

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

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE UMA  
TOPOSSEQUÊNCIA ARGISSOLOS-GLEISSOLOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Fabiano de Vargas Arigony Braga**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**

# **PROPRIEDADES FÍSICAS DE UMA TOPOSSEQUÊNCIA ARGISSOLOS-GLEISSOLOS**

**por**

**Fabiano de Vargas Arigony Braga**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Máquinas Agrícolas, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

**Orientador: Prof. José Miguel Reichert**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**

B813p Braga, Fabiano de Vargas Arigony  
Propriedades físicas de uma topossequência argissolo-gleissolo / por Fabiano de Vargas Arigony Braga. – 2011.  
65 f. ; il. ; 30 cm

Orientador: José Miguel Reichert  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2011

1. Engenharia agrícola 2. Topossequência 3. Compressibilidade do solo  
4. Propriedades físico-hídricas I. Reichert, José Miguel II. Título.

CDU 631.4

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti – CRB 10/1109  
Biblioteca Central UFSM

---

© 2011

Todos os direitos autorais reservados a Fabiano de Vargas Arigony Braga. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua das Magnólias, 116, Patronato – Santa Maria - RS

Fone (0xx) 55 32113661; Cel (0xx) 55 84195435; End. Eletr:fabianovab@yahoo.com.br

---

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a  
Dissertação de Mestrado

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE UMA TOPOSSEQUÊNCIA  
ARGISSOLOS-GLEISSOLOS**

elaborada por  
**Fabiano de Vargas Arigony Braga**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA**

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

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

**Letícia Sequinatto, Dr. (CAV-UDESC)**

Santa Maria, 31 Março de 2011.

Aos meus pais, Osiris Braga e Sônia Braga, à meu irmão Fabrício Braga e à minha noiva Kelly Braga, dedico este trabalho como agradecimento pelo amor e paciência que vocês tiveram comigo nesse período, as vezes, tão difícil.

***“...Sirvam nossas façanhas de modelo à toda terra...”.***

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela sua existência.

À minha bolsa concedida pela CAPES, que me auxiliou para ter melhores condições de trabalho e estudo.

Agradeço ao professor Miguel pelos seus ensinamentos, sua amizade e paciência neste período de mestrado e também ao professor Dalvan, sempre com um sorriso no rosto e disposto a ajudar à quem quiser ser ajudado.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade, ao coordenador Fernando Schlosser e ao Estevão pela ajuda prestada.

Aos professores que transmitem todo ensinamento, para nós estudantes, adquirido em sua carreira, para que algum dia possamos atingir nossos sonhos e objetivos.

Ao Fonti, pela sua amizade e parceria, muitas vezes sendo mais “pulso firme” para que então a sistemática e organização do trabalho venha a melhorar cada vez mais.

Aos meus colegas e amigos do LaFiS: Andre de Oliveira, Charote Wink, , Douglas Rodrigo Kaiser, Eracilda Fontanela, Juliana Prevedello, Mayra de Souza Dettmer, Miriam Fernanda Rodrigues, Vanderleia da Rosa, David da Rosa, Nadia Bernardi Bonumá, Leonir Uhde, Suzana Ferreira da Rosa, Dinha, Tiaguinho e Neiva Somavilla que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos alunos e bolsistas de iniciação científica Luciano Jacomet, Alan Ébano e Alencar Xavier pela ajuda durante a determinação das análises.

Aos colegas e amigos Maurício Kunz, Marcelo Kunz, Júlio César Wincher Soares, Davi Alexandre Vieira pela parceria, companherismo e amizade durante todo o período de Física do solo.

Ao Paulinho Gubiani, pela grande ajuda na interpretação da complexidade do mundo estatístico.

Um agradecimento mais que especial para Marcelo Mentges e Eduardo Vogelmann, pela imensa ajuda e papel de co-orientação para então finalizar o meu trabalho. Valeu mesmo.

À meus queridos pais, Osiris e Sonia Braga, à meu irmão Fabrício Braga e a minha noiva Kelly Braga, que sempre serviram como base de sustentação moral e psicológica em momentos importantes do meu trabalho e da minha vida.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria

### PROPRIEDADES FÍSICAS DE UMA TOPOSSEQUÊNCIA ARGISSOLO-GLEISSOLO

AUTOR: FABIANO DE VARGAS ARIGONY BRAGA

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Local e data da defesa: Santa Maria, 31 de Março de 2011.

