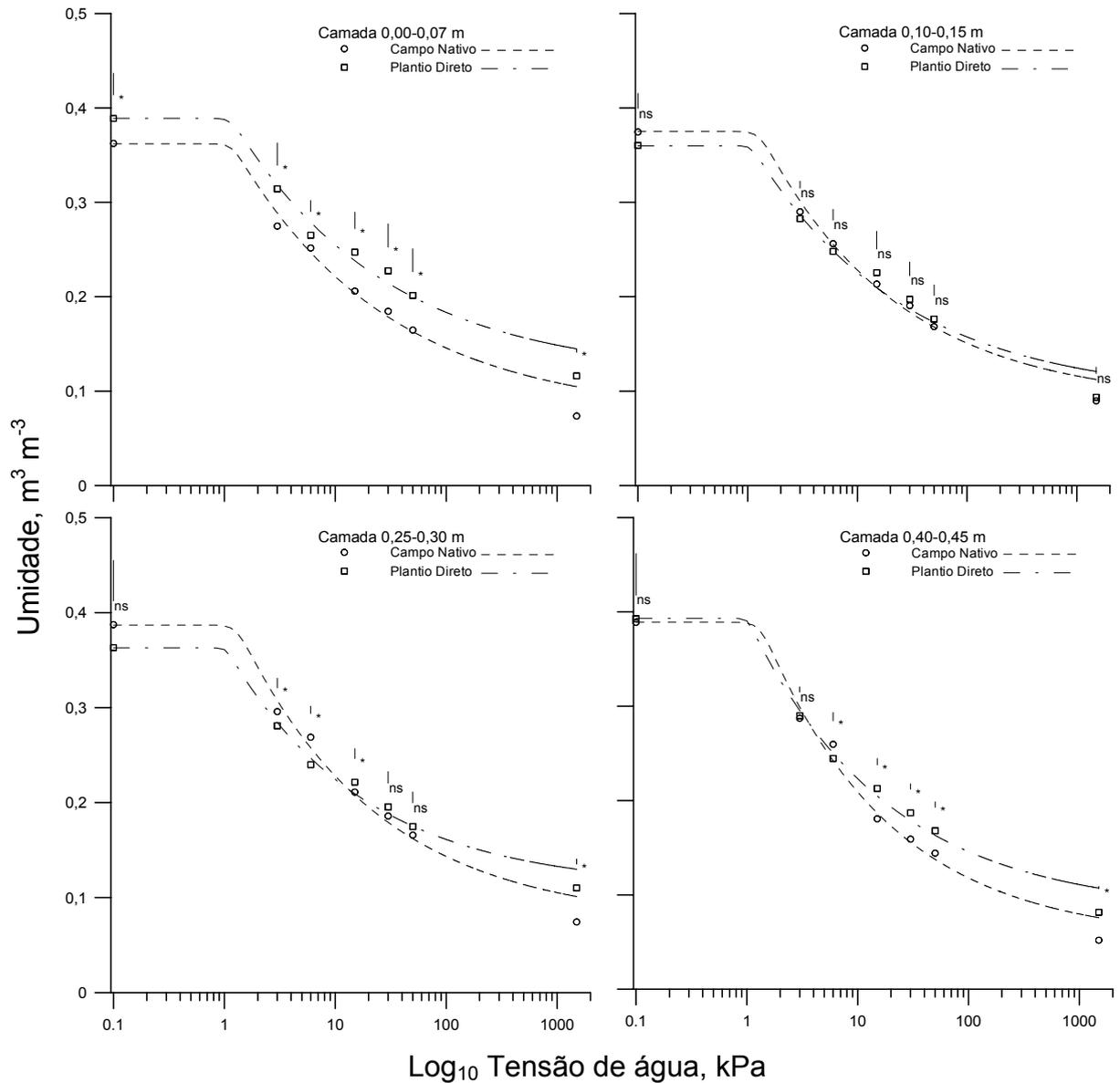
Na camada de 0,00-0,07 m foram verificadas diferenças significativas entre os dois sistemas de uso, nas sete tensões de água no solo (Figura 23). Nesta camada, o PD retém maior volume de água em todas as tensões, o que deve à redução do volume de macroporos e ao conseqüente aumento do volume de microporos (Tabela 6).

Na camada de 0,10-0,15 m, os dois usos do solo não apresentaram diferenças significativas em nenhuma das tensões aplicadas. Como nesta camada ocorre o maior acúmulo das tensões geradas pelas máquinas agrícolas, era esperada uma diferença significativa, o que acabou não acontecendo.

A camada de 0,25-0,30 m mostrou diferenças significativas nas tensões de 3, 6, 15 e 1.500 kPa; nas tensões de 3 e 6 kPa, o solo sob campo nativo reteve maior volume de água; e nas tensões de 15 e 1.500 kPa houve inversão, ou seja, o plantio direto reteve maior volume de água.

Na camada de 0,40-0,45 m não houve diferença significativa entre os dois usos apenas nas tensões de 0 e 3 kPa. É importante ressaltar que na tensão de 1.500 kPa, nas camadas de 0,00-0,07, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m, o solo sob plantio

direto reteve mais água, o que é positivo, pois as plantas poderão resistir por mais tempo ao déficit hídrico, se a água retida no solo estiver a uma tensão do que aquela na a planta consegue extrair.



**Figura 23 - Curva característica de água no Argissolo 1 sob mata nativa e plantio direto, em quatro camadas.**

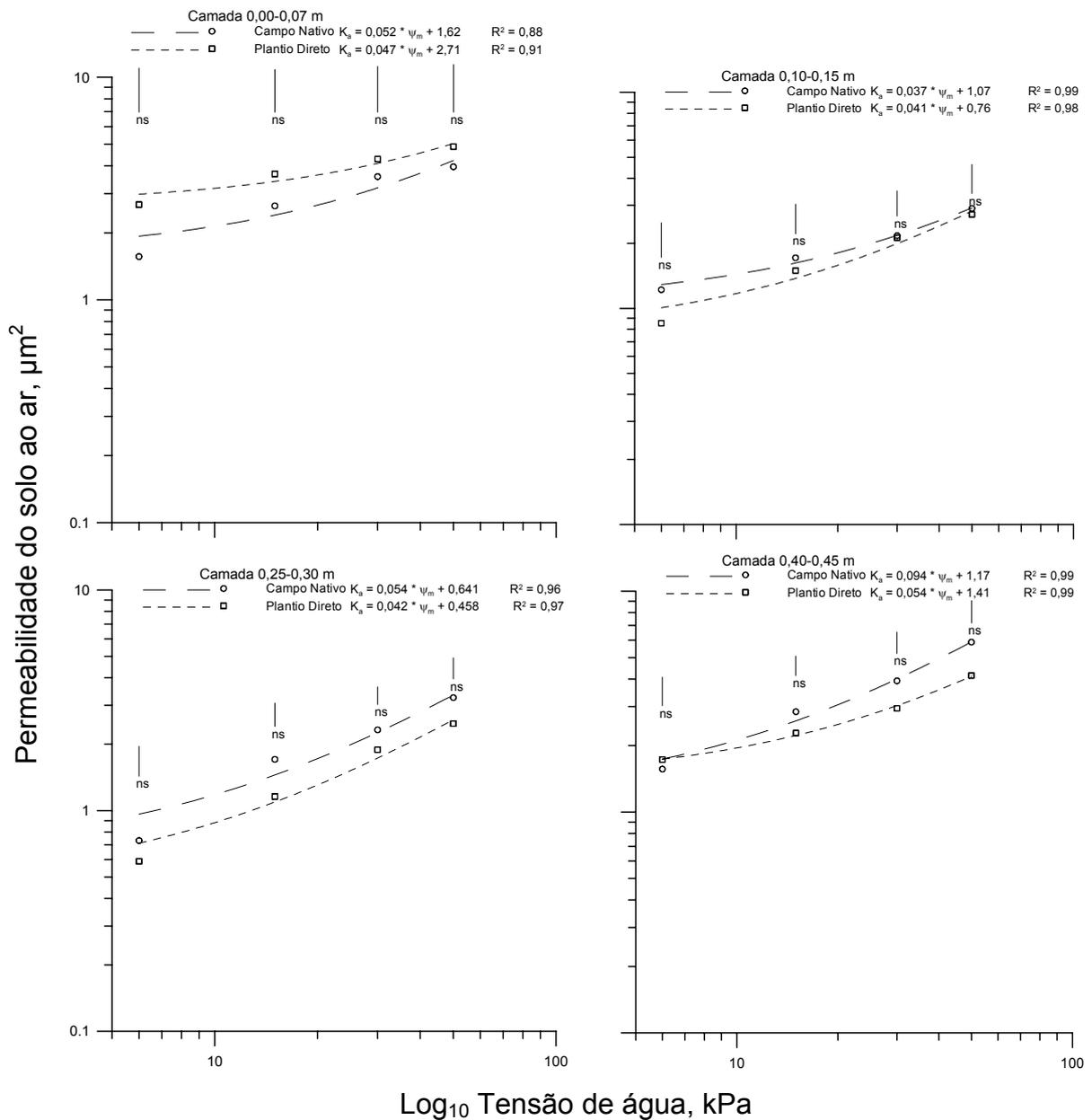
As linhas verticais indicam a diferença mínima significativa pelo teste DMS (5%) e comparam as médias dos sistemas de uso do solo em cada tensão. \* = significativo; ns = não significativo.

### 5.1.9 Argissolo 2

#### 5.1.9.1 Condutividade e permeabilidade do solo ao ar

Para o Argissolo 2, não foi detectada diferença significativa entre CN e PD em nenhuma camada (Figura 24). Na camada de 0,00-0,07 m, com o aumento da tensão de água no solo, não houve aumento expressivo da permeabilidade do solo ao ar, inferindo-se que os macroporos são praticamente todos esvaziados à tensão de 6 kPa, e aqueles que estão esvaziando em tensões maiores não são funcionais, ou seja, não são capazes de conduzir ar.

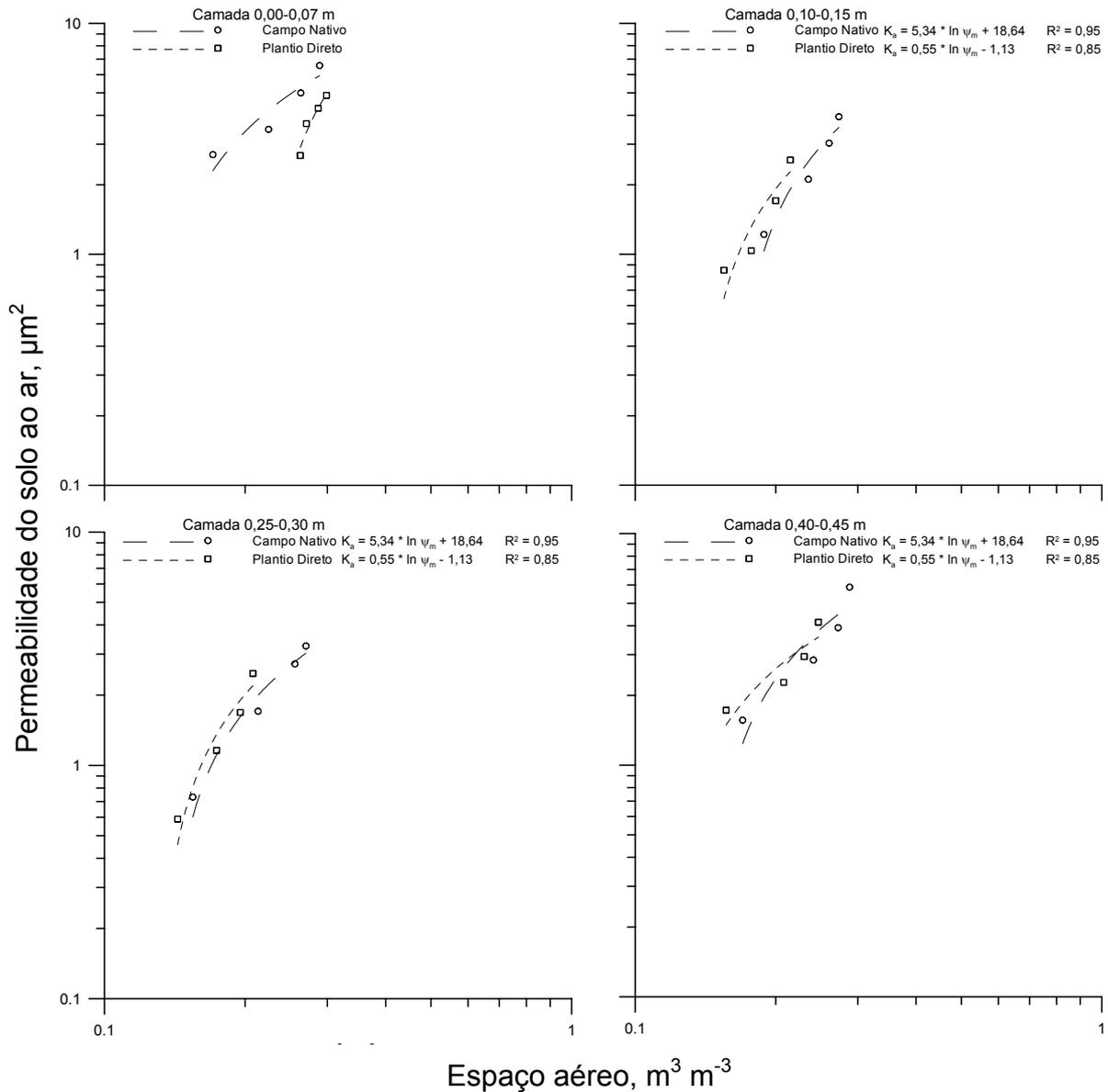
Nas demais camadas, para esvaziar um maior número de poros, é necessário aplicar maior tensão no solo, pois a água é mais difícil de ser extraída nessas camadas. Isso pode ocorrer em razão da diminuição do tamanho dos poros, devido ao tráfego das máquinas agrícolas para plantio, manejo e colheita das culturas no PD. Já no CN isso pode ocorrer em virtude do pequeno volume de raízes observado nessas camadas, não formando poros grandes com o apodrecimento delas.



**Figura 24 - Relação entre a permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) e a tensão da água no solo para o Argissolo 2, em quatro camadas, sob campo nativo e plantio direto.**

As linhas verticais indicam a diferença mínima significativa pelo teste DMS (5%) e comparam as médias dos sistemas de uso do solo em cada tensão. \* = significativo; ns = não significativo.

As relações entre a permeabilidade do solo ao ar e o espaço aéreo do solo estão apresentadas na Figura 25. Observa-se que em todas as camadas as relações foram positivas.



**Figura 25 - Relação entre o espaço aéreo ( $\epsilon_a$ ) e permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) para o Argissolo 2, nas quatro camadas avaliadas, sob Plantio Direto e Campo Nativo.**

Os parâmetros de regressão ( $\log M$  e  $N$ ) e a porosidade obstruída ( $\epsilon_b$ ) são apresentados na Tabela 12, para o CN e PD, nas quatro camadas avaliadas. O maior valor obtido de  $\epsilon_b$  foi de 3,01% (camada de 0,00-0,07 m), no CN, e este, mesmo assim, apresentou a maior porosidade de aeração e permeabilidade ao ar.

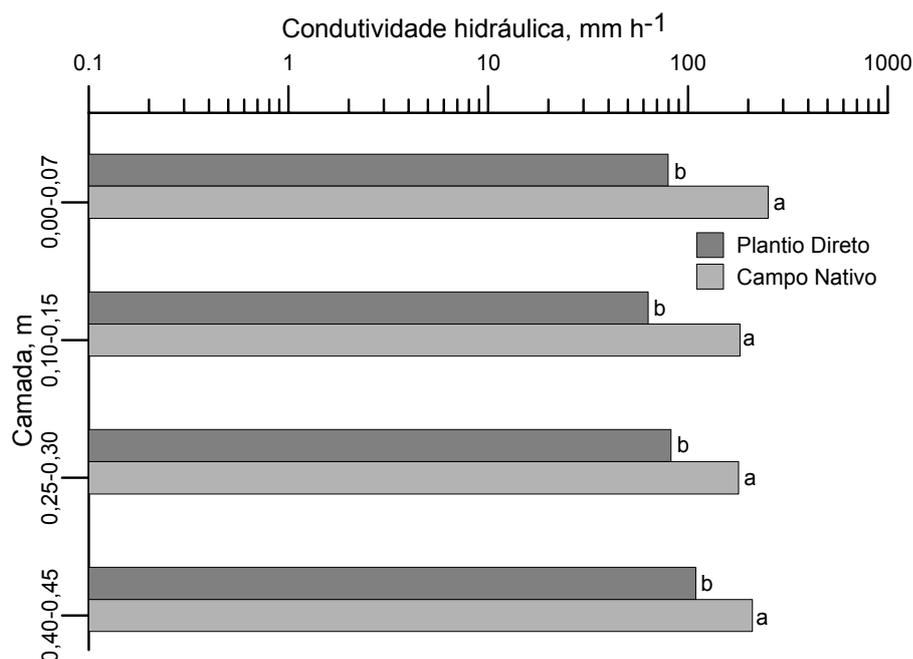
**Tabela 12 - Parâmetros de regressão e porosidade obstruída para o Argissolo 2 sob campo nativo (CN) e plantio direto (PD), em quatro camadas**

<b>Preparo</b>	<b><math>\log M</math></b>	<b><math>N</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b><math>\varepsilon_b</math></b> <b>Vol. %</b>
	-	-	-	
		<b>Camada de 0,00-0,07 m</b>		
<b>CN</b>	14,53	6,92	0,87	0,79
<b>PD</b>	23,98	15,76	0,94	3,01
		<b>Camada de 0,10-0,15 m</b>		
<b>CN</b>	12,35	6,79	0,90	1,52
<b>PD</b>	9,96	5,00	0,86	1,02
		<b>Camada de 0,25-0,30 m</b>		
<b>CN</b>	8,71	4,35	0,96	0,99
<b>PD</b>	9,56	4,69	0,90	0,92
		<b>Camada de 0,40-0,45 m</b>		
<b>CN</b>	13,41	6,86	0,79	1,11
<b>PD</b>	9,96	4,57	0,77	0,66

#### 5.1.9.2 Condutividade hidráulica do solo saturado

Os valores da  $k_s$  para o Argissolo 2 estão apresentados na Figura 26. No Argissolo 2, o tráfego das máquinas agrícolas alterou a  $k_s$  em todas as camadas. Nesse caso, os coeficientes de variação (38, 38, 22 e 25% respectivamente para as camadas de 0,00-0,07, 0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m) foram inferiores aos do Argissolo 1.

Pode-se observar que na camada de 0,00-0,07 e 0,10-0,15 m, sob o PD, foi verificada a menor  $k_s$ , o que novamente mostra que ela é a camada mais alterada pelo tráfego das máquinas.



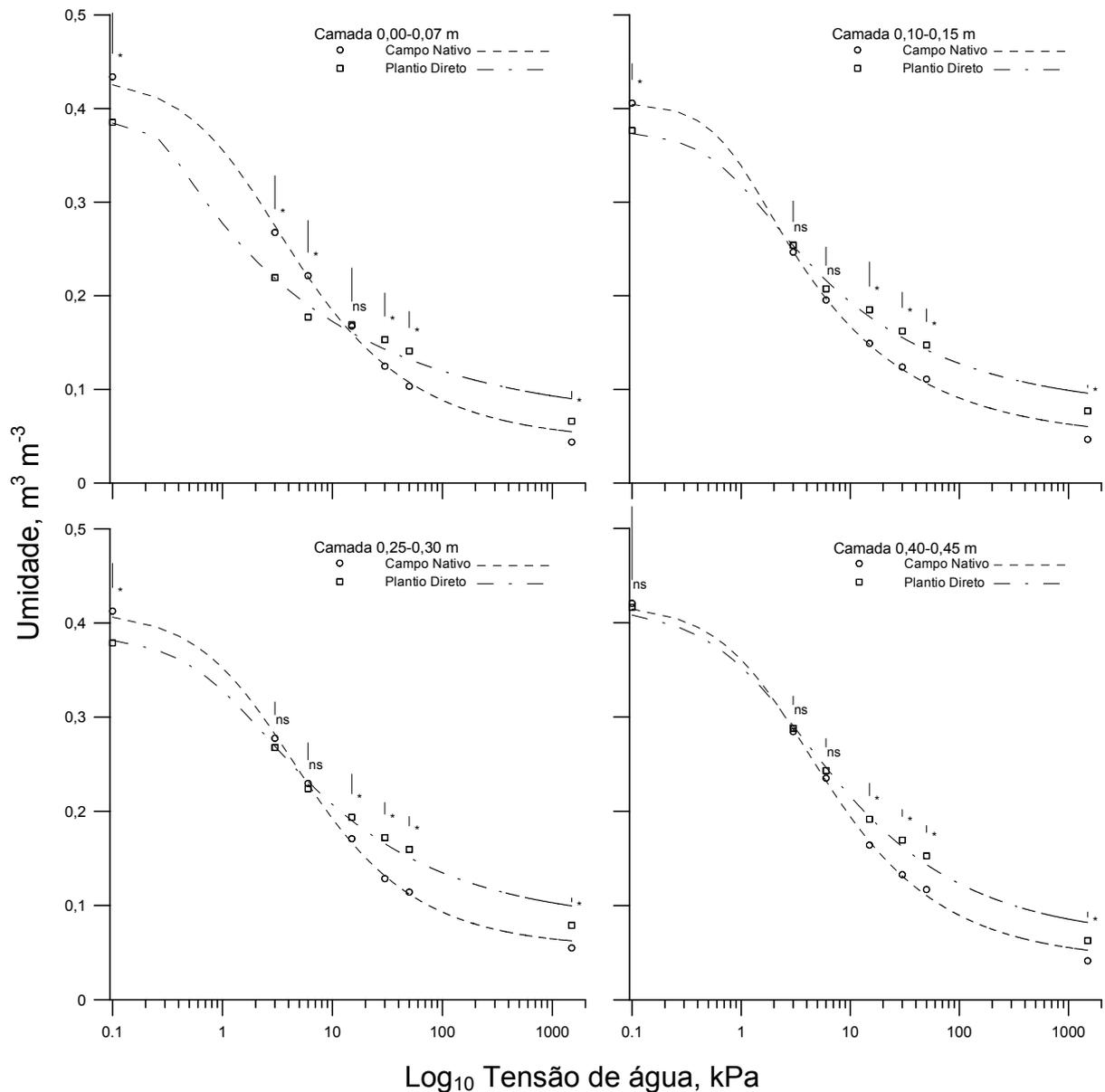
**Figura 26 - Condutividade hidráulica de solo saturado ( $k_s$ ) nas quatro camadas do Argissolo 2 sob campo nativo e plantio direto.**

As colunas seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de DMS (5%) e comparam as médias dos sistemas de uso em cada camada.

### 5.1.9.3 Curva característica de água do solo

Na camada de 0,00-0,07 m houve diferença significativa em todas as tensões, exceto na de 15 kPa (Figura 27). O solo sob campo nativo reteve mais água até 15 kPa, ponto a partir do qual o solo sob plantio direto passou a reter mais água, o que é positivo, pois assim os cultivos irão resistir por um período mais prolongado sem chuvas.

Na camada de 0,10-0,15 m, houve diferença significativa nas tensões de 0, 15, 30, 50 e 1.500 kPa. Nas tensões de 3 e 6 kPa não houve diferença significativa. A partir dessas tensões, o solo sob plantio direto passou a armazenar maior volume de água em relação ao CN. Na camada de 0,10-0,15 m houve deslocamento do ponto de inversão, passando de 15 kPa para 3 kPa. A camada de 0,25-0,30 m teve o mesmo comportamento que a de 0,10-0,15 m.



**Figura 27 - Curva característica de água no Argissolo 2 sob mata nativa e plantio direto, em quatro camadas.**

As linhas verticais indicam a diferença mínima significativa pelo teste DMS (5%) e comparam as médias dos sistemas de uso do solo em cada tensão. \* = significativo; ns = não significativo.

A camada de 0,40-0,45 m apresentou diferença significativa nas tensões de 15, 30, 50 e 1.500 kPa. Nesta camada há tendência de o plantio direto armazenar mais água em relação ao campo nativo, como nas demais camadas.

## 5.4 Discussão

### 5.4.1 Condutividade e permeabilidade do solo ao ar

Para uma boa classificação de um horizonte ou solo quanto à sua condutividade ou permeabilidade ao ar, deveriam ser usadas no mínimo 10 repetições (KMOCH; HANUS, 1965). No estudo em discussão foram utilizadas cinco amostras, por motivos operacionais. Conseqüentemente os coeficientes de variação (CV) foram altos (118, 44 e 42%, respectivamente para o Latossolo, Argissolo 1 e Argissolo 2). Esse alto CV poderia ser reduzido com o aumento do número de amostras, mas, como mencionado anteriormente, isso não foi possível.

A permeabilidade do solo ao ar é um bom indicador para verificar as alterações do sistema poroso do solo causadas pelo uso e pelos sistemas de manejo adotados. Segundo Hillel (1998) e Blanco-Canqui et al. (2007), o fluxo do ar no solo ocorre praticamente nos poros grandes, nos quais também ocorre o fluxo de água, conforme a lei de Poiseville. Iversen et al. (2003) relatam que a água e o ar estão presentes simultaneamente no solo, e ocupam um conjunto de poros com diâmetro e tortuosidade diferentes; o fluxo de ar ocorre preferencialmente em poros de maior diâmetro e contínuos.

O fluxo preferencial do ar em poros maiores pode ser observado no Latossolo sob MN, na camada de 0,00-0,07 m. Nesta camada, a permeabilidade do solo ao ar foi alta e não aumentou com o incremento da tensão da água no solo. Pelo contrário, no solo sob PD, a permeabilidade do solo ao ar aumentou com o aumento da tensão da água no solo, devido à retirada de água retida em poros menores; como consequência, ocorreu incremento da permeabilidade do solo ao ar. Na camada de 0,00-0,07 m foi verificado o maior volume de macroporos: em torno de  $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Tabela 5). A permeabilidade do solo ao ar tem relação exponencial com o volume de macroporos (SCHÖNNING, 2005). Uma diminuição brusca da permeabilidade do solo ao ar foi observada no Latossolo sob MN, entre a camada de 0,00-0,07 e a de 0,10-0,15 m, o que está de acordo com os valores encontrados por Peth; Horn (2006) em um Luvisolo que estava sendo utilizado com cultivos anuais. Estes autores encontraram elevados valores de permeabilidade do solo ao ar na

camada de 0,10 m e uma redução elevada na camada abaixo de 0,30 m. Vossbrink (2004), em estudo realizado em solo sob uso florestal, também observou redução elevada da permeabilidade do solo ao ar na profundidade de 0,40 m.

No Latossolo, nas camadas de 0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m, não foram observadas diferenças entre os dois usos, e sim uma tendência de aumento da permeabilidade do solo ao ar com o aumento da tensão da água no solo.

Assim como no Latossolo, também no Argissolo 1 foram observadas diferenças somente na camada de 0,00-0,07 m. Esperava-se que na camada de 0,10-0,15 m houvesse diferença significativa da permeabilidade do solo ao ar, de forma semelhante à observada na  $\sigma_p$ . A não ocorrência disso indica que a estrutura do solo sob PD permite boa permeabilidade ao ar e à água. Essa afirmação está de acordo com Ball e Smith (1991) e Moldrup et al. (2003), os quais afirmam que a permeabilidade do solo ao ar está diretamente relacionada com a estrutura do solo.

Na camada de 0,10-0,15 m no Argissolo 1, com o aumento da tensão, há aumento acentuado da permeabilidade do solo ao ar, provavelmente devido à existência de poucos poros grandes; por isso, os demais poros precisam de uma tensão maior de água para ser esvaziados.

O Argissolo 2 não apresentou diferenças significativas entres os usos em nenhuma das camadas, embora tenha havido redução da permeabilidade do solo ao ar na camada de 0,10-0,15 m, em relação à de 0,00-0,07 m, nos dois usos estudados. A maior  $k_a$  na camada superficial se deve provavelmente à maior concentração de raízes e ao corte na linha de plantio realizado pela semeadora quando da implantação das culturas.

Em estudo realizado em um solo de origem vulcânica, Moldrup et al. (2003) encontraram uma relação positiva entre o espaço aéreo e a  $k_a$ . Dörner (2005) também observou relação positiva entre o espaço aéreo e a permeabilidade do solo ao ar nas direções vertical e horizontal; nesta ultima o solo apresentou melhor relação na camada de 0,10-0,15 m. Para um Latossolo, Fontanela (2008) também verificou relação positiva entre a permeabilidade do solo ao ar e o espaço aéreo do solo, além de observar que o tráfego tornou o solo menos permeável ao ar e alterou a continuidade e distribuição do tamanho dos poros.

A continuidade de poros é expressa através do índice N, o qual reflete o aumento do espaço poroso, a diminuição da tortuosidade e a área superficial dos poros. Conforme Ball et al. (1988), valores mais altos do parâmetro N estão

diretamente relacionados com o aumento do espaço aéreo e com a continuidade do sistema poroso.

A porosidade obstruída, que relaciona o espaço aéreo e a permeabilidade do solo ao ar, é um bom parâmetro para representar a estrutura do solo (DÖRNER, 2005).

#### 5.4.2 Condutividade hidráulica do solo saturado ( $k_s$ )

A  $k_s$  do solo tem grande importância, pois a partir dela são obtidas informações sobre a capacidade do solo em conduzir água, solutos e substâncias químicas, as quais devem ser bem caracterizadas; o seu valor é usado para cálculos de fluxos no solo. A  $k_s$  é influenciada pela geometria e continuidade dos poros quando esses estão preenchidos com água, sendo dependente de tamanho, forma, volume, distribuição e continuidade do sistema poroso; ela é mais relacionada com a estrutura do que com a textura do solo. Conforme a lei de Poiseville, a densidade de fluxo que passa através de um poro é proporcional ao quadrado de seu diâmetro.

Os maiores valores de condutividade hidráulica saturada foram observados no Latossolo sob MN, onde predominam os poros de maior diâmetro (Tabela 5). No Latossolo foi observada redução drástica da  $k_s$  nos dois usos do solo na camada de 0,00-0,07 m onde a  $k_s$  na mata nativa e no plantio direto foram, respectivamente, de 754,82 e 2,56 mm h<sup>-1</sup>, mostrando que o plantio direto reduz os poros maiores. Conforme Mesquita; Moraes (2004), Servadio et al. (2005) e Blanco-Canqui et al. (2007), os poros de maior diâmetro são responsáveis pela aeração e drenagem da água do solo e têm uma influência direta na condutividade hidráulica do solo saturado.

Para as demais camadas do Latossolo houve redução da  $k_s$  entre os usos, porém não tão elevada; sob MN houve grande redução da camada de 0,00-0,07 m. A menor  $k_s$  no PD (1,78 mm h<sup>-1</sup>) foi verificada na camada de 0,10-0,15 m, onde a densidade foi de 1,43 Mg m<sup>-3</sup>. Na MN, a  $k_s$  foi de 40,33 mm h<sup>-1</sup>, e a densidade, de 1,06 Mg m<sup>-3</sup>. Dessa forma, a  $k_s$  aumenta conforme diminui a densidade do solo, o que já foi constatado por Kaiser (2006), Blanco-Canqui et al. (2007) e Streck (2007).

No Argissolo 2, embora não tenham sido verificadas diferenças significativas, houve tendência de a maior  $k_s$  ocorrer no solo sob campo nativo. Mesmo havendo grandes diferenças entre a  $k_s$  nos dois usos, a não significância se

deve à grande variabilidade da amostragem dos solos, indicada pelo alto coeficiente de variação (CV), em média de 50%. Logsdon et al. (1990) encontraram valores de CV maiores que 1.000% para  $k_s$  em amostras com estrutura preservada coletadas em anéis e analisadas no laboratório. Em trabalho de campo, Gomes et al. (2007) encontraram valores do CV de 88% para a  $k_s$ , ao estudarem a variabilidade e a estrutura de dependência espacial dos atributos físicos do solo. Streck (2007), utilizando amostras com estrutura preservada, obteve coeficientes de variação entre 211 e 21% para diversos solos estudados.

#### 5.4.3 Curva característica de água do solo

Conforme Hillel (1998), quando o solo está em uma maior tensão, a água fica retida basicamente pela adsorção – fenômeno dependente basicamente da textura e pouco influenciado pela estrutura do solo.

O Latossolo sob PD apresentou menor volume de água armazenada no ponto de saturação, devido à sua estrutura mais consolidada em relação à MN (Figura 19). Isso ocorreu nas quatro camadas avaliadas. No Argissolo 1 houve diferença significativa somente na camada de 0,00-0,07 m, e o solo sob PD armazenou maior volume de água, devido ao maior volume da macroporosidade. No Argissolo 2, o armazenamento de água foi maior no solo sob CN, nas camadas de 0,00-0,07, 0,10-0,15 e 0,25-0,30 m.

Esperava-se encontrar diferenças significativas na retenção da água no solo principalmente na camada de 0,10-0,15 m, o que acabou não acontecendo; nesta camada somente houve diferença significativa na saturação e em 1.500 kPa, e isso mostra que o tráfego das máquinas não afetou o armazenamento da água no solo.

A curva característica de água no solo é alterada pela compactação do solo, a qual provoca redução da porosidade total, sobretudo dos poros maiores, que são formados pelo espaço interagregados. Assim, o volume de água na saturação e o volume retido em potencial baixo são significativamente reduzidos. Dessa forma, o volume de poros médios em solos compactados provavelmente é maior, por causa da conversão de poros grandes em médios, enquanto poros pequenos ou microporos praticamente não sofrem alterações. Por isso, em altas tensões a curva característica de água no solo de solos compactados pode ser idêntica à de solos não compactados (VASCONCELLOS, 1993).

Nos solos estudados, é possível observar a diferença no volume de água armazenada entre o Latossolo (argiloso) e o Argissolo 2 (arenoso) a partir da curva característica de água no solo. A principal causa dessa diferença é a textura do solo, a qual altera a retenção da água no solo; quanto maior a quantidade de argila, geralmente, maior será o volume de água retido em uma mesma tensão, e mais suave será a inclinação da curva, devido à distribuição mais uniforme do tamanho dos poros. Geralmente, em solos arenosos o tamanho dos poros é maior, e estes são esvaziados mais rapidamente em tensões baixas, o que explica a inclinação acentuada da curva característica de água no solo (HILLEL, 1982).

Barden e Pavlakis (1971), Moldrup et al. (2003) e Tuli et al. (2005) observaram que o aumento do volume de água armazenada no solo em condições saturadas indica que há maior volume de poros, principalmente macroporos. Assim que a água dos poros é drenada, esse espaço é preenchido pelo ar, que aumenta em proporção de volume quanto mais seco estiver o solo.

O comportamento diferenciado das curvas características da água no solo nos diferentes usos é consequência dos diferentes tamanhos de poros e da textura dos solos. Alterações na distribuição do tamanho dos poros alteram a curva característica de água, pois é o tamanho dos poros que determina a tensão da água neles retida e a sucção necessária para esvaziá-los.

## 5.5 Conclusões

O tráfego de máquinas sobre o solo não alterou a capacidade deste de conduzir ar em seu espaço poroso. Somente na camada superficial do Latossolo e Argissolo 1 a permeabilidade do solo ao ar foi menor no plantio direto, mas isso não pode ser atribuído ao tráfego das máquinas, e sim ao maior conteúdo de matéria orgânica e à concentração de raízes.

A condutividade hidráulica do solo saturado é afetada somente no Latossolo, pois este é o mais afetado pelo tráfego de máquinas, em razão de sua textura.

O tráfego das máquinas não altera a curva de retenção de água no solo na camada de 0,10-015 m, na qual ocorre a maior concentração das pressões geradas pelas máquinas.

## 5.6 Referências

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo Franco-Arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, maio/jun. 2004.

AHUJA, L. R. Macroporosity to characterize the spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 48, n. 4, p. 699-702, July/Aug. 1984.

ASSIS, R. L. de; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho Distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 515-522, jul./ago. 2005.

BALL, B. C. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities. **Journal of Soil Science**, Madison, v. 32, n. 4, p. 483-498, July/Aug. 1981.

BALL, B. C.; O'SULLIVAN, M. F.; HUNTER, R. Gas diffusion fluid flow and derived pore continuity indices in relation vehicles traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, Madison, v. 39, n. 3, p. 327-339, May/June 1988.

BALL, B. C.; SMITH, K. A. Gas movement. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (ed.). **Soil analysis physical methods**. 3rd ed. Madison: Marcel Dekker, 1991. p. 511-549.

BARDEN, L.; PAVLAKIS, G. Air and water permeability of compacted unsaturated cohesive soil. **Journal of Soil Science**, Madison, v. 22, n. 3, p. 302-318, Sept. 1971.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil Physics**. New York: Wiley, 1972. p. 498.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. New York: Elsevier, 1972. p. 764.

BEUTLER, A. N. et. al. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. **Irriga**, Botucatu, v. 8, n. 3, p. 242-249, set. 2003.

BLACKWELL, P. S. et al. Evaluation of soil recompaction by transverse wheeling of tillage slots. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 53, n. 1, p. 11-15, Jan. 1989.

BLACKWELL, P. S. et al. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **European Journal of Soil Science**, v. 42, n. 2, p. 215-228, June. 1990.

BLANCO-CANQUI, H. et al. Soil hydraulic properties influenced by corn stover removal from no-till corn in Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1/2, p. 144-155, Jan. 2007.

BOONE, F. R.; VEEN, B. W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B. D.; van OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 237-264.

BUCKINGHAM, E. **Studies in the movement of soil moisture**. Local: U.S. Department of Agricultural Bureau Soils, 1907. 38 p. (Bulletin).

CAMARGO, O. A. de; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1997. 132 p.

CENTURION, J.; ANDRIOLI, I. Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 701-709, maio/jun. 2000.

COLLARES, G. L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

COREY, A. T. Air permeability. In: KLUTE, A. (Ed.), **Methods of Soil Analysis**. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986, p. 1121-1136.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et applications à suivre des formules à employer dans les questions de distribution d'eau**. Paris: Victor Dalamont, 1856. 150 p.

DÖRNER, J. **Anisotropie von Bodenstrukturen und Porenfunktionen in Böden und deren Auswirkungen auf Transportprozesse im gesättigten und ungesättigten Zustand**. 2005. 182 p. Thesis (Doktorgrades der Agrar) -

Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian Albrechts University, Kiel.

DOURADO NETO, D. et al. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Genuchten. **Engenharia Rural**, v. 1, n. 2, p. 92-102, 1990.

FONTANELA, E. **Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego**. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GENRO JUNIOR, S. A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto**. 2002. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GOMES, N. M. et al. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 435-443, maio/jun. 2007.

GROENEVELT, P.; KAY, B.; GRANT, C. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v. 34, n. 2, p. 101-114, Nov. 1984.

GUROVICH, L. A. Field spatial variability structure of soil hydrodynamic properties. **Ciencia e Investigación Agraria**, Casilla, v. 9, n. 3, p. 243-254, set./dic. 1982.

HARTGE, K. H. Der Zusammenhang zwischen Luft- und Wasserpermeabilität in Bodenproben. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Verlag, v. 117, n. 2, p. 97-107, May 1967.

HARTGE, K. H.; HORN, R. **Die physikalische Untersuchung von Böden**. Stuttgart: Enke, 1989. 177 p.

HARTGE, K. H.; HORN, R. **Einführung in die Bodenphysik**. 3rd ed. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1999.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

\_\_\_\_\_. **Introduction to Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1982. 364 p.

IVERSEN, B. V. et al. Field application of a portable air permeameter to characterize spatial variability in air and water permeability. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 2, n. 5, p. 618-626, Nov. 2003.

KAISER, D. R. **Nitrato na solução do solo e na água de fontes para consumo humano numa microbacia hidrográfica produtora de fumo**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 857-867, 2002.

KMOCH, H. G.; HANUS, H. Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft. **Zeitschrift für Pflanzenernährung Düngung und Bodenkunde**, n. 111, p. 1-10, 1965.

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

LIMA, C. L. R. de et al. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1172-1178, jul./ago. 2006.

LOGSDON, S. D. et al. Macroporosity and Its Relation to Saturated Hydraulic Conductivity under Different Tillage Practices. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 54, n. 4, p. 1096-1101, July/Ago. 1990.

MESQUITA, M. de G. B. de F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, maio/jun. 2004.

MOLDRUP, P. et. al. Air permeability in undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 67, n. 1, p. 32-40, Jan./Feb. 2003.

PETH, S., HORN, R. The mechanical behaviour of soils under cyclic loading-implications for soil deformation and stress distribution. In: **Proceedings of the Eurosoil**, Freiburg, p. 101, Sept. 2004.

PETH, S.; HORN, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 169, n. 3, p. 401-410, June 2006.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo - protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez, 2006.

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

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico vermelho-escuro de Eldorado do sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 313-319, mar./abr. 1995.

SCHJÖNNING, P. et al. Pore characteristics and hydraulic properties of a sandy loam supplied for a century with either animal manure or mineral fertilizers. **Soil Use and Management**, Stirling, v. 21, n. 3, p. 265-275, Sept. 2005.

SCHJÖNNING, P. et al. Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange: the long-term effects of fertilization and crop rotation. **European Journal of Soil Science**, v. 53, n. 2, p. 331-339, June 2002.

SERVADIO, P. et al. Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 87-100, Nov. 2005.

SILVA, V. R. da. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

STRECK, C. A. **Índice S e fluxo de água e ar em solos do sul do Brasil**. 2007. 96 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

TULI, A. et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1361-1371, Sept./Oct. 2005.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept. 1980.

VASCONCELOS, E. B. de. **Levantamento dos atributos físicos e hídricos de três solos de várzea do Rio Grande do Sul**. 1993. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren**. 2005. 126 p. Dissertation (Doktorgrades der Agrar) Schriftenreihe des Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian Albrechts Universität, Kiel.