Os solos da Depressão Central Gaúcha são constituídos por areia, silte e argila. A região tem cotas entre 40 à 100 m, nas áreas mais baixas (várzea) predominam os Gleissolos e nas coxilhas predominam os Argissolos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento compressivo (capacidade de suporte e susceptibilidade a compactação) do solo, e a influência de cargas 25, 50, 100 e 200 kPa nas propriedades físicas e hídricas (curva de retenção de água (CRA) e permeabilidade ao ar (Ka)). As coletas de solo foram feitas em uma propriedade particular em Santa Maria, RS. Foram abertas trincheiras em dois perfis localizados na várzea (Gleissolos Háplicos), dois na encosta (inferior e superior) e um no topo, ambos Argissolo Vermelho. Foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em anéis metálicos para o teste de compressão uniaxial em todos os horizontes dos cinco diferentes perfis, após foram coletados somente amostras dos horizontes superficiais para os testes de Ka e CRA, após aplicadas as cargas de 25, 50, 100 e 200 kPa na prensa uniaxial. Nos dois momentos as amostras foram equilibradas à tensão de 10 kPa. Foram realizadas análise granulométrica, carbono orgânico, densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, teste de compressibilidade, Ka e CRA. A pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) teve correlação significativa positiva com a argila e negativa com a areia, não tendo correlação significativa com carbono orgânico (CO), grau de saturação (GS), índice de vazios (IV) e densidade do solo (Ds), o IC teve correlação significativa negativa somente com a Ds. Os Gleissolos apresentaram maior capacidade de suporte do que os Argissolos. Os horizontes superficiais tiveram menor deformação em relação aos subsuperficiais, devido a ter maior Ds e menor IV. Os horizontes mais profundos (BA, Bt1, Bt2 e Cg) apresentaram maior  $\sigma_p$  que os horizontes superficiais (A, Ap, A1, A2, AB), por terem maior quantidade de argila. Quanto maior a carga aplicada nas amostras, maior a densidade Ds e menos PT, a maior permeabilidade foi nos perfis A, A1 e Ap sob as cargas de 25 e 50 kPa, pois não produziram efeitos negativos na estrutura. A aplicação de maiores cargas na amostra mudou a estrutura do solo, reterendo mais água em função do aumento de microporos. Os Gleissolos apresentaram maior capacidade de suporte e são menos suscetíveis à compactação do que os Argissolos. Os Gleissolos apresentaram maior capacidade de suporte e são menos suscetíveis à compactação do que os Argissolos. Dentre os Gleissolos, o perfil 2 apresentou menor susceptibilidade a compactação do que o perfil 1 e dentre os Argissolos, a susceptibilidade à compactação do perfil 5 é menor que nos perfis 3 e 4. Os horizontes mais profundos (BA, Bt1, Bt2 e Cg) apresentaram maior ( $\sigma_p$ ) e capacidade de suporte que os horizontes superficiais (A, Ap, A1, A2 e AB) pois tem maior quantidade de argila. Após aplicação das cargas de 100 e 200 kPa, os perfis 1, 2, 4 e 5 apresentaram menores valores de Ka, resultado da mudança de estrutura da amostra, diminuindo a macroporosidade e aumentando a microporosidade. A compactação da amostra reduziu a macroporosidade e a porosidade total promovendo um maior armazenamento de água nas maiores tensões aplicadas.

**Palavras-chave:** topossequência, compressibilidade do solo, propriedades físico-hídricas.

## ABSTRACT

Master Dissertation  
Post-Graduate Program in Agricultural Engineering  
Federal University of Santa Maria

### PHYSICAL PROPERTIES OF A TOPOSEQUENCE GLEY-PODZOLIC

AUTHOR: FABIANO DE VARGAS ARIGONY BRAGA

ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Place and date of the defense: Santa Maria, March 31, 2011.

The soils of the Central Depression in Rio Grande do Sul consist mainly of mudstones, siltstones and sandstones. The region has dimensions ranging from 40 to 100 m at lower elevations (lowland) predominate Gley soils (shallow, poor drainage). In the plateau predominate Ultisols (deep to very deep and vary in color, as drainage level). The aim of this study was to evaluate the compressive behavior (carrying capacity and susceptibility to compaction) of the soil and influence of loads 25, 50, 100 and 200 kPa in the physical properties and water (CRA and air permeability). The sampling of soil for study was made in a private property located in Santa Maria. Trenches were dug to collect in two profiles located in the floodplain (Haplic Gley soil), two slopes (lower and upper) and one at the top, both Ultisol. In metal rings were collected soil samples with preserved structure for the uniaxial compression test on all horizons of the five different profiles, loads of 25, 50, 100 and 200 kPa in uniaxial press, then were only collected samples of soil surface horizons of the profiles for testing air permeability and water retention curve. In both times the samples were equilibrated at a voltage of 10 kPa. Were carried out: sieve analysis, organic carbon, density, porosity, macro porosity, compressibility test, air permeability and water retention curve (WRC). The pre-consolidation pressure ( $\sigma_p$ ) had a significant positive correlation with clay and negatively with sand, having no significant correlation with organic carbon (OC), degree of saturation (DS), voids (IV) and density (BD), the IC has had a significant negative correlation only with the Ds. Among the profiles, Gley Soils presented higher carrying capacity than the Argisols. Surface horizons had lower deformation compression curves compared to the subsurface, due to having larger soil density and smaller IV. The deeper horizons (BA, Bt1, Bt2 and Cg) showed higher  $\sigma_p$  than the surface horizons (A, Ap, A1, A2, B), by having greater amount of clay. The higher the load applied on the samples, higher soil density and porosity. The higher permeability was greater in profiles A, A1 and Ap under loads of 25 and 50 kPa, it produced no adverse effects on the structure. The application of higher loads in the sample changed the soil structure, retaining more water due to the increase of macro porosity. The Gley soils had a higher carrying capacity and are less susceptible to compaction than Argisols. Among Gley soil, profile 2 is less susceptible to compaction than a profile from the Ultisols and susceptibility to compaction of the profile 5 is lower than in profiles 3 and 4. The deeper horizons had higher pre-consolidation pressure ( $\sigma_p$ ) and carrying capacity of the soil surface, because the greatest amount of clay. Loads of 25 and 50 kPa are lower than the values of pressure pre consolidation of horizons and the samples submitted showed no negative effects on the structure and had higher values of permeability. The application of loads 100 and 200 kPa, in the profiles 1.2 (floodplain), 4 (upper slope) and 5 (top) reduced the values of permeability, resulting from the change of the sample. The compacting process of the sample reduced macro porosity and increased total porosity by promoting greater water storage in the highest voltages applied.