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

## 6 CAPÍTULO 3

# CARREGAMENTO DINÂMICO E SUA INFLUÊNCIA NA DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO E DEFORMAÇÃO DO SOLO

### 6.1 Introdução

#### 6.1.1 Compactação do solo

Compactação do solo é o processo que descreve o decréscimo do volume dos solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas ou por animais (LIMA, 2004). Pode-se dizer ainda que a compactação é a ação mecânica por meio da qual se impõe ao solo uma redução de seu índice de vazios, o que conseqüentemente faz aumentar a resistência ao cisalhamento, a compressibilidade e à permeabilidade (BUENO; VILAR, 1998). Nos últimos anos, o aumento da compactação dos solos agrícolas tem se tornado um fator limitante para o aumento da produtividade e a sustentabilidade do plantio direto, principalmente em solos com textura argilosa e muito argilosa (SILVA, 2003).

No Brasil, atualmente, há tendência em avaliar a suscetibilidade do solo à compactação paralelamente com o momento ideal para realizar as operações mecanizadas no campo, por se considerar racional o uso de medidas preventivas da compactação, reduzindo assim os problemas de degradação dos solos agrícolas (KONDO; DIAS JUNIOR, 1999; SILVA et al., 2000a).

A compactação do solo tem se destacado mundialmente por comprometer a qualidade física dos solos agrícolas e, conseqüentemente, impedir a obtenção de maiores índices de produtividade (ALAKUKKU; ELOMEN, 1994). A degradação dos solos agrícolas é causada sobretudo pela compactação do solo (CANILLAS; SALOKHE, 2002).

Com o manejo inadequado das máquinas agrícolas na realização das operações mecanizadas no campo, devido à falta de conhecimento da capacidade de suporte do solo em certa umidade, têm ocorrido na camada superficial do solo alterações na sua estrutura física com o rearranjo das partículas, a qual é causada por efeitos externos do contato entre pneu-solo, levando assim à compactação, que provoca a redução do espaço poroso e, conseqüentemente, o aumento da densidade do solo (KAISER et al., 1998; SILVA et al., 2000b).

Quando o solo está compactado, o desenvolvimento das plantas é reduzido, devido ao impedimento mecânico ao crescimento radicular. O resultado é um menor volume de solo explorado, menor absorção de água e nutrientes; como consequência, a produtividade das culturas diminui (VIEIRA; MUZILLI, 1984; TORMENA et al., 1998; MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999; GUIMARÃES et al., 2002).

Smucker e Erickson (1989) afirmam que a compactação do solo pode ter efeitos benéficos ou adversos. Como efeitos benéficos pode-se citar a melhoria do contato solo-semente e também o aumento da disponibilidade de água em anos com baixa precipitação (CAMARGO, 1983; RAGHAVAN; MICKYES, 1983). No entanto, quando a compactação for excessiva, pode haver limitações para a planta absorver água e nutrientes, infiltração e redistribuição da água, trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular, o que acarreta diminuição da produtividade, aumento da erosão e potência necessária para o preparo do solo e plantio direto (SOANE, 1990; BICKI; SIEMENS, 1991).

Vários autores afirmam que o processo de compactação depende de fatores externos e internos (LEBERT; HORN, 1991; DIAS JUNIOR et al., 1999). Podem-se citar como fatores externos a intensidade e frequência da carga aplicada (RAGHAVAN et al., 1990; LEBERT; HORN, 1991; HORN, 1998) e, como fatores internos, o histórico das tensões sofridas pelo solo (REINERT, 1990; DIAS JUNIOR, 1994; DIAS JUNIOR et al., 1999), a umidade (SOANE, 1990; DIAS JUNIOR, 1994), a textura (GUPTA; ALLMARAS, 1987; MCBRIDE, 1989) e a densidade inicial do solo (GUPTA et al., 1985; REINERT, 1990).

#### 6.1.2 Efeito da cobertura vegetal

Os fragmentos de caules, restos de colheita e pedaços de raízes previnem a compactação, por aumentarem a pressão de preconsolidação, o que dificulta o

rearrançamento das partículas do solo quando este é submetido ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas (PECHE FILHO, 1999). Os restos culturais que ficam na superfície do solo são capazes de absorver parte da pressão gerada pelos rodados das máquinas e implementos agrícolas (JONES, 1995).

A compactação do solo depende do volume de resíduos sobre ele (ESS et al., 1998). A cobertura do solo com os restos culturais reduz os problemas causados pela compactação (ACHARYA; SHARMA, 1994). Em estudo com três sistemas de manejo do solo e 4 Mg ha<sup>-1</sup> de palha na superfície, Dao (1996) observou que houve aumento superficial da densidade do solo nos tratamentos onde a palha foi retirada parcialmente. Leão et al. (2004) concluíram que o maior volume de resíduos pós-pastejo proporcionou menor prejuízo nas propriedades físicas do solo.

Em ensaio de Proctor, parte da energia de compactação foi dissipada nas amostras com a presença de palha na superfície. Contudo, essa eficácia depende da quantidade de palha, da energia aplicada e das condições do solo (BRANDT, 2005; BRAIDA et al., 2006).

Braida et al. (2006) ressaltam ainda que nos primeiros 15 golpes do teste de Proctor houve dissipação de apenas 2,9% da energia, e nos 10 golpes restantes a dissipação foi de 12,0%, porque nos primeiros golpes o solo está quase tão suscetível à deformação quanto a palha e, portanto, nesses golpes a compactação é quase indiferente à presença da palha, especialmente quando em pequena quantidade. Nos golpes finais, o solo já está mais compactado, enquanto a palha continua muito suscetível à deformação, passando a funcionar como um amortecedor entre o soquete compactador e o solo. Em um Argissolo escarificado, o efeito da cobertura de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de milho não foi significativo na diminuição da compactação do solo causada pelo tráfego de um trator (BRANDT, 2005).

A quantidade e o tipo de cobertura vegetal sobre o solo podem interferir na capacidade de tração do trator, provocando modificações físicas no solo e interferindo no rendimento operacional, podendo ser mais ou menos significativo, dependendo do tipo de solo, palha, quantidade e homogeneidade da palha sobre o solo. Gabriel Filho et al. (2004) não observaram modificações significativas nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distroférico, de textura argilosa com 2,2 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de ervilhaca e 5,5 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de nabo na sua superfície,

trafegado por um trator Ford New Holland 7630 com TDA, com os pneus inflados a 370 kPa e totalmente lastrado (6.400 kg).

As tensões geradas pela patinagem das máquinas agrícolas são responsáveis por até 50% da compactação do solo. Pode-se destacar ainda que o efeito máximo da compactação ocorra quando a patinagem está entre 15 e 25%; a patinagem em operações agrícolas normalmente está na faixa de 20%, quando ocorre a máxima compactação do solo (RAGHAVAN et al., 1977).

### 6.1.3 Pressões das máquinas no solo

Durante as últimas décadas, foram desenvolvidos vários métodos para medir a pressão gerada pelas máquinas e implementos agrícolas sobre ou no solo. Um completo sistema para medir as pressões sofridas pelo solo quando submetido às cargas externas foi elaborado usando-se uma combinação de seis sensores de pressão montados em um único bloco (NICHOLS et al., 1987; HARRIS; BAKKER, 1994). Carrier et al. (1995) desenvolveram um medidor de pressão na superfície do solo, constituído de borracha, cheio de fluido, coberto parcialmente por uma concha de aço e conectado a um transdutor de pressão. Todos esses dispositivos demandam um tempo considerável na sua instalação, para medir com precisão a variabilidade das pressões no solo. Turner et al. (2001), usando bulbos cheios de fluido conectados a transdutores de pressão, desenvolveram um sistema de rápida instalação e com alta taxa de amostragem para obter a pressão máxima que as máquinas geram na superfície do solo. Outros pesquisadores têm eliminado a instalação de transdutores de pressão no solo, colocando-os diretamente no pneu ou na superfície do solo, onde ocorre o tráfego (SMITH et al., 1994; DEGIRMENCIOLU et al., 1997). Esses dispositivos são específicos para medir as pressões exercidas na superfície do solo, não sendo possível medir a distribuição das pressões em profundidade.

As distribuições das tensões normais no solo, em que são usados sistemas de medidas de tensões foram descritas por Horn (1981), Burger et al. (1988) van den Akker et al. (1994), Blunden et al. (1994), Kühner (1997), Wiermann (1998), Horn et al. (2000) e Vossbrink; Horn (2004). A quantificação está relacionada especialmente com as propriedades físicas e mecânicas dos solos, com destaque para os cultivados, onde também se quantificou o efeito de tráfego e a distribuição da tensão nas mudanças das propriedades físicas dos solos.

Segundo Blunden et al. (1992, 1994), van den Akker et al. (1994), Trein (1995) e Kirby et al. (1997), em função de as medidas e cálculos estarem baseados somente na componente vertical da tensão aplicada, os valores dos demais componentes que faltam para prever as tensões no solo podem ser obtidos através de modelagem. Contudo, a aproximação pode ser utilizada em solos homogêneos, enquanto a análise da distribuição das tensões em solos estruturados e não saturados é muito mais complexa, pois existem inúmeros processos que atuam de modo interativo no solo. Isso pode ser considerado para solos não saturados, em que a sua composição muda com o tempo ou durante os cultivos, o que altera as suas propriedades físicas e químicas.

Em solos não mobilizados, a maioria dos poros são verticais, mais resistentes que os poros de solos mobilizados e apresentam maior estabilidade quando submetidos a uma tensão vertical. Assim, solos sem revolvimento ou com o mínimo de revolvimento são mais resistentes à compactação, quando comparados a solos sob preparo convencional (HORN, 1986). Contudo, para que a deformação do solo ocorra deve haver poros cheios de ar e/ou com espaço poroso com alta condutividade hidráulica para escoar a água presente nos poros. Quanto menores a condutividade hidráulica, o gradiente e a continuidade dos poros, mais estáveis são os solos durante um carregamento em um tempo curto.

Os padrões de distribuição das tensões no solo são diferentes em função do tipo de agarradeira do pneu, da área de contato e da dureza da carcaça (HORN et al., 1987). Assim, não se tem muito bem definido o potencial de compactação no solo, pois vários fatores devem ser relacionados, como valores de pressão de preconsolidação em relação à pressão aplicada e a área de contato para um solo com uma determinada textura (DVWK, 1995). O efeito da velocidade do tráfego em relação à distribuição das tensões também deve ser considerado.

#### 6.1.4 Medida das pressões no solo

Com a utilização do sistema Transdutor de Tensão no Solo (Soil Stress Transducer, SST), podem ser medidas as tensões no solo e calculadas as pressões no solo. O movimento espacial multidimensional do solo durante o tráfego pode ser medido com o Sistema Transdutor de Deslocamento (Displacement Transducer System, DTS).

#### 6.1.4.1 Conceito da tensão tridimensional

Se um corpo de solo está em repouso, significa que a força age de fora para dentro. Se este corpo de solo é dividido em duas partes em sua seção transversal, e uma parte é afastada com as forças que agem sobre ela, deve-se aplicar uma força na outra parte da área da seção transversal, a fim de se manter o equilíbrio. A distribuição dessas tensões internas, continuamente sobre a superfície, ocorre de modo que em cada elemento da área  $\Delta A$  chegue uma força  $\Delta F$ . Com a relação  $\Delta F/\Delta A$  é determinado  $dF \rightarrow 0$ , o qual atinge um limite, e, dessa forma, a tensão pode ser descrita. Quando a tensão está agindo em uma área específica e as forças em uma área definida, obtém-se uma relação vetorial. Esses vetores podem ser representados em uma área como vetores normais e tangenciais, os quais podem ser divididos em Tensão Normal ( $\sigma_n$ ) e Tensão Cisalhante ( $\tau$ ).

Pegando-se um ponto no corpo do solo, traçam-se diferentes retas e um plano, e neste plano são aplicadas diferentes tensões. Deste corpo de solo retira-se um cubo teórico, tendo-se nos seis lados um vetor de tensões dominante, o qual pode ser decomposto em três componentes, conforme o eixo de coordenadas (Figura 28).

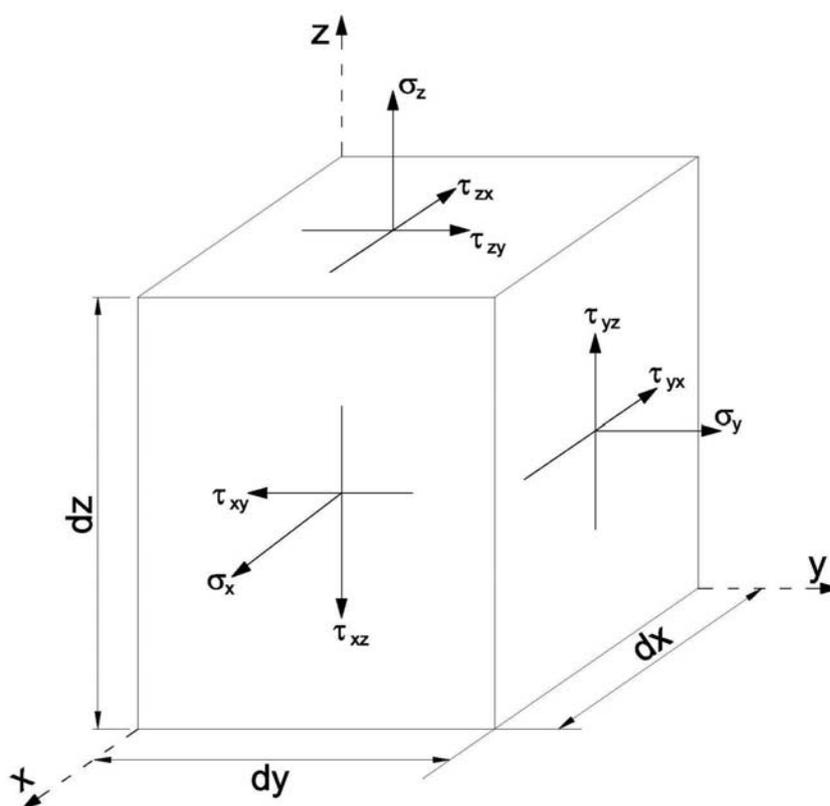


Figura 28 - Direção das tensões agindo sobre um corpo teórico (KÉZDI, 1952).

Logicamente, diferentes tensões ocorrem em lados opostos, sendo  $3 \times 3 = 9$  componentes de tensão, sendo três de tensão normal ( $\sigma_n$ ) e seis de tensão cisalhante ( $\tau$ ), as quais são caracterizadas como força de tensão (KOOLEN; KUIPERS, 1983). A força de tensão, então, é resumida em uma matriz:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad [19]$$

Todos os componentes na matriz têm o lugar definido. As tensões normais estão dispostas na diagonal da matriz, e as tensões cisalhantes, nos demais lugares da matriz. Esta matriz descreve a posição de um ponto no corpo do solo. As propriedades da força de tensão dependem dos valores dos componentes da matriz. Se a localização do sistema de coordenadas é alterada, também se modifica a localização do cubo; conseqüentemente, os valores da força de tensão serão alterados (Figura 28). Os componentes de tensão também podem ser calculados se estes sofrerem uma rotação; assim, devem-se conhecer os componentes originais de tensão e o ângulo de rotação. Dessa forma são escolhidos o vetor e a equação de tensão do sistema de coordenadas independentes.

Quando o binário das forças calculadas agir sobre a coordenada  $\sigma_x$ , a tensão de cisalhamento terá o mesmo sinal:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}; \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad [20]$$

No sistema de coordenadas da Figura 28 é possível definir que todas as tensões de cisalhamento são iguais a zero simultaneamente. Quando isso ocorre, as tensões normais se tornarão simultaneamente as tensões principais ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ). Dessa forma, a maior tensão principal será  $\sigma_1$ , a segunda,  $\sigma_2$ , e a terceira,  $\sigma_3$ , definidas como:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix} \quad [21]$$

Na matriz, as forças de tensão são invariáveis, e não são dependentes da posição do sistema das coordenadas:

$$\begin{aligned}
I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\
I_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_2 \sigma_3 \\
I_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{xz} \tau_{yz} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{xz}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3
\end{aligned} \tag{22}$$

Assume-se que as direções x, y e z sejam as direções principais e as tensões sobre o plano vertical estão arranjadas de forma que geram uma área na diagonal (área octaédrica), sendo um componente normal e um tangencial. Esses componentes são a tensão normal octaédrica ( $\sigma_{oct}$ ) (ou apresentada como tensão normal média) e a tensão de cisalhamento octaédrica ( $\tau_{oct}$ ). Ambos os componentes podem ser expressos como invariáveis:

$$\begin{aligned}
(OCTNS, MNS) \sigma_{oct} &= \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3} I_1 \\
(OCTNS) \tau_{oct} &= \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} = \sqrt{\frac{2}{9} (I_1^2 - 3I_2)}
\end{aligned} \tag{23}$$

O ângulo  $\Omega$  informa a orientação da tensão de cisalhamento octaédrica no plano octaédrico:

$$\Omega_{oct} = \frac{1}{3} \arccos \left( \frac{2\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_{oct})(\sigma_2 - \sigma_{oct})(\sigma_3 - \sigma_{oct})}}{\tau_{oct}^3} \right) \tag{24}$$

A tensão octaédrica ( $\sigma_{oct}$ ) e a tensão média normal (MNS) são as tensões mais fáceis de descrever em relação às demais medidas no solo. A relação das tensões principais ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) é a média da tensão de cisalhamento octaédrica ou da tensão de cisalhamento ( $\tau_{oct}$ , OCTSS). Valores altos de tensão de cisalhamento octaédrica ocorrem devido às grandes diferenças da tensão principal. Quando há valores negativos da tensão principal ( $\sigma_3$ ), o solo não oferece capacidade de tração. Existe uma posição no sistema de coordenadas ( $45^\circ$  na direção do primeiro e terceiro eixo de coordenadas) onde a tensão cisalhante tem o seu valor máximo.

De acordo com a equação seguinte, nas forças de tensão podem ser adicionadas ou subtraídas tensões:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{pmatrix} \tag{25}$$

Na segunda matriz pode-se, por exemplo, ter o efeito da pressão hidrostática, a qual tem efeito uniforme em todas as direções.

### 6.1.4.2 Propagação da tensão no solo

A tensão no solo sempre se distribui de forma tridimensional. Os cálculos da distribuição da tensão no solo, sob uma força vertical em um ponto, foram descrita pela primeira vez por Boussinesq (1885 citado por SÖHNE, 1953), a qual foi descrita para confirmar a distribuição vertical relacionada com a tensão (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). De acordo com essa teoria, uma carga vertical sobre a superfície do solo, atuando sobre um meio homogêneo, isotrópico e de elasticidade linear, tem efeito sobre a metade da área. Dessa forma, foi descrito que a pressão deve continuar sobre uma área de mesmo tamanho; assim, descreveu-se pela primeira vez o método da pressão em um ponto.

Neste método de carga vertical em um ponto, assume-se que o ponto de pressão entre o pneu e o solo é o que prevalece. Um desses casos é apresentado na Figura 29.

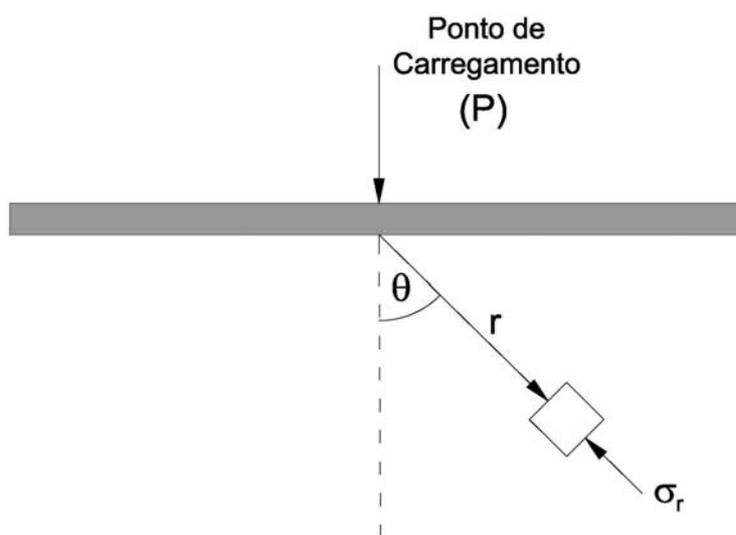


Figura 29 - Tensão induzida em um elemento do solo através de um ponto de carregamento (KOOLEN; KUIPERS, 1983).

Uma infinidade de pequenos cubos é representada de tal forma que o vetor de raio ( $r$ ) fique sobre um dos lados do cubo. As equações de Boussinesq mostram que a tensão é aplicada apenas perpendicularmente à superfície do vetor de raio ( $r$ ). Em ambos os lados do cubo atuam somente tensões normais ( $\sigma_n$ ); nessa situação, é a tensão principal ( $\sigma_1$ ), que pode ser calculada conforme a seguinte equação:

$$\sigma_r = \sigma_1 = \frac{3P}{2\pi r^2} \cos \theta \quad [26]$$

Com o auxílio desta equação é possível calcular a tensão em cada ponto do solo, de modo que a direção do vetor de raio ( $r$ ) esteja definida. Se a tensão principal vertical logo abaixo do ponto de carregamento tiver de ser calculada, então o ângulo ( $\theta$ ) entre a direção do plano vertical e o vetor de raio ( $r$ ) é zero, portanto,  $\cos \theta = 1$ .

Na realidade, o solo tem um comportamento plástico, e, em função disso, Fröhlich (1934) introduziu na equação o fator de concentração ( $v$ ), sendo a equação reescrita da seguinte forma:

$$\sigma_r = \frac{vP}{2\pi r^2} \cos^{v-2} \theta \quad [27]$$

O fator de concentração ( $v$ ) leva em conta diferentes resistências do solo, em que:  $v = 3$  é “duro”,  $v = 4$  é “normal” e  $v = 5$  é “mole”, os quais são definidos na Figura 30. Em amostras de solo com estrutura preservada parcialmente comprimida, Burger et al. (1988) identificaram fatores de concentração variando de 3 a 9 para um grande número de solos de uso agrícola. Quanto maior o fator de concentração, maior será a concentração das tensões no eixo principal e, conseqüentemente, maior a profundidade em que a tensão se propaga.

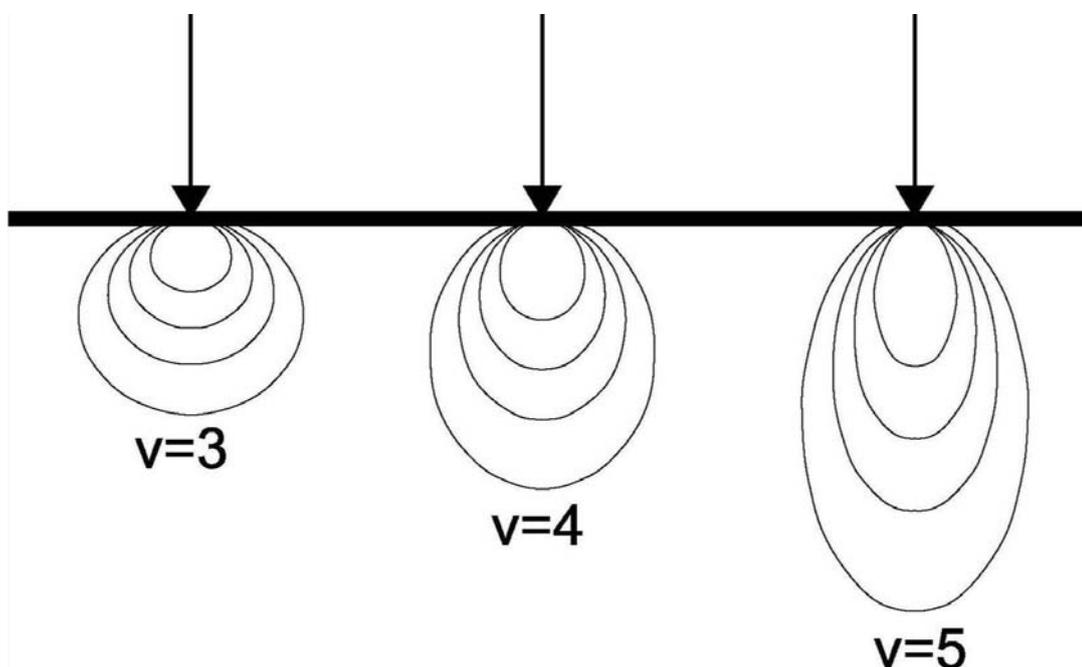


Figura 30 - Linhas isobáricas de pressão (bulbos de pressão), em diferentes fatores de concentração no solo (KÉZDI, 1969).

Horn et al. (1991), Hartge e Horn (1999) e Becher (2004) afirmam que o uso do solo na agricultura é intenso; com isso, o fator de concentração não é uma

constante, pois a gênese do solo, a água armazenada ou a interferência de fatores antropogênicos (como a utilização de máquinas agrícolas) são alterados.

As máquinas agrícolas e florestais com pneus ou correntes não geram um único ponto de pressão, e sim inúmeros pontos, que são distribuídos sob a área de contato. Dessa forma, Söhne (1953) criou outra teoria em que toda a área de contato foi dividida em subsuperfícies e as pressões em subparcelas as quais foram adotadas como um ponto de carregamento. Devido aos bulbos de pressão (para uma mesma superfície específica de pressão), o aumento da carga total é maior e, conseqüentemente, vai atuar em maior profundidade.

Para predizer a tensão em um ponto do solo utiliza-se o cubo de tensões (Figura 28). Isso acontece em seis direções independentes e em diferentes distribuições de pressão, as quais deverão ser determinadas (NICHOLS et al., 1987).

#### 6.1.4.3 Deformação do solo

Cada ponto do solo, quando este estiver sob efeito de alguma força externa, apresenta uma tensão e deformação. A descrição da deformação segue a mesma lógica da descrição do estado das tensões. O estado da tensão é definido sobre os dois parâmetros, que são a tensão normal e a tensão de cisalhamento – isso enquanto a deformação existir a partir da deformação normal e cisalhante. A deformação normal pode ser descrita a partir de um segmento de reta infinitamente pequeno, de comprimento  $l$ . Através de uma deformação esse segmento irá atingir um comprimento  $l + \Delta l$  (Figura 31). A deformação normal e a de cisalhamento são calculadas, esta última causa uma mudança primeiramente no ângulo perpendicular à superfície do solo, a qual pode ser expressa como:

$$\text{Deformação Normal} = \frac{\Delta l}{l} \quad [28]$$

$$\text{Deformação Cisalhante} = \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \quad [29]$$

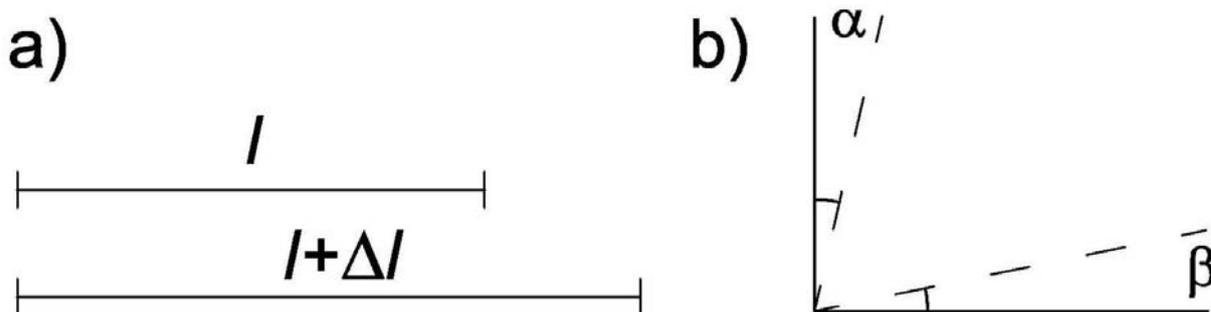


Figura 31 - Deformação normal (a) e deformação cisalhante (b) (KOOLEN; KUIPERS, 1983).

A deformação de um corpo de solo exposto a cargas externas, representada em um cubo infinitamente pequeno, pode ser descrita por uma matriz em um sistema de coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad [30]$$

Quando o solo é submetido a uma carga, o ponto no corpo do solo também sofre carregamento e deformação. Com a deformação, ocorre uma variação do comprimento e do ângulo dos lados. A deformação no comprimento ocorre da seguinte maneira: a deformação normal na direção  $x$  é  $\varepsilon_x$ ; na direção  $y$ ,  $\varepsilon_y$ ; e na direção  $z$ ,  $\varepsilon_z$ . Em um cubo sem carregamento o ângulo vai ser reto, mas, quando ocorre um carregamento, há uma mudança dos ângulos nas laterais da seguinte maneira: a deformação cisalhante entre as direções  $x$  e  $y$  vai ser  $\varepsilon_{xy}$ ; entre as direções  $x$  e  $z$ ,  $\varepsilon_{xz}$ ; e entre as direções  $y$  e  $z$ ,  $\varepsilon_{yz}$ .

A matriz de deformação normal e de cisalhamento que será descrita é chamada de deformação ou tensão de deformação. As suas propriedades e simetria são as mesmas da força de tensão, e também a simetria e tensão de deformação têm a mesma posição específica no sistema de coordenadas. Essa tensão também pode ser usada em um sistema de coordenadas aleatório, em que a tensão de cisalhamento é nula. Nesse caso, a deformação normal é a tensão principal ( $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ ), e as coordenadas, a direção principal.

Assim como acontece com a tensão, aqui também se tem um sistema de coordenadas de posição ( $45^\circ$  de inclinação contra a direção  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ ), em que a deformação de cisalhamento é máxima. Na matriz da tensão de deformação existem também invariantes, as quais são independentes do sistema de coordenadas. Análoga à teoria de tensão normal, aqui também ocorre deformação normal

octaédrica ( $\varepsilon_{\text{oct}}$ ) e deformação cisalhante octaédrica ( $\gamma_{\text{oct}}$ ) que podem ser calculadas. Uma tensão de deformação pode apresentar uma variação do seu volume e, em um volume constante, pode ter partes expandidas ou deslocadas.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_m & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_m & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon_m & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y - \varepsilon_m & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z - \varepsilon_m \end{pmatrix} \quad [31]$$

A segunda parte da matriz é a proporção da variação volumétrica com a deformação, sendo a terceira parte a deformação de cisalhamento com volume constante; a mudança de volume com a deformação é descrita pela seguinte equação:

$$\varepsilon_m = \frac{1}{3}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad [32]$$

## 6.2 Material e métodos

### 6.1.5 Solos e Clima

Os experimentos foram conduzidos em dois solos distintos:

- 1<sup>o</sup>) Argiloso: Latossolo Vermelho Distrófico típico (SANTOS et al., 2006), e, pela classificação regional do solo (BRASIL, 1973; STRECK et al., 2008), unidade de mapeamento (UM) Passo Fundo, localizado na área experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Trigo, no município de Passo Fundo, na região fisiográfica do Planalto Médio do Estado do Rio Grande do Sul, com latitude de 28°10'00" sul, longitude de 52°19'00" oeste e altitude de aproximadamente 650 metros. Caracterizada pela ocorrência de precipitação pluvial mínima de 60 mm mensais, distribuída ao longo de todos os meses do ano (NIMER, 1989); o clima da região enquadra-se nas zonas "Cfa" e "Cfb" da classificação de Köppen.
- 2<sup>o</sup>) Arenoso: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (SANTOS et al., 2006), e, pela classificação regional do solo (BRASIL, 1973; STRECK et al., 2008), unidade de mapeamento (UM) São Pedro, localizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, no município de Santa Maria, na região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio

Grande do Sul, com latitude de 29°41'00" sul, longitude de 53°48'00" oeste e altitude de 95 metros aproximadamente. O clima da região enquadra-se na classificação "Cfa" de Köppen, clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e a temperatura do mês mais frio entre -3°C e 18°C (MORENO 1961).

Os tratamentos foram constituídos pelos locais e usos descritos na Tabela 13.

**Tabela 13 - Teores de argila, areia e silte para o Latossolo Vermelho Distrófico típico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico**

Local e uso <sup>(1)</sup>	Argila	Areia	Silte
	----- g kg <sup>-1</sup> -----		
<b>Camada de 0,00-0,07 m</b>			
PF_PD	451	349	201
SM_CN	83	635	282
SM_PD	101	629	270
<b>Camada de 0,10-0,15 m</b>			
PF_PD	477	325	198
SM_CN	72	632	297
SM_PD	86	621	293
<b>Camada de 0,25-0,30 m</b>			
PF_PD	567	352	81
SM_CN	86	626	288
SM_PD	99	610	291
<b>Camada de 0,40-0,45 m</b>			
PF_PD	556	279	164
SM_CN	78	597	326
SM_PD	107	574	319

<sup>(1)</sup> PF = Passo Fundo; SM = Santa Maria; PD = Plantio Direto; CN = Campo Nativo.

As coletas foram realizadas em novembro de 2006, nos dois solos. Em cada tratamento as amostras foram coletadas em um único ponto no campo. Essa metodologia de coleta foi usada seguindo os padrões do grupo da Universidade de Kiel (Alemanha) e em função do curto período de permanência dos pesquisadores e dos equipamentos trazidos da Alemanha para a realização dos testes. Em cada ponto e camada (Tabela 13) foi coletado em anéis (0,10 m de diâmetro interno e 0,03 m de altura) um conjunto de 10 amostras, para os ensaios de compressibilidade. As amostras foram coletadas nas camadas de 0,00-0,07, 0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m. Os cilindros de solo foram coletados a partir da profundidade superior de cada camada, com exceção da camada de 0,00-0,07 m, onde foi retirada uma camada superficial de aproximadamente 0,02 m e, a partir daí, coletados os cilindros. Em cada análise foi utilizada parte desse conjunto de amostras. Portanto, para cada análise será apresentado o número de amostras utilizadas (n).

Nos locais dos testes, o plantio direto havia sido implantado há 14 anos. A condição de uso da lavoura representa as práticas culturais e de manejo, características do sistema de PD adotado em cada região. No Latossolo, durante o inverno a área de PD é cultivada com trigo e no verão com soja e milho. No Argissolo, na área do PD durante o verão cultiva-se soja, e no inverno o solo fica coberto com aveia e azevém, os quais são dessecados para a implantação da próxima safra de soja. O CN, no Argissolo, recebia esporadicamente o pisoteio de animais.

Na Tabela 14 são apresentadas as condições iniciais de umidade e densidade do solo submetido ao tráfego de máquinas nos diferentes usos. Para determinação da umidade, foi coletada uma amostra de solo com estrutura não preservada em cada camada, a qual foi pesada úmida e levada para a estufa a 105 °C por 24 horas. Após esse período, foram pesadas as amostras secas em estufa, obtendo-se assim a umidade gravimétrica do solo. A densidade foi determinada conforme metodologia descrita no capítulo 1.

**Tabela 14 - Condições de umidade e densidade do solo antes do tráfego das máquinas**

<b>Local e uso do solo<sup>(2)</sup></b>	<b>Umidade, g g<sup>-1</sup></b>	<b>Densidade, Mg m<sup>-3</sup></b>
<b>Camada de 0,00-0,07 m</b>		
<b>PF_PD</b>	0,31	1,41
<b>SM_CN</b>	0,11	1,57
<b>SM_PD</b>	0,12	1,57
<b>Camada de 0,10-0,15 m</b>		
<b>PF_PD</b>	0,28	1,43
<b>SM_CN</b>	0,13	1,55
<b>SM_PD</b>	0,12	1,65
<b>Camada de 0,25-0,30 m</b>		
<b>PF_PD</b>	0,31	1,40
<b>SM_CN</b>	0,11	1,51
<b>SM_PD</b>	0,13	1,57
<b>Camada de 0,40-0,45 m</b>		
<b>PF_PD</b>	0,34	1,27
<b>SM_CN</b>	0,12	1,51
<b>SM_PD</b>	0,12	1,48

<sup>(2)</sup> PF = Passo Fundo; SM = Santa Maria; PD = Plantio Direto; CN = Campo Nativo.

## 6.1.6 Análises

### 6.1.6.1 Pressão de preconsolidação

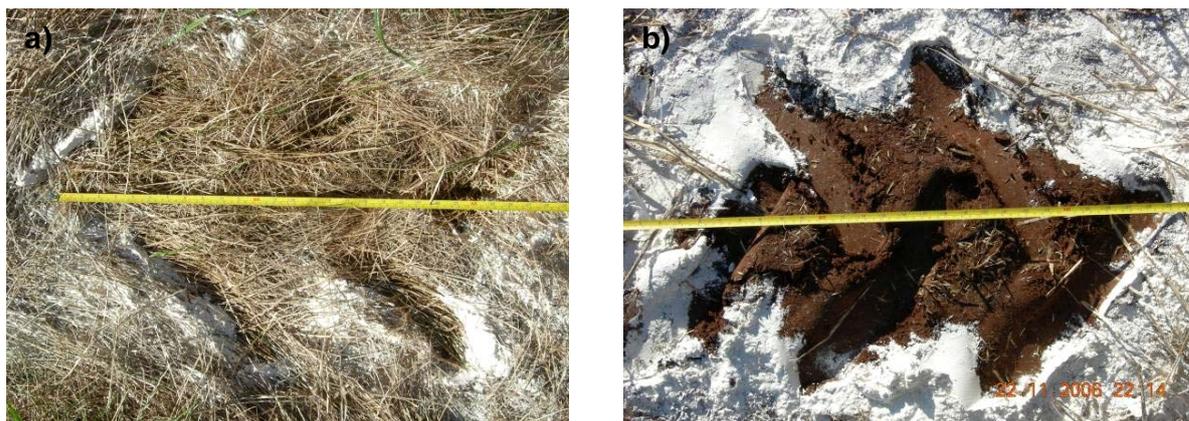
As amostras foram saturadas por um período de 24 horas e, posteriormente, colocadas sobre placas porosas de cerâmica e náilon, nas quais foi aplicada uma tensão de 30 kPa. Sob essa tensão, as amostras do Latossolo permaneceram 12 dias, e as do Argissolo, durante sete dias. Essa diferença de tempo para o equilíbrio da tensão da água nas amostras se deve ao fato de o solo argiloso reter mais a água e, conseqüentemente, necessitar de mais tempo para atingir o equilíbrio. Depois de equilibradas, as amostras foram pesadas e submetidas aos diferentes ciclos de compressão (Tabela 15). Para cada tratamento e camada foram feitas três repetições no laboratório. A pressão de preconsolidação foi determinada conforme metodologia de Casagrande (HOLTZ; KOVACS, 1981), de forma manual, sem auxílio de software.

**Tabela 15 - Ciclos de compressão aplicados nas amostras**

<b>Solo</b>	<b>Cargas aplicadas (kPa)</b>	<b>Tempo de descarga (s)</b>
<b>Compressibilidade estática</b>		
Latossolo e Argissolo	20, 30, 40, 50, 70, 100 120, 150, 200, 300, 400	600 e 7.200

### 6.1.6.2 Pressão de contato pneu-solo

Para determinação da área de contato pneu-solo, inicialmente marcou-se com farinha ao redor do pneu. Após a retirada a máquina, foi colocada uma trena no sentido longitudinal (Figura 32) e tirada uma foto digital; com o auxílio do CorelDraw, foi marcada a área delimitada pela farinha, que é a área a ser calculada. Essa área foi exportada como uma imagem, e colocada em escala no IrfanWiev; posteriormente, no software Scion Image, foi calculada a área de contato pneu-solo para cada máquina, a pressão de insuflagem do pneu e a cobertura do solo.



**Figura 32 - Imagem da área de contato pneu-solo com a presença de palha (a) e sem a presença de palha (b) na superfície do solo.**

As pressões de contato estáticas entre pneu e solo para cada máquina utilizada também foram calculadas com o auxílio de dois modelos para duas situações distintas: com e sem palha na superfície do solo. A palha na superfície era de azevém, logo após a senescência.

1. Modelo de Pressão Nominal no Solo (Nominal Ground Pressure, NGP) (MIKKONEN; WUOLIJOKI, 1975) para grandes áreas de contato, em que se obtém uma pressão hipotética mínima. Neste modelo não são usadas as variáveis: rigidez da carcaça, diâmetro e pressão interna do pneu.

O modelo de pressão nominal no solo descreve a relação entre a carga sobre o eixo ( $W$ ), a largura do pneu ( $b$ ) e o diâmetro ( $d$ ) (MIKKONEN; WUOLIJOKI, 1975):

$$p_c = \frac{W}{b \times \frac{d}{2}} \quad [33]$$

O cálculo da área de contato pneu-solo está baseado, teoricamente, em um afundamento de aproximadamente 15% do pneu no solo. Esse modelo pode ser considerado um bom “modelo padrão” para calcular a área de contato do pneu e a pressão no solo.

2. Modelo de Ziesak e Matthies (2001). Diferentemente do modelo anterior, a rigidez da carcaça tem influência na área de contato e, com isso, faz-se um zoneamento da pressão de contato. A zona da área de contato logo abaixo do eixo tem uma pressão maior e vai diminuindo conforme se afasta do centro da área de contato. Neste modelo entram as especificações do pneu, como a rigidez da carcaça, o diâmetro e a pressão interna.

Os autores afirmam que a pressão de contato pneu-solo não pode ser calculada simplesmente pela carga sobre o pneu e sua área de contato, pelo fato de a distribuição da pressão sob os pneus flexíveis ser uniforme (Figura 33). O cálculo mostra que a pressão máxima encontra-se abaixo do centro do eixo. Com isso, os cálculos das pressões correspondem mais ou menos à pressão máxima exercida pelo pneu no solo.



Figura 33 - Área de contato de um pneu com nítida diferença da pressão de contato (modificado por ZIESAK; MATTHIES, 2001).