**Keywords:** top sequence, compressibility of soil physical and hydraulic properties.

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Horizontes (Hz), profundidade e valores médios de areia, silte e argila, densidade de partículas (Dp) e carbono orgânico (CO) e classe textural dos cinco perfis de solo .....	24
TABELA 2 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre as variáveis pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e índice de compressão (IC) com as variáveis grau de saturação (GS), índice de vazios (IV), densidade do solo (Ds), areia, silte, argila e carbono orgânico total (CO) de todos os horizontes da topossequência Argissolos-Gleissolo.....	32
TABELA 3 – Pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), índice de compressão (IC), densidade do solo inicial (Ds), índice de vazios (IV), grau de saturação inicial (GS), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes dos horizontes superficiais (A, A1 e Ap) dos cinco perfis estudados .....	35
TABELA 4 – Distribuição dos horizontes, grau de saturação inicial (GS), pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), índice de compressão (IC), índice de vazios (IC) e densidade do solo inicial (Ds) da topossequência Argissolos-Gleissolo <sup>(1)</sup> .....	39
TABELA 5 – Pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), índice de compressão (IC), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes dos horizontes da topossequência Argissolos-Gleissolo <sup>(1)</sup> .....	44
TABELA 6 – Densidade do solo (Ds), índice de vazios (IC), grau de saturação (GS), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes dos horizontes da topossequência Argissolos-Gleissolo.....	46
TABELA 7 – Valores médios de porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e densidade do solo (Ds) dos horizontes superficiais e subsuperficial dos perfis 1, 3 e 5 da topossequência estudada para quatro cargas externas aplicadas.....	47
TABELA 8 – Valores de permeabilidade ao ar antes (Kaa) e depois (Kad) de aplicadas as cargas de 25, 50, 100 e 200 kPa na prensa uniaxial em uma amostra equilibrada à 10 kPa de tensão.....	49

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Curva de compressão de um solo que sofreu pressão externa (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996).....	17
FIGURA 2 – Vista aérea do experimento (trincheiras estudadas destacadas em amarelo) (Fonte:Google Earth, 2009).....	22
FIGURA 3 – Perfis dos Gleissolos Háplicos (Perfis 1 e 2) e dos Argissolos Vermelhos Distróficos (Perfis 3, 4, e 5). Fonte: Leonir uhde, 2010. ....	24
FIGURA 4 – Cilindros e caixas metálicas utilizados para a coleta de solos com estrutura preservada.....	25
FIGURA 5 – Prensa uniaxial para fazer o teste de compressibilidade nas tensões de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, .....	26
FIGURA 6 – Equipamento utilizado nas medidas de condutividade do solo ao ar em amostras com estrutura preservada. Fonte: VOSSBRINK (2005) e modificado por BRANDT, 2008 (comunicação pessoal). ....	29
FIGURA 7 – Curva de compressão do solo (a) e curva de compressão normalizada (b) para os horizontes do Gleissolo Háplico (Perfil 1).....	38
FIGURA 8 – Curva de compressão do solo (a) e curva de compressão normalizada (b) para os horizontes do Gleissolo Háplico (Perfil 2). ....	40
FIGURA 9 – Curva de compressão do solo (a) e curva de compressão normalizada (b) para os horizontes do Argissolo Vermelho (Perfil 3) .....	40
FIGURA 10 – Curva de compressão do solo (a) e curva de compressão normalizada (b) para os horizontes do Argissolo Vermelho (Perfil 4). ....	41
FIGURA 11 – Curva de compressão do solo (a) e curva de compressão normalizada (b) para os horizontes do Argissolo Vermelho-Amarelo (Perfil 5).....	41
FIGURA 12 – Curva de retenção de água após aplicação das cargas de 25, 50, 100 e 200 kPa nos perfis 1 (Gleissolo Háplico) 3 e 5 (Argissolo Vermelho Distrófico) nos horizontes superficiais. ....	53

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 HIPÓTESES</b> .....	13
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	14
3.1 Objetivo Geral .....	14
3.2 Objetivos Específicos.....	14
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
4.1 A Depressão Central do Rio Grande do Sul e a topossequência de solos.....	15
4.2 Compressibilidade do solo.....	16
4.3 Curva de retenção de água .....	19
4.4 Permeabilidade do solo ao ar.....	20
<b>5 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	22
5.1 Local de estudo .....	22
5.2 Coleta das amostras.....	25
5.3 Determinações .....	26
5.3.1 Ensaio de compressão uniaxial.....	25
5.3.2 Curva de retenção de água (CRA) .....	27
5.3.3 Permeabilidade do solo ao ar .....	28
5.3.4 Análise granulométrica, densidade de partículas e carbono orgânico total.....	30
5.3.5 Análise estatística .....	30
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	31
6.1 Compressibilidade do solo.....	31
6.2 Permeabilidade ao ar do solo .....	46
6.3 Curva de retenção de água.....	51
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	56
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	57

## 1 INTRODUÇÃO

Os solos da Depressão Central Gaúcha são constituídos basicamente de sedimentos, com o predomínio de argilitos, siltitos e arenitos da formação Santa Maria, depositados por diferentes agentes ao longo de várias épocas geológicas. Nesta região, que apresenta altitudes variando entre 40 e 100 metros, ocorrem predominantemente duas condições topográficas: coxilhas, com relevo suavemente ondulado a ondulado, e planícies aluviais, denominadas de várzeas.

Nas cotas mais baixas, próximas aos cursos d'água, predominam Gleissolos Háplicos, enquanto que os Planossolos Háplicos ocorrem em pequenas elevações em relação aos Gleissolos. Ambos os solos são pouco profundos e apresentam como característica marcante a drenagem deficiente. Nas coxilhas, o relevo suavemente ondulado a ondulado altera as características morfológicas dos solos que ocorrem neste compartimento da topossequência. Neste local ocorrem predominantemente Argissolos, que são profundos a muito profundos e variam de coloração vermelha a bruno-acizentada, em função da maior ou menor drenagem. Os Argissolos ocupam a maior parte da área territorial do estado do Rio Grande do Sul.