Para as máquinas utilizadas nos ensaios a campo, foi calculada a pressão de contato com a seguinte equação:

$$\begin{aligned}
 p_c = & -3947 + 0,000452 \times \frac{W \times PR \times p_i}{b \times d} + 29,4 \times \ln\left(\frac{W}{9,81}\right) - \frac{4239}{p_i} - 253,3 \times d^2 - \frac{1149,5}{b} \\
 & - 2911,8 \times \ln(1000 \times b) + 1807 \times b \times d + \frac{1,295 \times W}{b \times d} - 0,009 \times W^2 - \frac{7117,3}{PR} - 440,6 \times \ln(PR) \\
 & + \frac{1144,4}{h} + 3845 \times \ln(h \times 1000) - \frac{2,226 \times b}{1000} \times \left[ \left( \frac{1000 \times d}{2} \right)^2 - (500 \times d - 1000 \times h)^2 \right] \quad [34]
 \end{aligned}$$

em que:

$p_c$  = pressão média pneu-solo, kPa;

$W$  = peso sobre o eixo, kN;

$p_i$  = pressão de insuflagem do pneu, kPa;

$PR$  = número de lonas; e

$b$  = largura do pneu, m;

$d$  = diâmetro do pneu, m.

$h$  = altura da banda de rodagem, m;

Na Tabela 16 são apresentadas as especificações das máquinas e, na Tabela 17, as pressões e a área de contato pneu-solo. As pressões exercidas pelas máquinas foram calculadas conforme metodologia descrita no capítulo 1.

**Tabela 16 - Especificações das máquinas agrícolas utilizadas no Latossolo e Argissolo**

<b>Máquina</b>	<b>Tipo de pneu</b>	<b>Massa, Mg</b>
<b>Latossolo</b>		
Colhedora MF 3640	18.4-26 R1	7,83
Trator MF 265 - 4x2	14.9-28 R1	4,08
<b>Argissolo</b>		
Colhedora MF 3640	23.1-26 R2	7,83
Trator MF 275 - 4x2	18.4-30 PD22	3,76

**Tabela 17 - Pressões exercidas pelas máquinas em cada condição avaliada no campo**

<b>Latossolo</b>					
Trator		Colhedora sem palha		Colhedora com palha	
Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
Pressão interna do pneu, kPa					
300	150	150	300	150	300
Área de contato pneu-solo, m <sup>2</sup>					
0,034	0,092	0,133	0,054	0,190	0,049
Pressão exercida no solo, kPa					
76,9	188,9	231,2	141,8	161,5	122,5
<b>Argissolo</b>					
Pressão interna do pneu, kPa					
300	150	180	300	180	300
300	60	-	-	110	300
Área de contato pneu-solo, m <sup>2</sup>					
0,034	0,126	0,106	0,050	0,151	0,054
0,034	0,153	-	-	0,203	0,054
Pressão exercida no solo, kPa					
38,45	134,9	299,1	123,6	209,4	110,6
38,45	110,7	-	-	156,1	110,5

### 6.1.6.3 Transdutor de tensão no solo (Soil Stress Transducer, SST)

Para obtenção das tensões no solo, Nichols et al. (1987) desenvolveram o primeiro transdutor de tensão no solo (Soil Stress Transducer, SST). Horn et al. (1992), com base no modelo de Nichols et al. (1987), criaram o *Modelo Kiel1*, e

Kühner (1997), o *Modelo Kiel2*, que foi modificado por Wierman (1998) e denominado de *Modelo Kiel3*, sendo este o mais novo sistema de medição de tensões no solo, conhecido como *SST3*, o qual foi descrito detalhadamente por Wierman (1998) e discutido por Gräsle (1999). O *SST3* (Figura 34) tem uma esfera com um raio de 33 mm e seis sensores (células de carga) com 11 mm de raio. A direção das células de carga no *SST3* foi modificada para um ângulo de  $50,8^\circ$  em relação aos anteriores, descritos detalhadamente por Nichols et al. (1987) e Kühner (1997).



Figura 34 – Sensor do SST3 e o datalogger analógico.

Os dados técnicos dos três modelos desenvolvidos são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Especificações dos diferentes modelos do SST

Tipo SST	Globo do sensor				Células de carga		
	Material	Diâmetro, mm	Forma do globo	Ligações elétricas	Nº de células	Material	Espessura da membrana, mm
Kiel 1	Alumínio	66	¼	Cada sensor separado	6	Alumínio	3
Kiel 2	Alumínio	66	¼	Um cabo 16 ligações	6	Aço	2
Kiel 3	Alumínio	66	Inteiro	Um cabo 16 ligações	6	Aço	2

Para os cálculos da tensão normal  $\sigma_1$ , da média da tensão normal MNS e da tensão cisalhante octaédrica OCTSS, foi usado o programa SSTKIEL.EXE, de Johnson (1994).

Os SSTs e o DTS são ligados a um datalogger analógico (Figura 34), descrito por Kühner (1997). A fonte de alimentação de 5V do datalogger analógico funciona com um controle do SST/DTS, o qual é composto por três partes:

1. Um microcontrolador da Família 8051 é responsável pela aquisição dos dados e controle; também faz a transformação dos dados analógicos em digital. A interface para o usuário é constituída de um *display* e um *notebook* (interface principal). O conversor de dados analógicos para digital e o multiplexador tem 6 x 10 canais, onde podem ser ligados no máximo seis cabos (6 SST ou 4 SST e 2 DTS).
2. O sistema pode ser alimentado por baterias de 12V ou com 220V. A alimentação do datalogger (5V) é feita através do controlador. Os dados digitais são transferidos para o notebook através de um cabo ligado a porta serial.
3. O software usado no controle foi desenvolvido sobre a plataforma do LabView. Nesse programa é feita a seleção dos sensores do SST e DTS que estão conectados ao datalogger e se configura a frequência para a aquisição dos dados e o tempo de aquisição.

#### 6.1.6.4 Sistema transdutor de deslocamento (Displacement Transducer System, DTS)

O movimento espacial multidimensional, durante o tráfego das máquinas, é medido através do DTS (Figura 35). Mede-se o movimento linear do solo em três direções (X, Y e Z) em um ponto de referência fora do solo, e depois se realizam os cálculos do movimento dinâmico do solo. A construção e o funcionamento detalhado estão descritos em Kühner (1997).

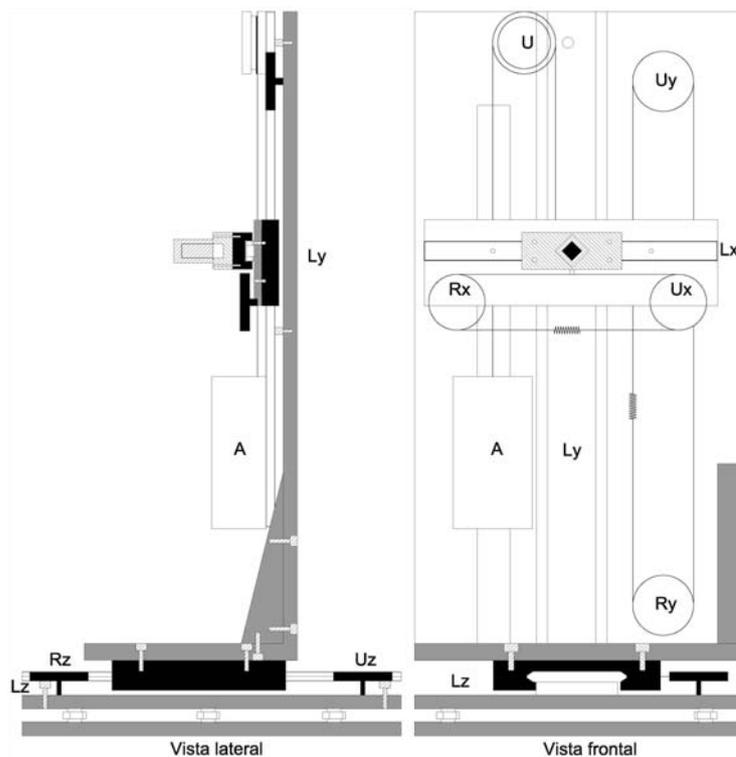


Figura 35 - Esboço do DTS, em um desenho fora de escala (KÜHNER, 1997).

#### 6.1.6.5 Medidas combinadas SST/DTS

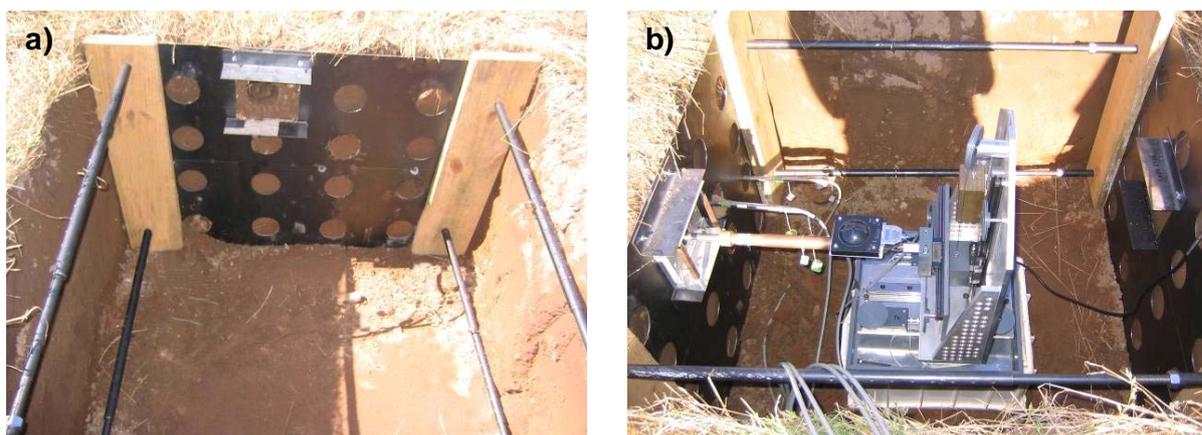
Para as medidas, foi aberta uma trincheira com dimensões de 1,0 x 1,0 x 0,8 m. Nas laterais onde foi realizado o tráfego foram colocadas chapas de aço com espessura de 4 mm, para evitar deslizamentos (Figura 36 a). A chapa de aço era perfurada nas profundidades de 0,12, 0,27, 0,42 e 0,60 m, para instalação dos sensores do SST.

Os sensores do SST não foram instalados na camada de 0,00-0,07 m, pois, como a cabeça do sensor tem diâmetro de 0,06 m, a parte superior ficaria praticamente exposta, podendo ser danificada pelo pneu da máquina no momento do tráfego.

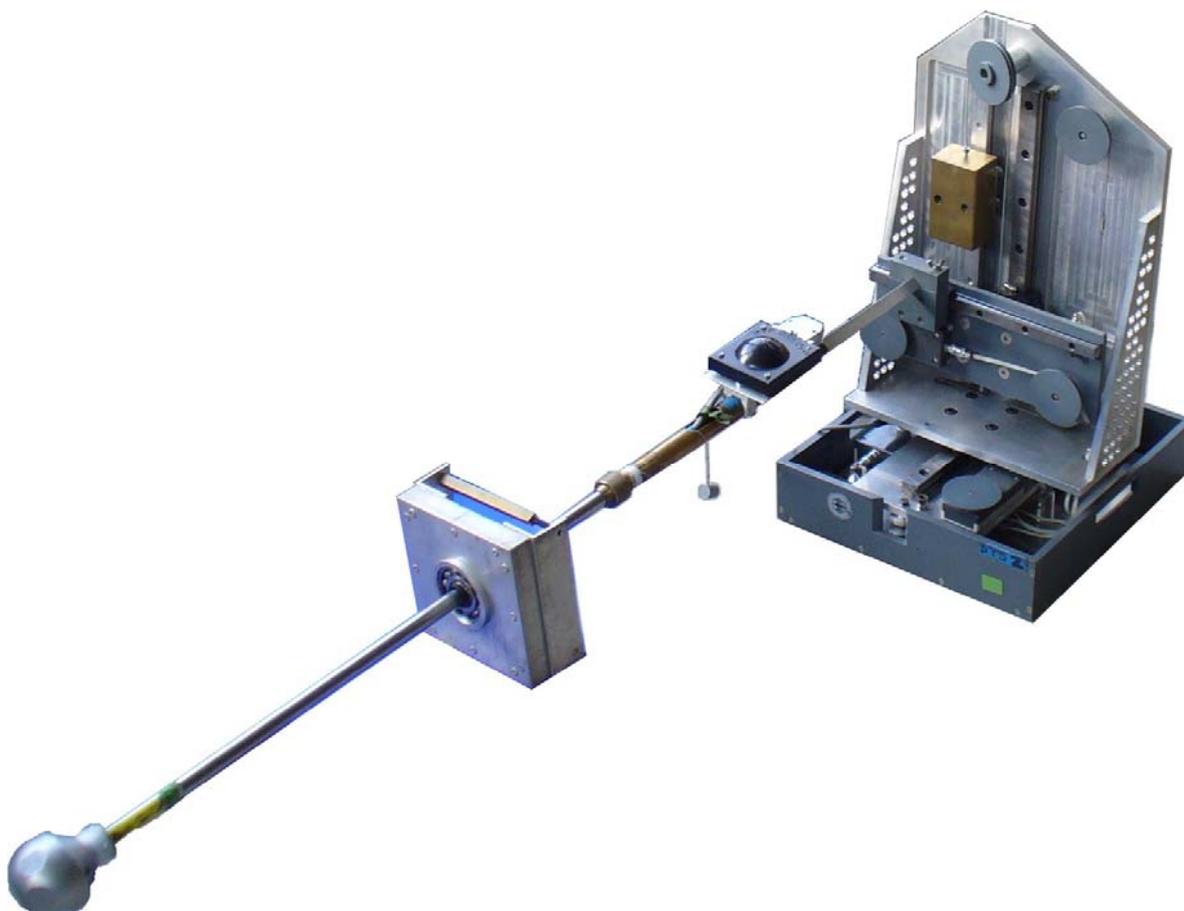
Para instalação dos sensores foram abertos canais na horizontal, com auxílio de um cano com diâmetro de 70 mm, a uma distância de 0,50 m da borda da trincheira, para posicionar os sensores onde passaria o meio dos pneus. Foram realizadas três repetições, de uma, duas e três passadas das máquinas para cada condição estudada.

O DTS foi colocado na trincheira sobre barras de ferro ou madeira, as quais foram niveladas previamente nos dois sentidos. A barra do SST foi ligada através de

um adaptador com o DTS. A barra passa através de um rolamento de esferas, o qual está fixado na chapa de aço, obtendo-se assim um ponto fixo para as determinações do movimento do solo. O DTS foi conectado ao SST na profundidade de 0,12 m, como se pode observar na Figura 36 b. Na Figura 37 é apresentada uma vista geral de todo o sistema montado.



**Figura 36 - Trincheira com a chapa em uma das laterais e escoras (a), e detalhe da instalação dos sensores do SST e do DTS (b).**



**Figura 37 - Vista geral da montagem do SST, da esfera (rolamento) e do DTS.**

### 6.1.6.6 Tensões de registro no tráfego da máquina sobre o SST/DTS

Nesta seção é explanado o comportamento das tensões para a tensão normal principal ( $\sigma_1$ ) para a colhedora MF 3640, utilizada em Latossolo sem presença de palha na superfície do solo, onde os sensores do SST foram instalados em três profundidades: 0,12, 0,27 e 0,42 m, e o DTS, na profundidade de 0,12 m.

O esquema da posição e profundidade dos sensores do SST e do DTS está representado na Figura 38. Os números 1, 2 e 3 representam o número do sensor; o sensor de número 2 sempre foi instalado na posição onde o DTS era instalado, sendo o único sensor compatível com o adaptador do DTS.

Na Figura 39 está representado (como exemplo) o comportamento da tensão normal principal no solo, quando este foi submetido ao tráfego da colhedora. Observa-se que o sensor que está na profundidade de 0,42 m é o primeiro a receber a pressão gerada pelo tráfego da colhedora, sendo depois na profundidade de 0,27 m e, por fim, a 0,12 m de profundidade, devido à disposição da instalação dos sensores, como demonstrado na Figura 38.

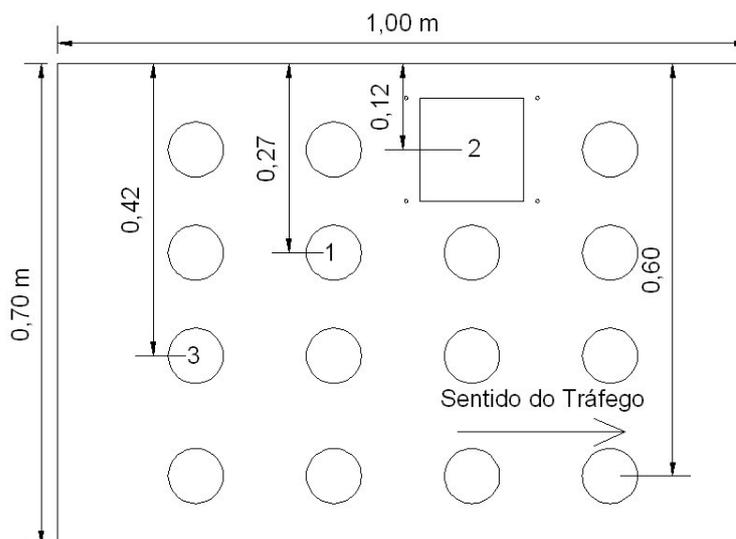
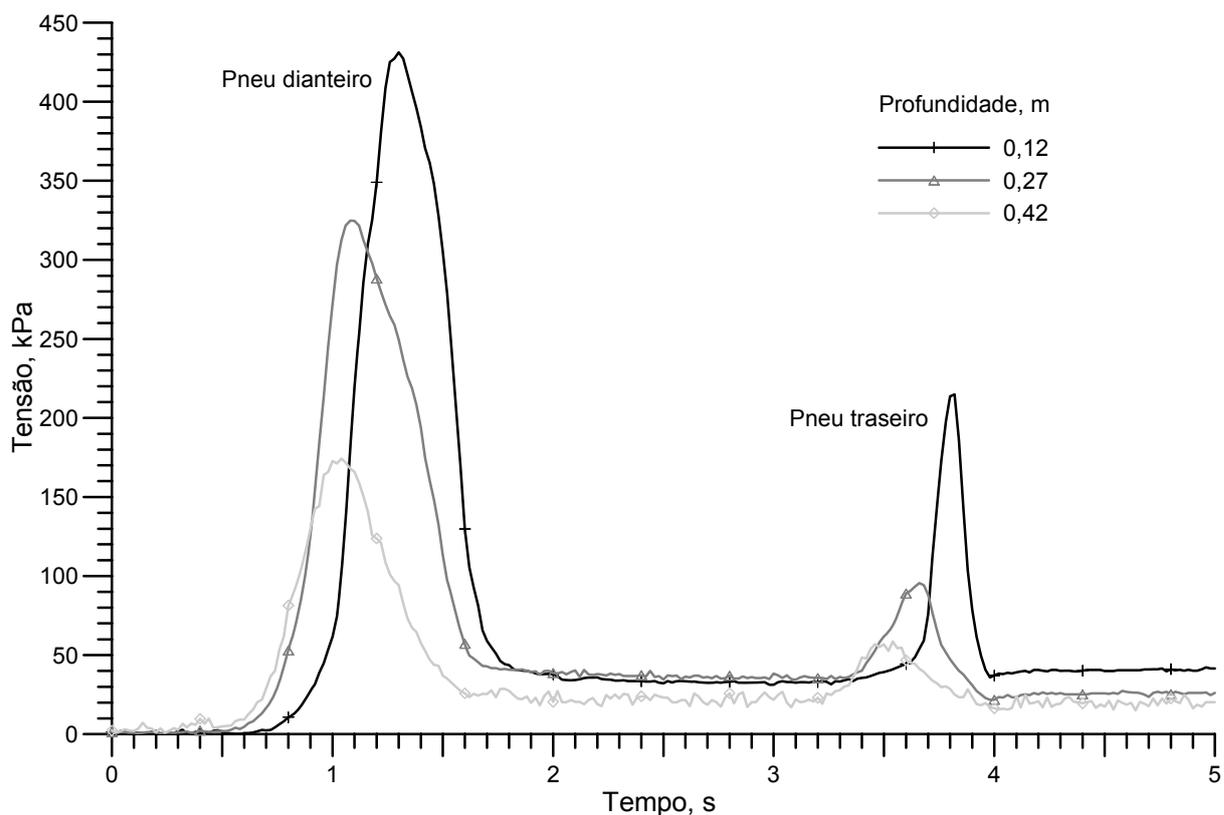


Figura 38 - Esquema de instalação dos sensores do SST e do DTS.



**Figura 39 - Comportamento das tensões no solo no momento do tráfego com a colhedora, em três profundidades.**

O SST e DTS foram trazidos para Brasil através do convênio CAPES/PROBRAL em outubro de 2006, permanecendo aqui durante o mês de novembro para a realização dos testes no campo. Em razão desse curto período, da complexidade e do enorme tempo necessário para a instalação deles, não foi possível realizar mais testes no campo. Os dados obtidos com DTS não puderam ser aproveitados, devido a um provável erro de calibração, a qual foi feita no laboratório da Universidade de Kiel antes do envio para o Brasil, pois não era possível realizar a calibração no Laboratório de Física do Solo da UFSM, ou a alguma avaria durante o transporte da Alemanha para o Brasil, que não foi detectada antes do uso do equipamento.