A classe dos Argissolos apresenta uma alta utilização em atividades agropecuárias, principalmente com a pecuária e a produção de grãos, como a soja e o milho principalmente. Os Gleissolos, devido à sua deficiente drenagem, são aptos para o cultivo de arroz irrigado por inundação, em alguns casos na produção da soja em várzea e para a pecuária.

Os processos químicos, físicos e os fatores de formação que atuaram sobre a constituição dos solos imprimem a esses diferentes propriedades morfológicas, físicas, mecânicas, químicas e biológicas, que por sua vez irão direcionar ou indicar qual o mais adequado uso agrícola, sem que a sustentabilidade do sistema seja prejudicada

Um solo pode ser considerado fisicamente adequado ao desenvolvimento de plantas quando essas estão em um ambiente com uma adequada aeração, temperatura e baixa resistência à penetração de raízes; essas características são diretamente afetadas pela quantidade de água que está presente no solo. De uma maneira geral, pode-se inferir que essas propriedades, principalmente a resistência

à penetração, que é diretamente e positivamente relacionada com a densidade do solo, e a quantidade de água, afetam as propriedades mecânicas dos solos (tal como as propriedades compressivas) e são influenciadas pelo uso.

As diferentes classes de solo, quando utilizadas com atividades agropecuárias, necessitam de cuidados em relação ao manejo realizado, visto que problemas relacionados à compactação podem ocorrer, principalmente quando as práticas de manejo são realizadas de maneira incorreta, não respeitando as condições ideais de solo. O principal agente que causa a compactação do solo é a pressão aplicada sobre o mesmo, seja pelas operações mecanizadas nas práticas de manejo e/ou também pelo pisoteio animal, ocorrendo principalmente quando a umidade do solo está elevada.

Com o acúmulo de tensões aplicadas no solo, as propriedades físicas são alteradas. Ocorre aumento na densidade, redução da porosidade total, especialmente em função da diminuição dos macroporos, e aumento na resistência à penetração. Com isso, os fluxos de ar e água são reduzidos, o que pode potencializar o escoamento superficial e reduzir a disponibilidade de água às plantas, comprometendo a qualidade, a produção e o rendimento das culturas implantadas na área.

O conhecimento da capacidade de suporte de carga, da suscetibilidade à compactação dos diferentes compartimentos de uma topossequência é fundamental para que as práticas de manejo, principalmente aquelas potencializadoras do processo de compactação, sejam adequadas para que este problema seja evitado ou minimizado. Além disso, a agregação dessas informações com medidas de fluxo de ar e curva de retenção de água no solo geram valores que variam de acordo com o estado de compactação do solo que, quando interpretados e analisados, refletem o quanto este está compactado e sua consequência para o adequado desenvolvimento de plantas.

A diferença entre os diferentes tipos de solo ao longo da topossequência, variando quanto à altitude, posição no espaço e manejo, explica o objetivo do trabalho que foi estudar os diferentes tipos de solo e avaliar suas propriedades físicas e mecânicas, quantificando a permeabilidade ao ar e umidade no solo e o comportamento desses quanto à capacidade de suporte e susceptibilidade à compactação.

## 2 HIPÓTESES

- A compressibilidade do solo varia de acordo com a posição na topossequência e o horizonte amostrado. Os Argissolos são mais suscetíveis à compactação e apresentam menor capacidade de suporte de carga quando comparados aos solos da posição inferior da topossequência, os Gleissolos. A capacidade de suporte de carga é maior nos horizontes subsuperficiais ou em horizontes com maior quantidade de argila e/ou matéria orgânica.

- A permeabilidade ao ar reduz e a retenção de água dos solos da topossequência aumenta quando cargas maiores do que a pressão de preconsolidação são aplicadas pelo processo de compressão, que resulta no aumento da densidade do solo, diminuição dos macroporos e aumento na quantidade de microporos.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo Geral**

Avaliar o comportamento compressivo nos horizontes de uma topossequência de Argissolos-Gleissolos da Depressão Central do Rio Grande do Sul e determinar a influência da aplicação de cargas nas propriedades físicas e hídricas destes solos.

### **3.2 Objetivos Específicos**

Determinar a capacidade de suporte de carga e a suscetibilidade à compactação nos diferentes horizontes dos solos de uma topossequência.

Avaliar o efeito das aplicações de cargas de 25, 50, 100 e 200 kPa na curva de retenção de água e a permeabilidade ao ar nos horizontes superficiais dos solos de uma topossequência.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 A Depressão Central do Rio Grande do Sul e a topossequência de solos

A Depressão Central do Rio Grande do Sul corresponde à borda da bacia sedimentar do Paraná, e é formada por sedimentos predominantes do material sedimentar das Formações Rosário do Sul e Santa Maria. Essa região apresenta 54.000 km<sup>2</sup> de superfície (BRASIL, 1973). A grande diversidade de solos se relaciona ao afloramento dos diferentes tipos de sedimentos que compõem a paisagem, o que por sua vez é resultado dos processos erosivos processados pela rede de rios que drena esta província (STRECK et al., 2008). O relevo é caracterizado por grandes planícies aluviais e coxilhas sedimentares com declínios médios (CASSOL et al., 2008).

A paisagem é desenvolvida pela atuação de processos naturais na superfície terrestre. O resultado da atuação desses processos é o relevo, constituído por um conjunto de superfícies geomórficas. Os solos desenvolvidos ao longo do relevo apresentam feições distintas, que podem ser tomadas como resultado da ação conjunta dos processos geomórficos e pedogenéticos, ambos condicionados principalmente pela dinâmica das águas superficial e subsuperficial (HUGGETT, 1975).

O relevo (como sinônimo de topografia) foi isolado por Jenny (1941) como um fator de formação do solo. Isso foi demonstrado pelo estudo realizado por Milne (1936, apud JENNY, 1941), o qual introduziu o conceito de “catena”, ou seja, uma sequência de perfis diferentes de solo em função da declividade e drenagem, sob o mesmo material de origem e clima. A participação do relevo juntamente com os outros fatores de formação (material de origem, clima, tempo e organismos) é muito importante para o processo evolutivo do solo, porque influencia na quantidade de água incorporada no solo promovendo o transporte de sólidos ou de materiais em solução, produzindo efeitos que se traduzem em diferentes tipos de solos, nas diversas posições das topossequências.

O estudo do solo na vertente por meio de topossequências tem apontado para a influência de mais fatores de formação (clima, material de origem, forma da

vertente, percolação e infiltração de água no solo) atuando em conjunto no desenvolvimento das características e propriedades dos solos (ROCHA; CARVALHO, 2003).

Topossequência é uma seqüência de diversos tipos de solos distribuídos de maneira regular e sistemática na paisagem, de acordo com a topografia e sobre um mesmo material de origem (BOCQUIER, 1973). A partir do estudo realizado por Bocquier (1973), novos métodos foram desenvolvidos para estudar a sucessão de perfis alinhados do topo à base de uma encosta, permitindo não só identificar a distribuição dos horizontes de solo, mas também as relações entre eles (CASTRO et al., 2003).

O solo é um corpo “contínuo” que não se apresenta sob a forma de perfil vertical (BOULAINÉ, 1978). Os perfis verticais são somente um produto do trabalho intelectual dos pedólogos, concebido para facilitar a sua análise e delimitação na paisagem (BOULAINÉ, 1982). Os maiores erros em classificação e mapeamento de solos são decorrentes da definição de unidades de mapeamento a partir de um pequeno conjunto de perfis de uma mesma classe de solo, o que é feito de modo subjetivo, provocando incongruências entre o sistema de classificação e a variabilidade contínua natural dos solos (TRANTAFILIS et al., 2001).

As características dos solos variam ao longo de uma paisagem (DEMATTE; MARCONI, 1991) e afetam o comportamento físico-hídrico e mecânico dos diferentes tipos de solos. Muitas propriedades químicas e físicas, como a capacidade de troca catiônica, retenção de água, erodibilidade, infiltração de água, drenagem, entre outras são influenciadas pela textura. A estrutura pode ser modificada com o tipo de uso e manejo do solo. Dessa forma, o manejo inadequado pode produzir camadas compactadas criando condições desfavoráveis ao desenvolvimento das culturas.

## **4.2 Compressibilidade do solo**

A compressibilidade é uma propriedade dinâmica, sendo utilizada para determinar a capacidade de suporte e a suscetibilidade à compactação do solo, bem como identificar as áreas de deformações plásticas e elásticas. A curva de compressão do solo pode ser dividida em dois segmentos: um curvo, denominado curva de compressão secundária, e outro linear, chamado de reta de compressão

virgem (LEBERT; HORN, 1991), sendo representada graficamente pelo logaritmo da pressão externa aplicada a um corpo de prova com algum parâmetro ligado à estrutura do solo, como por exemplo, o índice de vazios ou densidade do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996).

Solos que não sofreram pressões prévias ou ciclos de secagem e umedecimento apresentam curva de compressão de comportamento linear. A curva de compressão de forma curvilínea (não linear) é demonstrada em solos que sofreram algum tipo de pressão externa ou processos de secagem e umedecimento (Figura 1). O ponto que divide a curva de compressão em duas componentes (linear e não linear) é conhecido como pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), o qual divide a curva de compressão em duas regiões: deformações plásticas e irrecuperáveis (linha ou reta de compressão virgem) e deformações pequenas e recuperáveis (linha ou curva de compressão secundária).

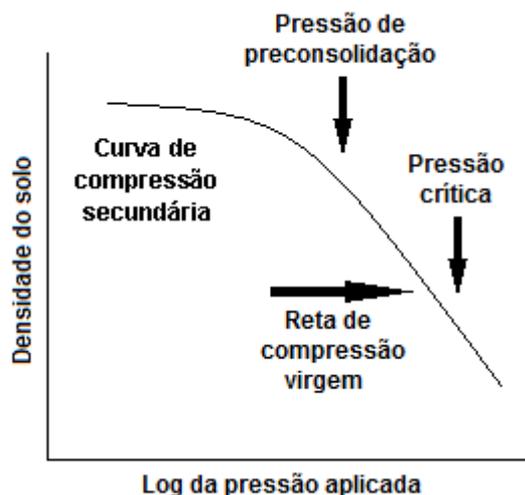


FIGURA 1 – Curva de compressão de um solo que sofreu pressão externa (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996)

Obtêm-se dois parâmetros principais através da compressibilidade: a pressão de preconsolidação e o índice de compressão. Na agricultura, a pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) é sugerida como indicadora da máxima pressão que um solo pode suportar em diferentes umidades, sem causar compactação adicional (DIAS JUNIOR, 1994; IMHOFF et al., 2001). O índice de compressão (IC) é um importante indicador na verificação da suscetibilidade do solo à compactação (SILVA et al., 2000).

Com o conhecimento do comportamento compressivo do solo perante a aplicação de cargas externas, pode-se planejar o trabalho mecanizado de uma lavoura, na tentativa de evitar a ocorrência da compactação (ROSA, 2007). Além disso, indicadores físicos de qualidade do solo relacionados à compressibilidade, obtidos a partir da curva de compressão uniaxial, têm sido utilizados para estabelecer condições adequadas ao desenvolvimento das plantas (MOSADDEGUI et al., 2003).