Neste capítulo não são apresentados valores de densidade, curva de retenção de água no solo, condutividade hidráulica do solo saturado e permeabilidade ao ar, uma vez que não foram realizadas coletas antes e após os tráfegos, em razão do pouco tempo disponível para a realização dos trabalhos no campo.

Na a análise estatística foi utilizado o pacote estatístico SAS, em que foi feita a análise de variância e a comparação de médias pela Diferença Mínima Significativa (DMS) com 5% de significância.

### 6.3 Resultados

#### 6.1.7 Avaliação da pressão exercida pelas máquinas agrícolas com o transdutor de tensão no solo (SST) e da pressão de preconsoidação

##### 6.1.7.1 Latossolo

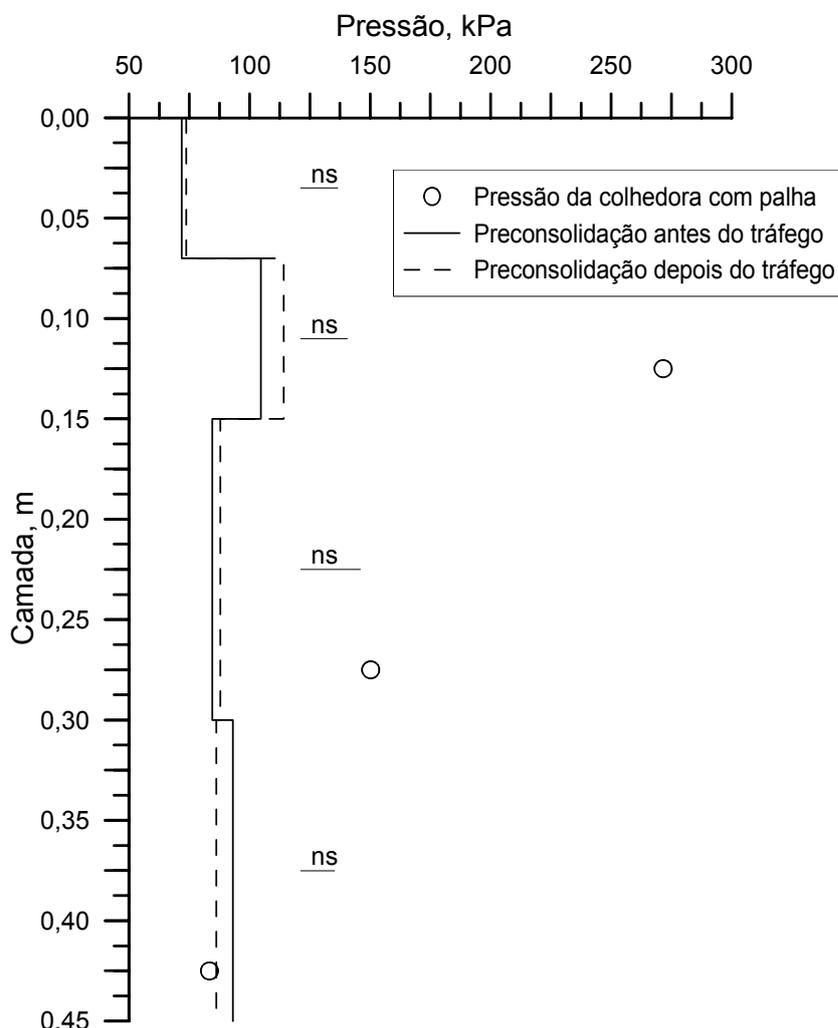
A  $\sigma_p$  antes e após o tráfego da colhedora no solo com presença de palha na superfície não apresentou diferença significativa em todas as camadas avaliadas (0,00-0,07, 0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m) (Figura 40). Com exceção da camada de 0,10-0,15 m, os valores da  $\sigma_p$  foram inferiores a 100 kPa.

Até a camada de 0,30 m a pressão exercida no solo pela colhedora, medida pelo sensor SST, foi superior à  $\sigma_p$ , e, para a camada de 0,40-0,45 m, os valores foram semelhantes (Figura 40). Em razão de a pressão exercida pela colhedora ser superior à  $\sigma_p$  antes do tráfego, esperava-se uma  $\sigma_p$  após o tráfego superior e significativamente diferente em relação a antes dele. Esse fato pode não ter ocorrido devido à capacidade de retorno do solo à sua condição anterior ao tráfego, ou seja, devido à capacidade elástica do solo.

A umidade para as diferentes camadas do solo, antes do tráfego da colhedora, foi apresentada na Tabela 14, e a umidade volumétrica dos cilindros com solo equilibrado na tensão de 30 kPa, para os ensaios na prensa uniaxial, foi de 37%.

Chama a atenção o fato de que a camada de 0,10-0,15 m apresentou os maiores valores de  $\sigma_p$ . A  $\sigma_p$  nesta camada foi superior a 100 kPa, enquanto nas demais camadas ela foi inferior a esse valor. A pressão exercida pela colhedora nesta camada foi de 271 kPa e, nas demais, inferior a 150 kPa. Esses resultados demonstram que as pressões geradas pelo tráfego das máquinas agrícolas se

concentram nesta camada, com conseqüente incremento da densidade do solo (Tabela 14).

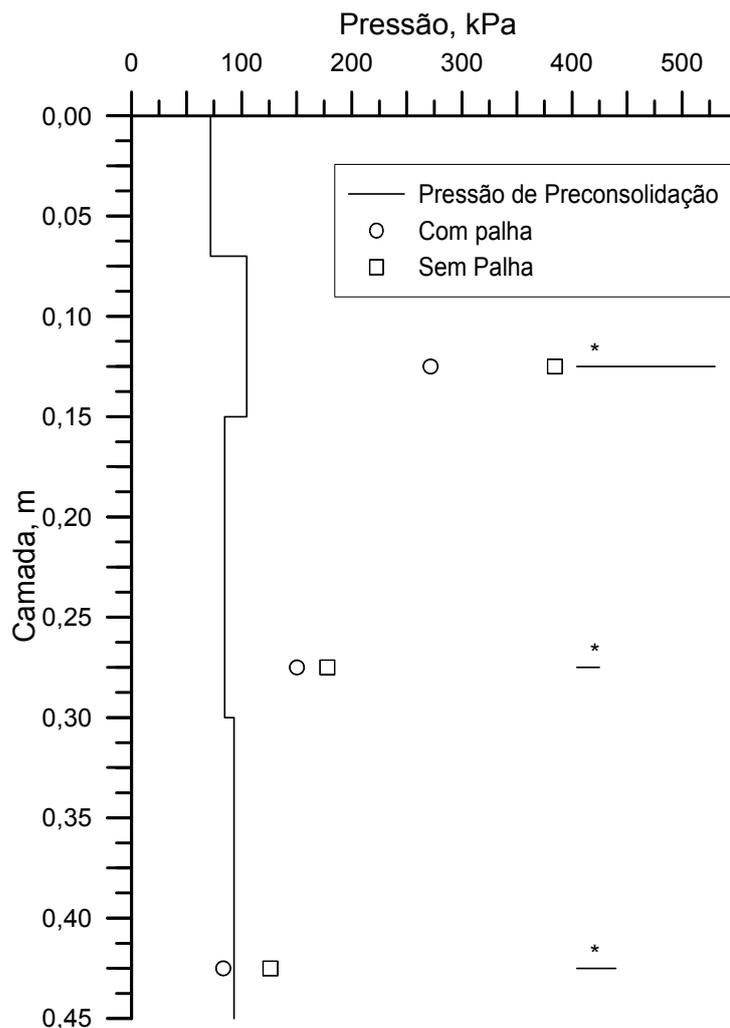


**Figura 40 - Pressão de preconsolidação antes e após o tráfego da colhedora e distribuição das tensões medidas no transdutor de tensão (SST), em diferentes camadas do Latossolo Vermelho Distrófico típico (UM Passo Fundo) sob plantio direto.**

\* = diferença significativa; ns = diferença não significativa pelo teste de DMS (5%).

Os tráfegos realizados com a colhedora, sem e com a presença de palha na superfície do solo, foram significativos nas três camadas avaliadas (0,10-0,15, 0,25-0,30 e 0,40-0,45 m), sendo a maior pressão medida sem a presença da palha (Figura 41).

Dois fatores podem explicar maior a pressão no solo sem palha na superfície: menor área de contato sem a presença de palha; e a palha absorveu parte da energia gerada pelo tráfego da colhedora, dissipando esta energia em uma maior área e, dessa forma, reduzindo as pressões transmitidas para as camadas avaliadas no solo.



**Figura 41 - Pressão de pré-consolidação antes do tráfego da colhedora e distribuição das tensões medidas no transdutor de tensão (SST), em duas condições, com palha e sem palha na superfície, em diferentes camadas do Latossolo sob plantio direto, com palha e sem palha na superfície.**

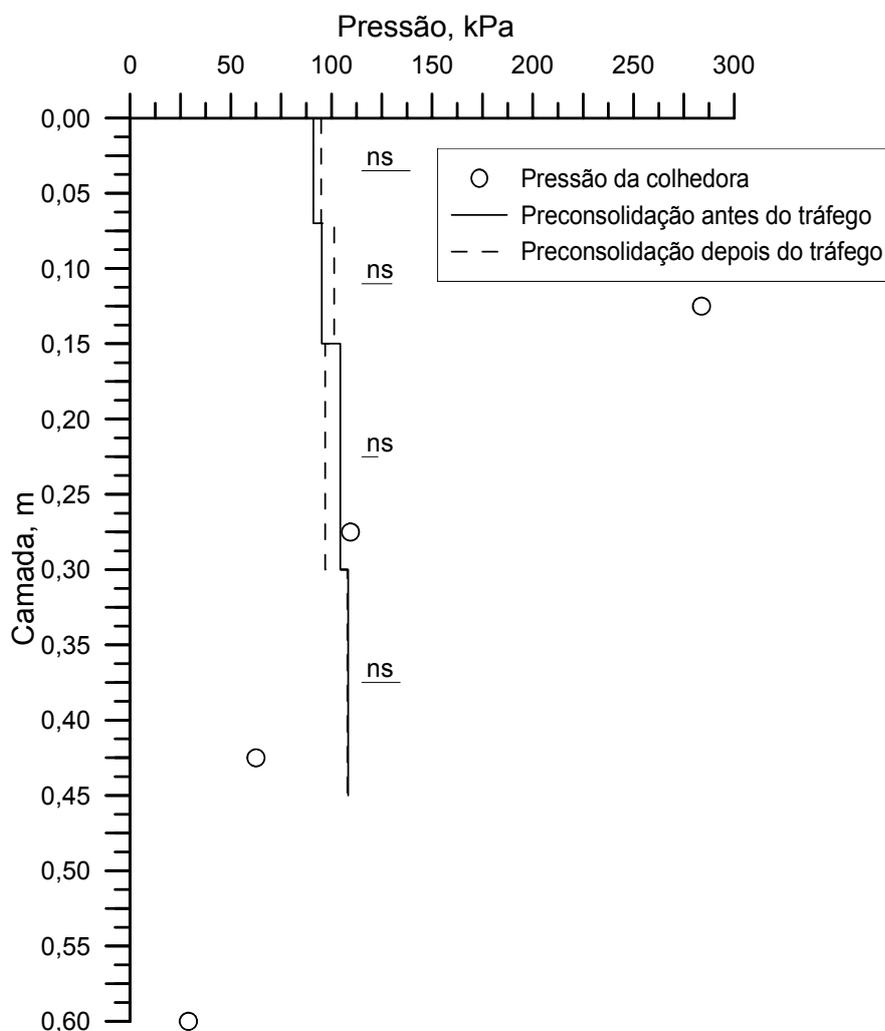
\* = diferença significativa; ns = diferença não significativa pelo teste de DMS (5%).

#### 6.1.7.2 Argissolo

A  $\sigma_p$  não diferiu significativamente em nenhuma das quatro camadas avaliadas (Figura 42).

Assim como no Latossolo, até a camada de 0,30 m, a pressão exercida no solo pela colhedora medida pelo sensor SST foi superior à  $\sigma_p$ , e as pressões geradas pelo tráfego das máquinas agrícolas se concentraram na camada de 0,10-0,15 m (Figura 42), com conseqüente incremento da densidade do solo (Tabela 14). Esperava-se uma  $\sigma_p$  após o tráfego superior e significativamente diferente em relação a antes do tráfego, devido à elevada pressão exercida pela colhedora.

Nas camadas abaixo de 0,15 m, a pressão medida no SST foi diminuindo, reduzindo assim a deformação e compactação do solo. Essa diminuição pode estar associada à dissipação, nas camadas superiores do solo, da energia aplicada pelas máquinas.



**Figura 42 - Pressão de preconsolidação antes e após o tráfego da colhedora e distribuição das tensões medidas no transdutor de tensão (SST), em diferentes camadas do Argissolo sob plantio direto.**

\* = diferença significativa; ns = diferença não significativa pelo teste de DMS (5%).

A ausência de palha na superfície do solo resultou em aumento nas pressões exercidas pela colhedora em todas as camadas do solo, as quais foram significativas (Figura 43).

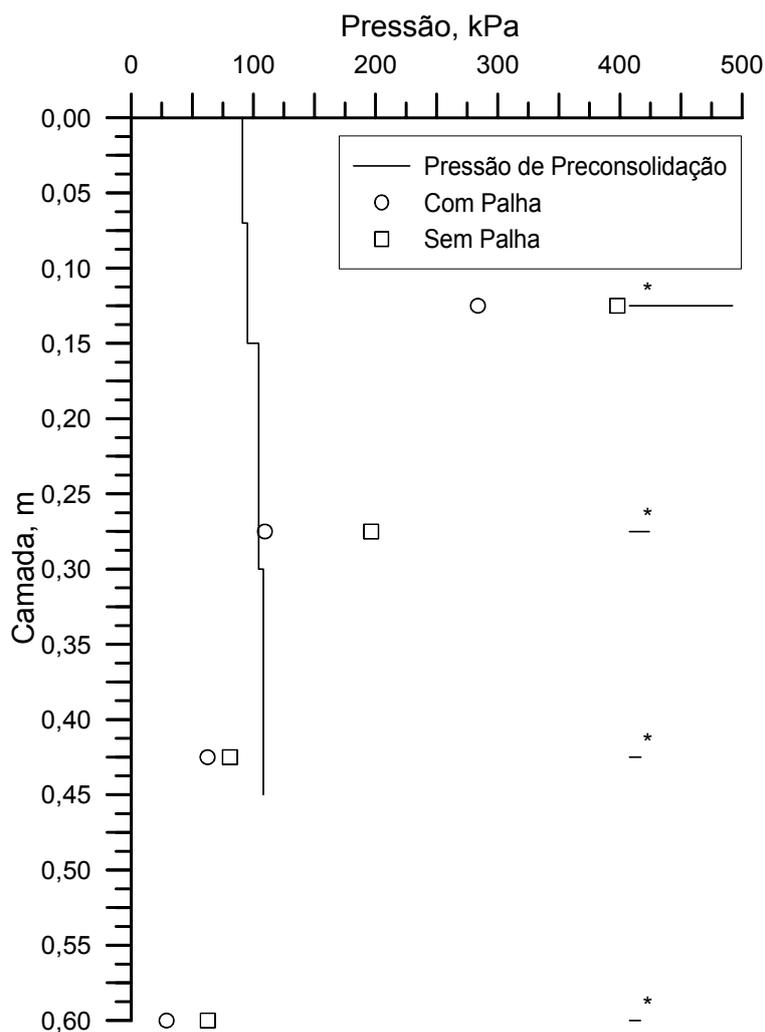
A pressão exercida pela colhedora foi diminuindo com o aumento da profundidade. Na camada de 0,10-0,15 m, a pressão medida com palha foi de 333 kPa e, sem palha, de 391 kPa, – diferença correspondente a uma redução de 15% da

pressão no solo. Mesmo com essa redução, a pressão exercida pela colhedora ainda foi maior que a  $\sigma_p$  do solo, havendo a possibilidade de ter ocorrido uma compactação adicional após o tráfego da colhedora, o que só poderia ser comprovado através da análise da  $\sigma_p$  após o tráfego.

A redução da pressão exercida pela colhedora na camada de 0,25-0,30 m foi ainda maior. A pressão com e sem palha foi, respectivamente, de 169 e 204 kPa, correspondente a uma redução de 17%. Assim como na camada de 0,10-0,15 m, essa redução não foi suficiente para a pressão ser menor que a  $\sigma_p$ .

Nas camadas de 0,40-0,45 e 0,55-0,60 m, a redução da pressão no solo com palha na superfície foi, respectivamente, de 35 e 42%, em relação ao solo sem palha.

De acordo com os resultados apresentados até o presente momento, a redução da pressão interna dos pneus das máquinas agrícolas e a presença de palha na superfície do solo podem contribuir para reduzir o efeito da compactação gerado pelo tráfego de máquinas agrícolas. O maior efeito das pressões exercidas pelas máquinas, principalmente em PD, é na camada de 0,10-0,15 m, influenciando a  $\sigma_p$  e a densidade do solo. Nesta camada de solo ocorre o acúmulo das pressões exercidas pelas máquinas agrícolas, reduzindo o efeito das pressões em profundidade.



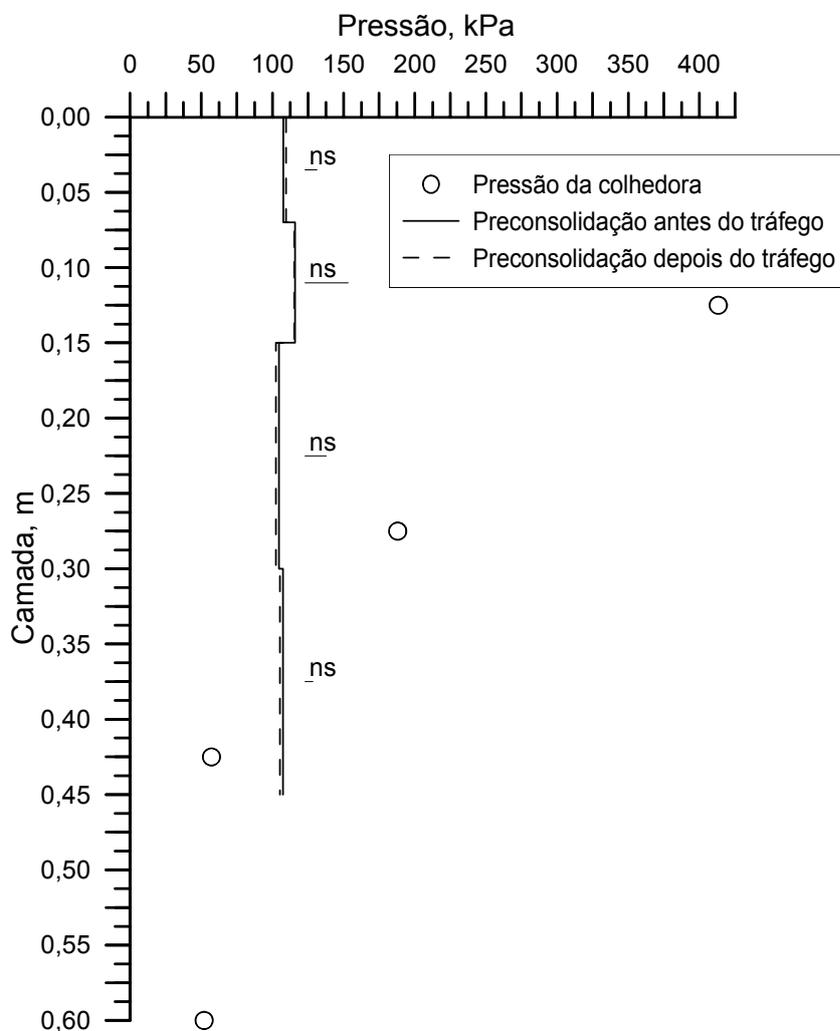
**Figura 43 - Pressão de preconsolidação antes do tráfego da colhedora e distribuição das tensões medidas no transdutor de tensão (SST), em diferentes camadas do Argissolo sob plantio direto, com palha e sem palha na superfície.**

\* = diferença significativa; ns = diferença não significativa pelo teste de DMS (5%).

O solo sob CN, trafegado com a colhedora, não apresentou diferenças significativas na  $\sigma_p$  antes e depois do tráfego em nenhuma das camadas avaliadas (Figura 44); a  $\sigma_p$  ficou em torno de 100 kPa. Dessa forma, não foi identificada uma camada mais compactada, pois com a inexistência de tráfego de máquinas agrícolas o solo é mais homogêneo em suas características físicas; essa afirmação é reforçada pelos valores semelhantes de densidade (Tabela 14) nas camadas do solo.