Oliveira et al. (2003) salientam a grande importância do uso da pressão de preconsolidação como avaliador da adoção do manejo do solo. Independentemente do sistema de uso ou manejo, tensão da água e profundidade do solo, a redução do volume total de poros nas pressões de preconsolidação, em geral, são menores que 10%, nível considerado crítico ao crescimento e desenvolvimento de plantas.

O solo possui um banco de memórias de tensões, onde está armazenado todo o histórico de tensões e processos naturais sofridos, estando preservados em sua estrutura (HOLTZ; KOVACS, 1981). No estudo da compressibilidade do solo, existe a possibilidade de análise desse histórico, sendo utilizada para determinar a capacidade de suporte, e também delimitar as áreas de deformações plásticas e elásticas.

O acúmulo de tensões nos solos agrícolas, decorrente das operações mecanizadas e pelo pisoteio animal, afeta os atributos físicos do solo, aumentando a densidade e resistência à penetração, reduzindo a porosidade total e alteração na continuidade de poros. Essas modificações causam restrições à infiltração e redistribuição da água no solo, afetando as trocas gasosas e, conseqüentemente, o desenvolvimento do sistema radicular (HORN; LEBERT, 1994).

A compressibilidade demonstra a resistência do solo à diminuição do volume quando uma carga mecânica é aplicada (HORN; LEBERT, 1994). A compressibilidade depende das propriedades físico-mecânicas do solo (ETANA et al., 1997) e da intensidade e modo de aplicação da energia utilizada para exercer a compactação (FAURE, 1981).

A textura é uma das propriedades do solo que mais influencia a compressibilidade do solo (LARSON et al., 1980; HAKANSSON et al., 1988; HORN, 1988), pois atua na capacidade de retenção de água e na coesão, as quais interferem na pressão de preconsolidação. Abu-Hamdeh; Reeder (2003) observaram que, para uma mesma carga, a compactação é mais expressiva

em solo argiloso do que em solo com textura arenosa. O teor e tipo de argila também determinam a profundidade de transmissão e a persistência da compactação. Assim, quanto maior o teor de argila, maior a profundidade à qual a pressão é transmitida e, portanto, maior a espessura da camada compactada (HORN, 1988).

Diferenças no teor de matéria orgânica e o tipo de minerais presentes na fração argila podem atribuir variações no índice de compressão (LARSON et al., 1980). Estes autores demonstraram que o teor de argila de até 33% aumentou linearmente a suscetibilidade do solo a compactação, permanecendo constante a partir desse valor. Solos com textura arenosa foram menos suscetíveis a compactação que solos com textura argilosa (HORN, 1988; MCNABB; BOERSMA, 1993; HORN; LEBERT, 1994; MCBRIDE; JOOSSE, 1996), e solos com mesmo teor de argila apresentaram-se mais suscetíveis a compactação com o decréscimo da densidade inicial do solo (HORN, 1988). Além disso, a matéria orgânica também atua na compressibilidade do solo (BRAIDA et al., 2008), afetando sua elasticidade.

Larson et al. (1980) desenvolveram modelos que permitem representar a curva de compressão dos solos que já sofreram aplicações de cargas externas. Já, Dias Junior; Pierce (1995) desenvolveram um modelo não linear para solos de regiões temperadas, o qual permite determinar a pressão máxima que o solo pode suportar sem sofrer compactação adicional com base no teor de água do solo. Esse modelo foi testado por Kondo (1998) para Latossolos da região de Lavras submetidos a diferentes sistemas de manejo, sendo que o ajuste do modelo foi afetado pelo sistema de manejo utilizado.

### **4.3 Curva de retenção de água**

A curva de retenção de água (CRA) é de grande importância para o conhecimento do movimento de água no solo (SILVA et al., 2006). É influenciada por diversos fatores, como a distribuição relativa do tamanho, da forma e do arranjo das partículas do solo (SALTER; WILLIAMS, 1965; UEHARA, 1968; REEVE et al., 1973; SHARMA), bem como a composição e concentração de solutos na solução do solo, quando verifica-se a presença de argilas expansivas (THOMAS; MOODIE, 1962; EL-SWAIFY; HENDERSON, 1967). A CRA expressa o volume de água retido

no solo em diferentes tensões, ou seja, em pontos diferentes da curva, representando a característica de retenção de água. Essa relação físico-hídrica permite uma estimativa rápida da disponibilidade de água no solo para as plantas, na profundidade de solo considerada.

As modificações pelo preparo do solo na estrutura, na distribuição do tamanho de poros e no teor de carbono orgânico provocam alterações nas forças de retenção e disponibilidade de água às plantas. O efeito do manejo na estrutura pode ser verificado quando o solo contém grande volume de água, ou seja, quando a água está retida a baixas tensões. Nesse caso, a retenção decorre da estrutura e da distribuição dos tamanhos de poros (BEUTLER et al., 2002), associados ao efeito da matéria orgânica na formação e estabilização de agregados. Em tensões maiores, a retenção não depende da estrutura do solo, mas da composição granulométrica e da mineralogia, devido à área superficial específica das partículas, que é onde ocorre a adsorção de água (GUPTA; LARSON, 1979).

A água é o principal fator de crescimento das plantas e sua disponibilidade tem relação com as oscilações de produtividade. O cálculo de água disponível no solo considera a faixa de umidade compreendida entre o limite superior de disponibilidade de água às plantas, chamada de capacidade de campo (CC), e o limite inferior de disponibilidade, conhecido como ponto de murcha permanente (PMP) (HILLEL, 1980). Existem várias maneiras de se determinar essas duas variáveis, sendo possível encontrar métodos de campo e de laboratório. Em laboratório, a capacidade de campo tem sido comumente considerada como sendo o volume de água retido no solo nas tensões de 10 ou de 33 kPa, respectivamente para solos arenosos e argilosos, enquanto que para o ponto de murcha permanente é considerada a tensão de 1500 kPa.