O comportamento da pressão, exercida no solo pela colhedora medida pelo sensor SST, foi semelhante ao verificado no PD nos dois solos em estudo, onde a camada de 0,10-0,15 m apresentou a maior pressão com o tráfego. No entanto, diferentemente das observações anteriores, a  $\sigma_p$  não foi tão influenciada. No PD,

como o solo não é revolvido, as pressões exercidas pelas máquinas agrícolas se acumulam nele durante os anos, principalmente na camada de 0,10-0,15 m, influenciando a  $\sigma_p$ . Assim como no PD, nas camadas de 0,40-0,45 e 0,55-0,60 m as pressões foram inferiores à  $\sigma_p$ .



**Figura 44 - Pressão de preconsolidação antes e após o tráfego da colhedora e distribuição das tensões medidas no transdutor de tensão (SST), em diferentes camadas do Argissolo sob campo nativo.**

\* = diferença significativa; ns = diferença não significativa pelo teste de DMS (5%).

Avaliou-se o tráfego da colhedora variando a pressão interna do pneu, sendo 179 e 103 kPa no PD e 179 kPa no CN (Figura 45).

Como era esperado, com a redução da pressão interna do pneu, houve redução na pressão medida no solo (Figura 45). Observa-se que na camada de 0,10-0,15 m a diferença foi significativa; o menor valor da pressão exercida no solo foi com a pressão interna do pneu de 103 kPa no PD, sendo essa redução de aproximadamente 37% da pressão aplicada em relação ao PD (pressão interna do

pneu de 179 kPa) e 56% em relação ao CN, mas, mesmo assim, ainda sendo maior que a  $\sigma_p$ .

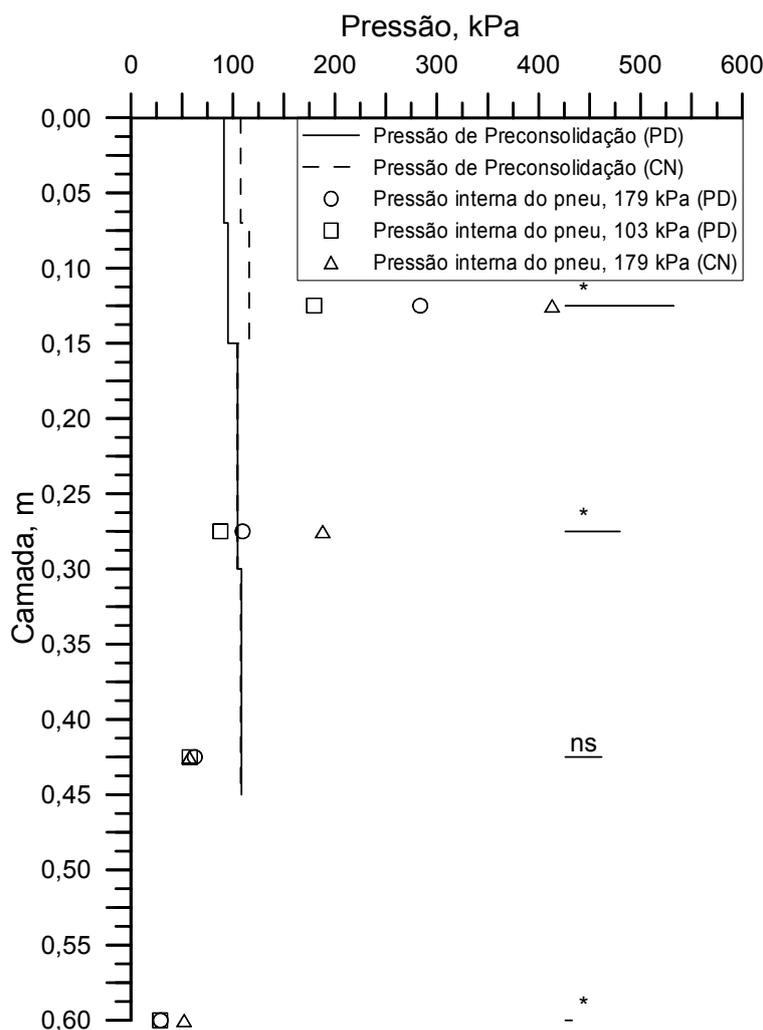
Uma elevada redução da pressão exercida no solo pela colhedora também ocorreu na camada de 0,25-0,30 m, sendo menor quando a pressão interna do pneu foi de 103 kPa, aproximadamente 55% menor em relação à pressão interna de 179 kPa, tanto no PD quanto no CN. Com a pressão interna do pneu de 103 kPa, a pressão média no solo exercida pela colhedora foi inferior à  $\sigma_p$ , comprovando que a pressão interna do pneu tem relação direta com a pressão exercida no solo pelas máquinas agrícolas. Nesse caso, a menor pressão interna do pneu não ocasionou uma compactação adicional ao solo.

Nas camadas de 0,40-0,45 e 0,55-0,60 m não houve diferença significativa na redução das pressões com a variação da pressão interna do pneu. É importante ressaltar que na camada de 0,10-0,15 m, onde encontram-se os maiores problemas de compactação no PD, obteve-se uma grande redução da pressão gerada pela colhedora quando reduzida a pressão interna do pneu.

Em todas as camadas do solo, as pressões exercidas pelo trator apresentaram diferença significativa entre as pressões internas do pneu de 55 e 145 kPa, enquanto para a pressão de 145 kPa no PD e no CN não houve diferença significativa entre elas (Figura 46).

Na camada superficial de 0,10-0,15 m houve redução de 36% na pressão exercida no solo pelo trator com pressão interna do pneu de 145 para 55 kPa, sendo uma redução expressiva, mas ainda superior em relação à  $\sigma_p$  do solo.

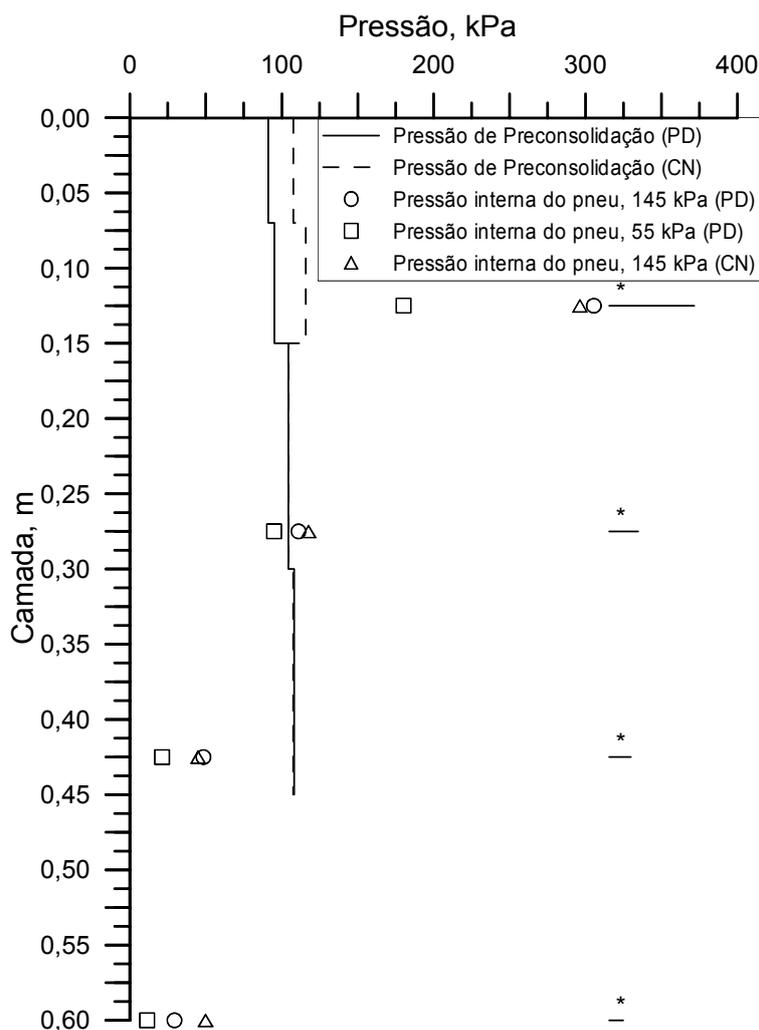
Na camada de 0,25-0,30 m essa redução foi menos expressiva (23%), porém suficiente para que o pneu com pressão interna de 55 kPa aplicasse uma pressão ao solo menor do que a  $\sigma_p$ .



**Figura 45 - Pressão de preconsolidação antes do tráfego e distribuição das tensões, medidas no transdutor de tensão (SST), da colhedora com duas pressões internas dos pneus (179 e 103 kPa) no plantio direto (PD) e uma pressão interna do pneu (179 kPa) no campo nativo (CN), em diferentes camadas do Argissolo.**

\* = diferença significativa; ns = diferença não significativa pelo teste de DMS (5%).

Nas camadas de 0,40-0,45 e 0,55-0,60 m, o efeito da redução da pressão interna do pneu ainda foi expressivo (54 e 53%, respectivamente); contudo, como o valor da pressão exercida pelo trator no solo, mesmo com pressão interna do pneu de 145 kPa, foi menor do que a  $\sigma_p$ , a redução da pressão interna do pneu não foi tão importante para o efeito da compactação em profundidade, mas foi significativa na redução da compactação na superfície do solo.



**Figura 46 - Pressão de pré-consolidação antes do tráfego e distribuição das tensões, medidas no transdutor de tensão (SST), do trator com duas pressões internas dos pneus (145 e 55 kPa) no plantio direto (PD) e uma pressão interna do pneu (145 kPa) no campo nativo (CN), em diferentes camadas do Argissolo.**

\* = diferença significativa; ns = diferença não significativa pelo teste de DMS (5%).

A pressão exercida pela colhedora, com pressão interna do pneu de 103 kPa, não apresentou uma tendência clara em relação ao número de passadas, na profundidade de 0,12 m (Figura 47). A primeira passada causou a maior pressão; nas demais, ora a pressão medida foi maior ora foi menor, o que se deve ao fato de que, como o sensor estava a uma pequena profundidade, na maior pressão é provável que o sensor tenha sofrido uma pressão direta da agarradeira do pneu – dessa forma, a pressão medida foi maior. Assim, nesta camada não há como visualizar uma tendência de aumento ou diminuição da pressão no solo com o acúmulo do tráfego em um mesmo local.

Nas profundidades seguintes (0,27, 0,42 e 0,60 m), observa-se claramente um incremento da pressão medida no solo com o aumento do número de passadas da colhedora. Pelo fato de o solo comportar-se como um corpo rígido, com o aumento do tráfego de máquinas, o solo compacta cada vez mais, e a pressão exercida pela máquina é transmitida em maiores profundidades e intensidade.

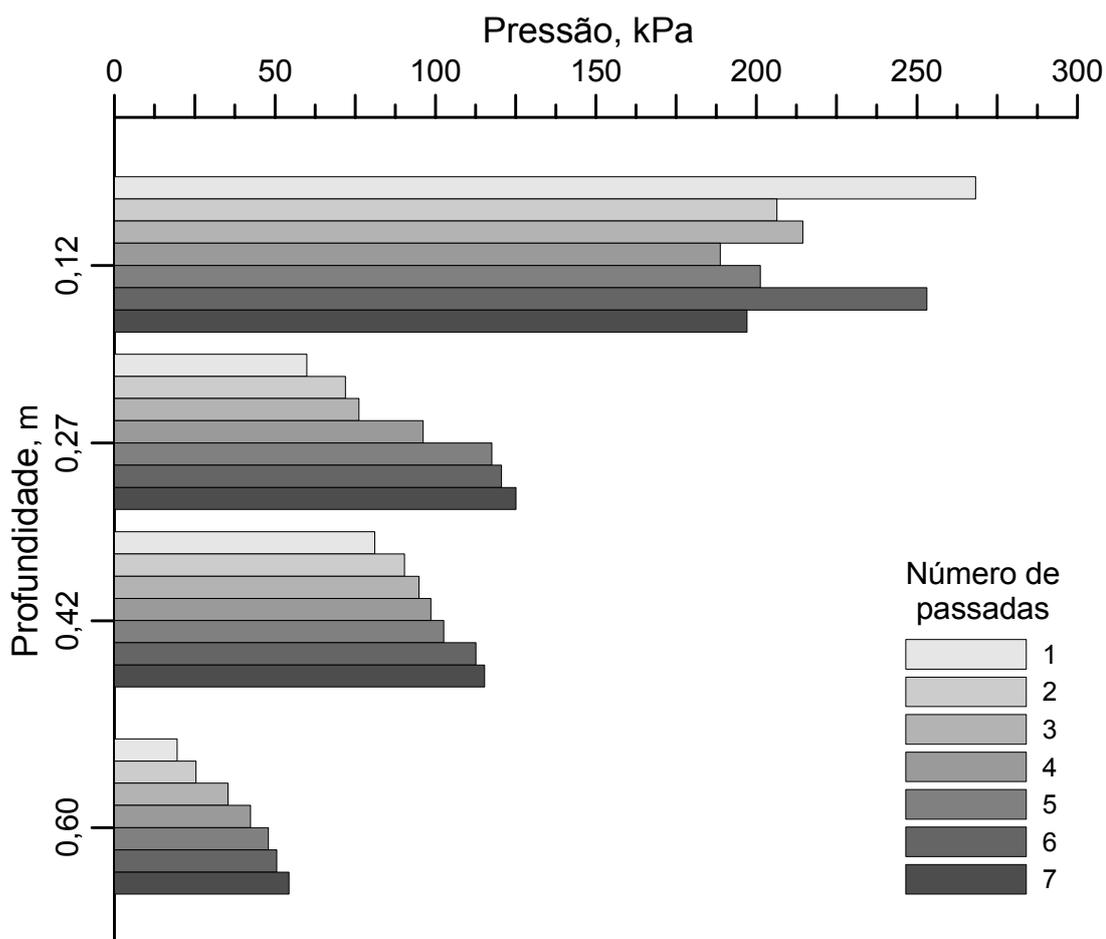


Figura 47 - Tensão normal, medida no transdutor de tensão (SST), exercida por sete passadas da colhedora com pressão interna do pneu de 103 kPa e com palha na superfície de um Argissolo sob plantio direto.

#### 6.1.8 Modelos para cálculo das pressões exercidas pelas máquinas sob o solo em plantio direto

Os valores obtidos com os dois modelos de cálculo de pressões, modelo de pressão nominal no solo (Nominal Ground Pressure, NGP) (MIKKONEN; WUOLIJOKI, 1975) e o modelo de zonas de pressão (ZIESAK; MATTHIES, 2001), foram distintos entre si e em relação aos valores medidos no campo (Tabela 19). No

modelo de pressão nominal não foram calculados valores com baixa pressão do pneu, pois, como este modelo não leva em conta a pressão interna do pneu, o valor de pressão é igual em qualquer pressão que o pneu esteja.

**Tabela 19 - Máquinas agrícolas e pressão exercida na área de contato pneu-solo para o Latossolo e Argissolo, utilizando-se dois modelos para os cálculos e os valores medidos no campo**

Máquina	Pneu	Massa, Mg	Pressão na área de contato, kPa				
			NGP <sup>1</sup>	MZP <sup>2</sup>	MZP <sup>2</sup>	Campo <sup>3</sup>	Campo <sup>4</sup>
Latossolo							
Colhedora MF 3640	18.4-26 R1	7,83	90,82 <sup>3</sup>	274,77 <sup>3</sup>	<sup>5</sup>	161,52	<sup>5</sup>
Trator MF 265 - 4x2	14.9-28 R1	4,08	58,94 <sup>3</sup>	100,83 <sup>3</sup>	<sup>5</sup>	188,95	<sup>5</sup>
Argissolo							
Colhedora MF 3640	23.1-26 R2	7,83	69,49 <sup>3</sup>	319,57 <sup>3</sup>	288,09 <sup>4</sup>	209,38	156,08
Trator MF 275 - 4x2	18.4-30 PD22	3,76	47,26 <sup>3</sup>	92,16 <sup>3</sup>	40,15 <sup>4</sup>	134,97	110,67

<sup>1</sup> Modelo de pressão nominal do solo (Nominal Ground Pressure, NGP) (MIKKONEN; WUOLIJOKI, 1975)

<sup>2</sup> Modelo de zonas de pressão (ZIESAK; MATTHIES, 2001).

<sup>3</sup> Alta pressão nos pneus (Latossolo – Colhedora: 150 kPa; Trator: 150 kPa; Argissolo - Colhedora: 180 kPa; Trator: 150 kPa).

<sup>4</sup> Baixa pressão nos pneus (Argissolo – Colhedora: 110 kPa; Trator: 60 kPa).

<sup>5</sup> Não foi realizado tráfego com baixa pressão dos pneus.

No Latossolo, a pressão gerada pela colhedora na superfície tem seu valor subestimado (90,82 kPa) pelo modelo de pressão nominal (NGP) e superestimado (274,77 kPa) pelo modelo de zonas de pressão (MZP), em relação à pressão medida no campo (161,52 kPa). Quanto às pressões calculadas para o trator, os dois modelos subestimam a pressão obtida no campo.

No Argissolo, as pressões na superfície do solo calculadas para a colhedora com alta pressão interna (180 kPa) nos pneus foram subestimadas (69,49 kPa) pelo NGP e superestimadas (319,57 kPa) pelo MZP, comparado ao valor encontrado no campo (209,38 kPa). Com baixa pressão interna do pneu (110 kPa), o modelo MZP superestimou (288,09 kPa) a pressão encontrada no campo (156,08 kPa). Nos cálculos para o trator com alta pressão interna do pneu (150 kPa), os valores de pressão foram subestimados pelos dois modelos, NGP (47,26 kPa) e MZP (92,16 kPa), em relação ao valor encontrado no campo (134,97 kPa). Quando a pressão interna do pneu foi reduzida (60,0 kPa), o valor do modelo MZP (40,15 kPa) foi inferior ao do campo (110,67 kPa).

De modo geral, a pressão exercida pelas máquinas agrícolas na área de contato pneu-solo é superior pelo cálculo utilizando o modelo MZP em relação ao modelo NGP.

Com a redução da pressão interna dos pneus, a pressão exercida na área de contato pneu-solo é menor, tanto pelo modelo MZP quanto para o valor medido no campo. Isso é importante para os solos agrícolas, pois dessa forma reduz-se o efeito da compactação, podendo evitar a compactação adicional do solo e sua degradação.

Ambos os modelos não simulam as condições dinâmicas das tensões no solo e as suas consequências na qualidade deste, pois não foram compatíveis com os valores medidos no campo.

## 6.4 Discussão

A redução da compactação com o uso de máquinas na área florestal vem sendo uma questão econômica (ELONEN, 2002), ecológica (HILDEBRAND, 2002) e política (TÖPFER, 2002), no desenvolvimento e na gestão das atividades florestais. Da mesma forma, o efeito da compactação em solos cultivados com soja, milho, trigo etc. na área agrícola vem sendo investigado.

Para tentar responder algumas perguntas do efeito da palha na superfície do solo em relação à absorção de energia gerada pelo tráfego das máquinas agrícolas, foram realizadas medições da pressão no solo em um Latossolo e um Argissolo, sendo utilizados no tráfego uma colhedora e um trator, cujas características foram descritas em Material e Métodos.

### 6.1.9 SST e pressão de preconsolidação

Ao contrário da pesquisa nacional, em outros países os estudos sobre a influência do tráfego de máquinas agrícolas no comportamento da estrutura do solo, as pressões por elas exercidas, de forma estática e dinâmica, são mais avançados. Neles são abordadas a quantificação e distribuição da tensão aplicada no solo, bem como seu deslocamento vertical e horizontal, medidos *in situ* com o auxílio de transdutores (OLSON, 1994; HORN, 1994; KÜHNER, 1997; WIERMANN et al., 1999, 2000; VOSSBRINK, 2005).

No tráfego realizado com a colhedora no Latossolo (Figura 40), pode-se observar que nas camadas de 0,07-0,15 e 0,15-0,30 m o solo sofreu uma compactação adicional, a qual não foi significativa quando determinada a  $\sigma_p$ , para a condição avaliada. Observa-se ainda que, nas camadas de 0,07-0,15 e 0,15-0,30 m, a pressão exercida pela colhedora foi superior a  $\sigma_p$ ; assim, pode-se verificar que o solo teve capacidade de recuperação no tempo entre o tráfego e a coleta ou até a realização dos ensaios para determinação da  $\sigma_p$ .

A grande pressão exercida pela colhedora não teve efeito na pressão de preconsolidação, o que pode ter ocorrido devido à capacidade de retorno do solo à sua condição anterior ao tráfego, ou seja, devido à capacidade elástica do solo.

Uma observação importante que pode ser feita com base na Figura 40 é que a  $\sigma_p$  na camada de 0,07-0,15 foi maior que nas demais, comprovando dessa forma que as maiores pressões no plantio direto se concentram nesta camada. Esses resultados corroboram os de Streck et al. (2004), que observaram redução da porosidade total e aumento da densidade do solo até a profundidade de 0,15 m, com a compactação adicional feita com uma máquina de 10 Mg. Essa constatação de que existe uma camada compactada na sub-superfície, entre 0,08-0,15 m no plantio direto, tem sido citada por diversos autores (GENRO JUNIOR et al., 2004; SUZUKI, 2005). No plantio direto, o maior impedimento ao desenvolvimento radicular encontra-se na camada de 0,08-0,15 m; geralmente, no sistema de plantio convencional a camada com maior impedimento está abaixo da camada de solo revolvida, ou seja, a aproximadamente 0,20 m, na profundidade do chamado “pé-de-arado” (SILVA, 2003).