#### **4.4 Permeabilidade do solo ao ar**

A permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) é uma propriedade do solo que representa a qualidade do espaço poroso quanto ao processo de fluxo de ar. É considerada como um índice de qualidade da estrutural, pois descreve os fatores geométricos dos poros (COREY, 1986).

A  $K_a$  depende da distribuição do tamanho de poros, bem como da quantidade, geometria, forma e continuidade do sistema poroso (COREY, 1986; REICHERT et

al., 2003). De acordo com Ball; Schjønning (2002), podem ser considerados como impermeáveis solos com pequena permeabilidade ao ar (como  $1 \mu\text{m}^2$ ). A permeabilidade ao ar apresenta forte influência do conteúdo de água no solo, seus valores são máximos em solo sem nenhuma quantidade de água (secos) e diminuindo progressivamente com o umedecimento do solo, atingindo um valor zero, quando o solo está saturado. Também apresenta uma relação inversa com a compactação, ou seja, a permeabilidade ao ar é reduzida com o aumento da compactação do solo (BARDEN; PAVLAKIS, 1971).

O revolvimento do solo atua no sentido contrário à compactação, pois altera o arranjo dos poros e, conseqüentemente, a retenção de água e o fluxo de gases (KLEIN; CAMARA, 2007). A maior permeabilidade do solo ao ar se deve ao aumento da macroporosidade, responsável pela aeração e infiltração de água no solo.

Os sistemas de manejo alteram a proporção do espaço poroso ocupado pelo ar e pela água e também a funcionalidade dos poros. De acordo com Fontanela (2008), a distribuição do tamanho de poros do solo não é gradual nem homogênea, em que o predomínio de uma classe de tamanho de poros, quando drenados, pode proporcionar aumentos significativos no espaço aéreo do solo e na interligação de todos os poros drenados.

Para garantir a difusão do ar no solo e, conseqüentemente, a aeração adequada para o desenvolvimento das plantas, o volume de macroporos (poros com diâmetro maior que 0,05 mm) não deve ser inferior a 10% do volume total do solo (TAYLOR, 1950). No entanto, esse valor é apenas uma referência, pois a taxa de difusão gasosa no solo depende também da profundidade e densidade do sistema radicular das plantas, temperatura do solo, tortuosidade do espaço poroso, entre outros (HILLEL, 1980).

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Local de estudo

O estudo foi realizado em uma unidade de produção agropecuária particular, situada no município de Santa Maria, na região da Depressão Central do Rio Grande do Sul (Figura 2), situada aproximadamente 100m de altitude. A região é caracterizada pela ocorrência de precipitação pluvial anual de 1500 mm distribuídas ao longo de todos os meses do ano e o clima é enquadrado, segundo classificação de Köppen (NIMER, 1989), na zona Cfa, com temperaturas médias anuais de 19,3°C.

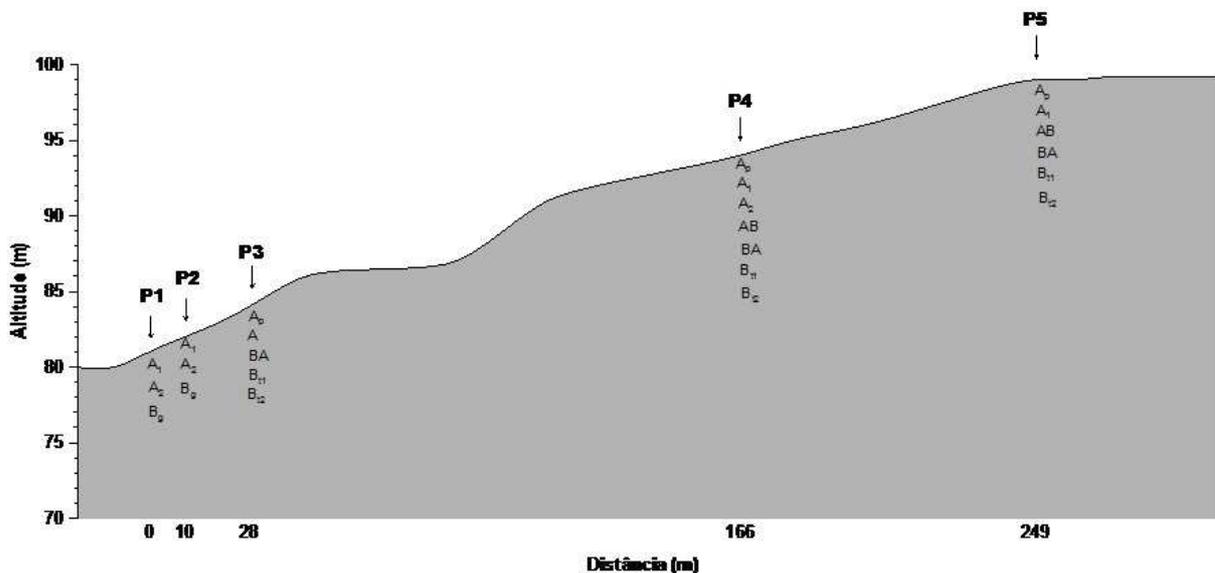


FIGURA 2 – Vista aérea da área de estudo (trincheiras estudadas destacadas em amarelo) (imagem retirada do Google Earth). Data (29/07/2009)

A área escolhida para fazer as coletas foram de pastagens, composta de pastagem anual, no inverno com aveia (*Avena strigosa* Scheb.) e no verão com milho (*Penisetum americanum* (L) ), por pousio, pastagem perene e campo

nativo. A parte mais degradada da topossequência é composta por pastagem anual sob sistema convencional não consolidado de cultivo (última passada de grade um ano antes da coleta) e situa-se no terço superior, a de melhor qualidade esta no terço inferior sob cultivo perene e a parte intermediária apresenta qualidade mediana.