Da mesma forma que no Latossolo, no Argissolo não foi detectada diferença significativa na  $\sigma_p$  antes e após o tráfego da máquina sobre o solo. Ao contrário do Latossolo, no Argissolo não foi possível identificar a camada compactada através da  $\sigma_p$ , como pode ser observado na Figura 42.

Uma observação importante a ser feita é em relação à distribuição das tensões em profundidade. Verifica-se que no Latossolo (Figura 13) a pressão é transmitida a maiores profundidades do que no Argissolo (Figura 15), corroborando os resultados de Horn (1988). Considerando a pressão na profundidade de 0,12 m como 100%, a pressão medida na profundidade de 0,27 m foi de 55 e 39% da pressão da profundidade de 0,12 m, respectivamente para o Latossolo e Argissolo.

Na profundidade de 0,45 m a pressão medida foi de 31 e 22% da pressão da profundidade de 0,12 m, respectivamente para o Latossolo e o Argissolo.

Segundo McBride e Watson (1990), o teor e o tipo de argila alteram a compressibilidade do solo, determinando a profundidade de transmissão e a persistência da compactação. Assim, quanto maior o teor de argila, maior a profundidade em que a pressão é transmitida e maior a espessura da camada compactada (HORN, 1988).

Essas pressões medidas *in situ* foram realizadas de forma dinâmica, incluindo dessa forma o efeito da vibração das máquinas; Horn et al. (1995) afirmam que a vibração e o patinamento das máquinas têm efeitos na compactação do solo.

#### 6.1.10 Efeito dos resíduos vegetais na superfície do solo

Para avaliar a capacidade de a palha absorver energia, foi utilizado o SST (Stress State Transducer). A pressão de preconsolidação foi utilizada como indicativo da máxima pressão aplicada no solo nos últimos anos (HOLTZ; KOVACS, 1981; DIAS JUNIOR, 1994) e também como um indicador da suscetibilidade à compactação do solo (PENG et al., 2004).

Nos tráfegos realizados com e sem a presença de palha na superfície do solo, obteve-se uma diferença significativa entre as duas condições, confirmando assim os resultados obtidos em laboratório com ensaio de Proctor e Proctor alterado, com e sem a presença de palha na superfície (BRANDT, 2005; BRAIDA et al., 2006). Os resultados de Braida et al. (2006) mostraram que houve dissipação de 2,9% da energia nos 15 primeiros golpes, e, com mais 10 golpes, a dissipação da energia passou para 12,0%. Na Figura 41 observa-se que a pressão medida no Latossolo na profundidade de 0,12 m, sem a presença de palha na superfície, foi de 384 kPa e, com a presença de palha, de 271 kPa, ocorrendo dessa forma uma redução de 71,0% da pressão medida. Essa redução foi superior à observada em resultados obtidos em laboratório.

Na profundidade de 0,27 m, o efeito da palha na redução da pressão medida *in situ* foi ainda maior, chegando a 84,0% na redução da pressão; na profundidade de 0,42 m, a redução da pressão foi de 66,0%.

No Argissolo, a redução na profundidade de 0,12 m foi de 71,0% na pressão medida no solo; com palha, a pressão foi de 283,8 kPa, e sem palha, de 397,9 kPa. Já na segunda profundidade (0,27 m) a redução foi de 56,0%, menor em

porcentagem em relação ao Latossolo, fato este que pode ser explicado pelo fato de que em solos com maior teor de argila as pressões se propagam a uma profundidade maior. Na profundidade de 0,42 m a redução da pressão foi de 77%, e na profundidade de 0,60 m, foi de 46%.

Esses resultados mostram a importância dos resíduos vegetais na superfície do solo, independentemente da forma como eles dissipam a energia: pelo aumento da área de contato pneu-solo ou pela absorção e dissipação da energia gerada pelo tráfego das máquinas e implementos agrícolas.

Com o aumento do volume de palha pode haver problemas, principalmente em relação ao plantio das culturas, o que gera um desafio aos projetistas de semeadoras.

Brandt (2005), em estudo no campo em solo escarificado e com 12 Mg ha<sup>-1</sup> de cobertura de palha de milho em um Argissolo escarificado, não obteve diferença significativa na diminuição compactação do solo, o que pode ser explicado pelo fato de o solo ter sido escarificado, e, dessa forma, a palha não teve efeito.

Silva et al. (2007) verificaram em estudo com resíduos florestais que estes minimizaram a compactação do solo quando submetido ao tráfego do “forwarder” e que o solo sem resíduos é mais suscetível à compactação

Rosim (2007), em estudo com diferentes densidades de cobertura do solo submetido ao tráfego de máquinas, concluiu que o aumento da densidade de palha proporcionou uma redução da resistência à penetração e que ela não foi somente em relação ao aumento da umidade do solo, comprovando que a palha na superfície do solo reduz a resistência à penetração.

Não foi possível identificar se o motivo da redução da pressão exercida no solo foi em função do aumento da área de contato ou se a palha absorve parte da energia gerada pelas máquinas e a dissipa para a lateral. Este estudo é válido para as condições em que o solo se encontrava.

Em relação às pressões medidas com sucessivos tráfegos da colhedora no Argissolo, não é possível tirar uma conclusão, pois este teste foi realizado somente uma vez, de forma experimental; dessa forma, tem-se somente uma tendência.

## 6.5 Conclusões

A palha sobre a superfície do solo absorve parte da energia, ampliando a área de contato, ou, de alguma forma, a palha entrelaçada absorve parte da energia.

A redução da pressão interna do pneu teve efeito na redução das pressões transmitidas em profundidade no solo, ou seja, quanto menor a pressão interna do pneu, menor a pressão transmitida no solo.

A cobertura do solo com restos culturais é de extrema importância, pois ela reduz significativamente as tensões geradas pelo tráfego das máquinas agrícolas nas profundidades avaliadas.

As pressões no Latossolo, em função do teor de argila, são transmitidas em profundidades maiores em relação ao Argissolo.

## 6.2 Referências

ACHARYA, C. L.; SHARMA, P. D. Tillage and mulch effects on soil physical environment, root growth, nutrient uptake and yield of maize and wheat on an Alfisol in north-west India. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 32, n. 4, p. 291-302, Dec. 1994.

ALAKUKKU, L.; ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 36, n. 4, p. 141-152, Dec. 1994.

BECHER, H. H. Ist der Konzentrationsfaktor  $k$  eines aggregierten Bodens als steuernde Größe der mechanischen Druckverteilung in Böden eine Konstante **Journal Plant Nutrition and Soil Science**, v. 167, n. 1, p. 525-531, Feb. 2004.

BICKI, T. J.; SIEMENS, J. C. Crop response to wheel traffic soil compaction. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 34, n. 3, p. 909-913, July/Sept. 1991.

BLUNDEN, B. G. et al. Compaction of an earthy sand by rubber tracked and tired vehicles. **Australian Journal Soil Research**, v. 32, n. 5, p. 1095-1108, Mar./Apr. 1994.

BLUNDEN, B. G.; MCLACHLAN, C. B.; KIRBY, J. M. Technical note: A method of measuring in situ soil stresses due to traffic. **Soil & Tillage Research**, v. 25, n. 1, p. 35-42, Jan. 1992.

BRAIDA, J. A. et al. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 605-614, jul./ago. 2006.

BRANDT, A. A. **Propriedades mecânicas de solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais**. 2005, 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BRASIL. Ministério da Agricultura/ Ministério do Interior. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado do Ceará**. Recife, 1973. 301 p. (Boletim Técnico, 28; Série Pedologia, 16).

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: USP, EESC, 1998, 131p. v.1

BURGER, N.; LEBERT, M.; HORN, R. Prediction of the compressibility of arable land. **Catena**, Reiskirchen, v. 11, n. 1, p. 141-151, Feb., 1988. Suppl.

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

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 221-230, May 2002.

CARRIER, D. et al. **Soil Ground pressure distribution device**. Saskatoon: CSAE, 1995. (CSAE Paper, n. 95-401).

DAO, T. H. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a Paleustoll. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 1, p. 141-148, Mar. 1996.

DEGIRMENCIOGLU, A. et al. **Effects of dynamic load, inflation pressure and slip on soil-tire interface pressures**. St. Joseph: ASAE, 1997. (ASAE Paper, n. 97-1024).

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 f. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) – Michigan State University, East Lansing.

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 371-380, set. 1999.

DVWK, Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil I: Mechanische Belastbarkeit. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 234. Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, 1995, 12 p.

ELONEN, J. **Guidelines for harvesting wood from sensitive sites**; Aus: ECOWOOD studies made at the University of Helsinki, <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/mvario/publications/31/>, Haarlaa, R.; J. Salo (eds.), 2002.

ESS, D. R.; VAUGHAN, D. H.; PERUMPRAL, J. V. Crop residues and root effects on soil compaction. **Transactions of the American Engineering Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 41, n. 5, p. 1271-1275, Oct. 1998.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics of unsaturated soils**. New York: Wiley & Sons. 1993, 517 p.

FRÖHLICH, O. K. **Druckausbreitung im Baugrund**. Wien: Springer Verlag, 1934.

GABRIEL FILHO, A. et al. Desempenho de um trator operando em solo com diferentes tipos de cobertura vegetal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 781-789, set./dez. 2004.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 477-484, maio/jun. 2004.

GRÄSLE, W. **Numerische Simulation mechanischer, hydraulischer und gekoppelter Prozesse in Böden unter Verwendung der Finite Elemente Methode**. 1999. 400 p. Dissertation (Doktorgrades der Agrar) Schriftenreihe des Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian Albrechts Universität, Kiel.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, A. A. J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 213-218, maio/ago. 2002.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v. 6, n. 1, p. 65-100, 1987.

GUPTA, S. C. et al. **Development of quids for estimating the ease of compaction of world soils**. Bet Dagan: Research Report, Binational Agriculture Research Development, University of Minnesota, 1985. 178 p.

HARRIS, H. D.; BAKKER, D. M. A soil stress transducer for measuring in situ Soil stresses. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 35-48, Feb. 1994.

HARTGE, K. H.; HORN, R. **Einführung in die Bodenphysik**. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag. 1999. 304 p.

HILDEBRAND, E. E. Forstliche Bodennutzung - aktuelle Bodengefährdungen und langfristige Ziele. In: BLUM, W. E. H.; KAEMMERER, A.; STOCK, R. (Eds.). **Neue Wege zu nachhaltiger Bodennutzung**; Initiativen zum Umweltschutz, 2002, 103 p.

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

HORN, R. Auswirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. **Zeitschrift Pflanzenernähr. Bodenk**, v. 149, n. 1, p. 9-18, Mar. 1986.

\_\_\_\_\_. Compressibility of arable land. **Catena**, Giessen, v. 11, p. 53-71, 1988. Suppl.

\_\_\_\_\_. **Die Bedeutung der Aggregierung von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngrossen**. Schriftenreihe FB 14 TU Berlin, 1981.

\_\_\_\_\_. Stress transmission and recompaction in tilled and segmently disturbed subsoils under trafficking. In: JAYAWARDANE, N.; STEWART, B.A. Subsoiling management techniques. **Advances in Soil Science**, New York, p.187-210, 1994.

\_\_\_\_\_. The effect of static and dynamic loading on stress distribution, soil deformation and its consequences for soil erosion. In: BLUME, H. P.; FLEISCHHAUER, M.; HEBEL, T. **Sustainability, environmental protection**. Catena: Cremlingen In Press, 1998. 23 p.

HORN, R. et al. Druck fortpflanzung in Böden unter fahrenden Traktoren. **Zeitschrift Kulturtechnik**, Flurbereitung, v. 28, p. 94-102, 1987.

HORN, R. Et al. Zur Bedeutung des Aggregierungsgrades für die Spannungsverteilung in strukturierten Böden. **Journal Plant Nutrition and Soil Science**, v. 154, n. 1, p. 21-26, Mar. 1991.

HORN, R. et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n. 1-2, p. 23-36, Aug. 1995.

HORN, R. et al. Räumliche Spannungsmessungen mit dem Stress State Transducer (SST) in ungesättigten aggregierten Böden - theoretische Betrachtungen und erste

Ergebnisse. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**. Kiel. 155, p. 269-274, Dec. 1992.

HORN, R.; van DER AKKER, J. J. H.; ARVIDSON, J. **Subsoil compaction** - distribution, processes and consequences. Reiskirchen: Catena Publication, 2000. 462 p. (Advances Geoecology, v. 32)

JOHNSON, C. E. **SSTKIEL.EXE Program for 3D-stress transducer data analysis for the soil**. Version 8/94; Nicht veröffentlicht. 1994.

JONES, A. J. **Soil Compaction Tips**, Nebraska: University of Nebraska-Lincoln, 1995.

KAISER, D. R. et al. Compactação do solo e suas relações no desenvolvimento radicular e produtividade do feijoeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 28, n. 3, p. 287-289, ago./set. 1998.

KÉZDI, A. **Handbuch der Bodenmechanik Band 1**. Budapest: Akademiai Kiadó. 1969, 259 p.

\_\_\_\_\_. **Talajmechanika (Bodenmechanik)**. Budapest: Tankönyvkiadó. 1952, 560 p.

KIRBY, J. M.; BLUNDEN, B. G.; TREIN, C. R. Simulating soil deformation using a critical state model, II, Soil compaction. **European Journal Soil Science**, v. 48, n. 1, p. 59-70, Mar. 1997.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 211-218, maio 1999.

KOOLEN, A.J.; KUIPERS, H. **Agricultural Soil Mechanics**. Berlin: Springer Verlag, 1983, 241 p.

KÜHNER, S. **Simultane Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung**. 1997. 190 p. Ph.D. Thesis. (Doktorgrades der Agrar) Schriftenreihe des Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian Albrechts Universität, Kiel.

LEÃO, T. P. et al. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 415-423, mar./abr. 2004.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 3, p. 275-286, June 1991.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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

McBRIDE, R. A.; WATSON, G. C. An investigation of re-expansion of unsaturated, structured soils during cycles static loading. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 17, n. 3-4, p. 241-253, June 1990.

MEROTTO, M. A. J; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 23, n. 2, p. 197-202, mar./abr. 1999.

MIKKONEN, E.; WUOLIJOKI, E. **Pikatestausten suoritustekniikka. The technique of short term testing**, Metsätöiden katsaus 9. 1975.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 46 p.

NICHOLS, T. A.; BAILEY, A. C.; JOHNSON, C. E.; GRISSE, R. D. A Stress State Transducer for soil. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 30, n. 5, p. 1237-1241, Oct. 1987.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 442 p.

OLSON, H. J. Calculation of subsoil compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 29, n. 2, p. 105-111, Apr. 1994.

PECHE FILHO, A. Critérios para avaliar a qualidade do plantio direto. **O Agrônomo**, Campinas, v. 51, n. 1, 1999.

PENG, X. H. et al. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompact Ultisols. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 2. p. 125-137, Sept. 2004.

RAGHAVAN, G. S. V.; ALVO, P.; MCKYES, E. Soil compaction in agriculture: A review toward managing the problem. **Advances in Soil Science**, London, v. 11, n. 1, p. 1-36, jan. 1990.

RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E.; CHASSÉ, M. Effect of wheel slip on soil compaction. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v. 22, n. 1, p. 79-83, Mar 1977.

RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E. Physical and hydraulic characteristics in compacted clay soils. **Journal of Terramechanics**, Elmsford, v. 19, n. 2, p. 235-242, Apr. 1983.

REINERT, D. J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic Hapludalf**. 1990. 128 p. Tese. (Doutorado em Ciência do Solo) – Michigan State University, Michigan.

ROSIM, D. C. **Influência da quantidade e manejo da palha na compactação de um Latossolo Vermelho distroférico**. 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônomo, Campinas.

SANTOS, H. G. et al. (Eds.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SILVA, V. R. da. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, n. 2, p. 239- 249, mar./abr. 2000a.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 795-801, jul./ago. 2000b.

SMITH, B. E. et. al. Mobile soil-tire interface measurement system. **Transactions of the American Engineering Society of Agricultural Engineers**, v. 37, n. 5, p. 1633-1637. Nov. 1994.

SMUCKER, A. J. M.; ERICKSON, A. E. Tillage and compactive modifications of gaseous flow and soil aeration. In: LARSON, W. E. et. al. **Mechanics related process in structured agricultural soils**. Amesterdam: Kluwer Academic Publishers, 1989. p. 205-221.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1-2, p. 179-201, Jan./Feb. 1990.

SÖHNE, W. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. **Landtechnik**, Grundl, v. 5, n. 3, p. 49-63, 1953.

STRECK, C. A. et. al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, maio/jun. 2004.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed Porto Alegre: Emater/RS/, 2008. 222 p.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

TÖPFER, K. Nachhaltige Bodennutzung als globale Aufgabe - Umweltpolitik zurück auf den Boden bringen; In: BLUM, W. E. H.; KAEMMERER, A.; STOCK, R. (Eds.). **Neue Wege zu nachhaltiger Bodennutzung: Initiativen zum Umweltschutz**, Wien: Internationale Bodenkundliche Union, 2002. p. 1-6. v. 40.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p.573-581, jul./ago. 1998.

TREIN, C. R. **The mechanisms of soil compaction under wheels**. 1995. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering) - Silsoe College, Crainfield University, Silsoe.

TURNER, R.J. et al. **Development of a Simple System for Measuring Peak Soil Stresses**. St. Joseph: ASAE, 2001. (ASAE Paper, n. 01AETC03).

VAN DEN AKKER, J. J. H. et al. Comparison of stresses, compactions and increase of penetration resistances caused by a low ground pressure tyre and a normal tyre. **Soil & Tillage Research.**, v. 29, n. 1, p. 125-134, Mar./Apr. 1994.

VIEIRA, M. J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 4, p. 873-882, jul./ago. 1984.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren.** 2005. 126 f. Dissertation (em que) - Schriftenreihe des Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian Albrechts Universität, Kiel.

VOSSBRINK, J.; HORN, R. Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. **European Journal Forest Research**, Springer Berlin v. 123, n. 2, p. 259-267, Apr. 2004.

WIERMANN, C. **Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitungen auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lössbürtiger Ackerstandorte.** 1998. 143 p. Thesis (Doktorgrades der Agrar) - Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde.

WIERMANN, C. et al. Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 50, n. 2, p. 127-135, Mar. 1999.

WIERMANN, C. et al. Stress/strain processes in a structured silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 1, p. 117-128, Feb. 2000.

ZIESAK, M.; MATTHIES, D. **Untersuchen zur last und innendruckabhängigen Aufstandsfläche von Forstspezialreifen.** KWF. Forsttechnische Informationen. FTI 9+10/2001, s. 104-110, 2001.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho apontam para a confirmação das hipóteses em estudo. Verificou-se que o intenso uso dos solos agrícolas em condições não ideais de umidade, quando trafegados, pode causar uma compactação, a qual é prejudicial para o desenvolvimento das culturas agrícolas. Os agricultores devem ser orientados a não trafegar com máquinas e implementos agrícolas sobre o solo em condições não ideais de umidade.

Os dois diferentes tempos utilizados nos ensaios da compressão uniaxial não foram significativos; assim pode-se utilizar o menor tempo para a realização dos ensaios para os três solos estudados.

É natural que a densidade do solo seja maior em solo trafegado do que no não trafegado. Neste estudo, essa maior densidade no solo trafegado não foi prejudicial ao desenvolvimento das culturas, pois as densidades obtidas foram menores que as consideradas críticas para o desenvolvimento do sistema radicular. A porosidade total e macroporosidade também ficaram em limites aceitáveis; assim, a porosidade de aeração também não foi alterada nos solos estudados.

Os ensaios realizados neste estudo confirmam os dados encontrados em laboratório por Braida et al. (2006) e Brandt (2005), os quais, em ensaios de Proctor e Proctor alterado, respectivamente, obtiveram redução significativa na redução da compactação com a presença de resíduos vegetais sobre o solo. Essa confirmação é de grande importância, pois dessa forma fica comprovado que, quanto mais palha na superfície do solo, menores serão os efeitos maléficos do tráfego das máquinas sobre o solo.

Como era esperado, com a redução da pressão interna do pneu, as pressões transmitidas para o solo foram menores, devido ao aumento da área de contato pneu-solo para o mesmo pneu. As pressões utilizadas nos pneus foram a máxima e a mínima recomendada pelo fabricante para as atividades agrícolas.

Outro dado importante obtido, mas do qual não houve repetições devido ao pouco tempo para a realização dos estudos em campo, foi que, com o tráfego

sucessivo das máquinas sobre o mesmo local, as pressões são transmitidas em profundidades maiores.

É de grande importância que estudos com e sem a presença de palha na superfície do solo tenham continuidade, pois neste não foi possível precisar de que forma a palha atua na redução das pressões exercidas no solo: se é absorvendo parte da energia ou dissipando a energia em uma maior área sobre o solo.