As coletas foram realizadas em cinco perfis de solo, distribuídos ao longo de uma topossequência, que apresenta diferenças quanto ao uso, manejo e declividade. Foram descritos 13 perfis de solo na topossequência por Uhde (2009), sendo que neste trabalho foram escolhidos 5 perfis, discriminados em perfis 1, 2, 3, 4 e 5 e referentes as tradagens/perfis T1(P1), T2(P2), T15(P4), T68(P8) e T97(P13) do trabalho de Uhde (2009). Os perfis 1 e 2 estão localizados na parte inferior da topossequência (várzea); o perfil 3 está localizado na porção inferior da encosta, em área de pastagem perene; o perfil 4 está localizado na porção superior da encosta (pastagem perene), ambos esses 4 primeiros perfis são sem preparo; e o perfil 5 está localizado no topo (Figura 2), em área cultivada com pastagem anual sob preparo convencional não consolidado (passada de grade superficialmente). A área mais significativa de pastagem degradada pelo sobrepastejo situa-se no topo e na encosta, sendo todas as áreas submetidas ao pastejo e a topossequência está disposta do montante à jusante na linha de maior declive da vertente. Os perfis 1 e 2 foram classificados como Gleissolo Háplico e os perfis 3, 4 e 5 foram classificados como Argissolo Vermelho (EMBRAPA, 2006) (Figura 3).





Perfil 1

Perfil 2

Perfil 3

Perfil 4

Perfil 5

FIGURA 3 – Gráfico e fotos da distribuição dos perfis dos Gleissolos Háplicos (Perfis 1 e 2) e dos Argissolos Vermelhos (Perfis 3, 4, e 5) ao longo da topossequência conforme distância e altitude. Fonte: Leonir uhde, 2010

Tabela 1 – Horizontes (Hz), profundidade e valores médios de areia, silte e argila, densidade de partículas (Dp) e carbono orgânico (CO) e classe textural dos cinco perfis de solo. (UHDE, 2009)

Perfil	Hz	Profundidade (m)	----- g Kg <sup>-1</sup> -----			Dp g cm <sup>-3</sup>	C.O. g Kg <sup>-1</sup>	Classe textural
			Areia	Silte	Argila			
1 GX1	A	0-0,16	652	267	81	2,56	11,02	Franco arenoso
	Bg	0,16-0,34	592	296	111	2,58	5,80	Franco arenoso
	Cg	0,34+	395	490	115	2,54	6,38	Franco
2 GX2	A1	0-0,22	827	101	71	2,56	6,9	Areia franca
	A2	0,22-0,50	649	288	63	2,59	3,0	Franco arenoso
	Bg	0,50+	689	218	94	2,55	4,7	Franco arenoso
3 PV3	Ap	0-0,12	671	182	147	2,50	12,2	Franco arenoso
	A1	0,12-0,47	652	179	168	2,52	10,1	Franco arenoso
	BA	0,47-0,83	580	178	203	2,51	9,9	Franco argilo arenosa
	Bt1	0,83-1,23	486	247	290	2,50	4,1	Franco argilo arenosa
	Bt2	1,23-1,70+	462	165	373	2,38	9,5	Argilo arenosa
4 PV4	Ap	0-0,10	653	171	176	2,51	6,3	Franco arenosa
	A1	0,10-0,40	596	200	204	2,53	2,2	Franco argilo arenosa
	A2	0,40-0,78	519	206	275	2,58	3,9	Franco argilo arenosa
	AB	0,78-0,96	394	175	432	2,63	5,9	Argilosa
	BA	0,96-1,09	297	223	481	2,48	5,6	Argilosa
	Bt1	1,09-1,58	336	165	499	2,62	2,6	Argilosa
	Bt2	1,58+	327	198	475	2,50	1,5	Argilosa
5 PV5	Ap	0-0,20	577	238	185	2,57	7,3	Franco arenosa
	A1	0,20-0,53	533	232	235	2,60	5,8	Franco argilo arenosa
	AB	0,53-0,90	428	225	347	2,61	6,8	Franco argilosa
	BA	0,90-1,17	332	281	386	2,60	4,7	Franco argilosa
	Bt1	1,17-1,50	331	177	491	2,55	5,4	Argilosa
	Bt2	1,50+	383	199	417	2,56	4,2	Argilosa

\*GX: Gleissolo Háplico; PV: Argissolo Vermelho

## 5.2 Coleta das amostras

Para a descrição e caracterização dos perfis, foram abertas trincheiras com dimensões de 2,0 x 2,5 x 2,0m, manualmente e/ou com o auxílio de uma retro escavadeira. As coletas de solo foram realizadas em dois momentos: a primeira em dezembro de 2008, para as determinações de compressibilidade, e a segunda em junho de 2009, para a determinação de curva de retenção de água (CRA) e permeabilidade ao ar.

Foram coletadas 120 amostras com estrutura preservada do terço médio de cada horizonte, utilizando cilindros metálicos de 0,057 m de diâmetro e 0,04 m de altura para as determinações de compressibilidade do solo (Figura 4). Foram realizadas cinco repetições em cada horizonte dos diferentes solos estudados da topossequência. Para a obtenção da curva de retenção de água e a determinação da permeabilidade do solo ao ar, foram coletadas 200 amostras (cinco por horizonte) com estrutura preservada. Após coletadas, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos e transportadas até o laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria, a fim de que as amostras fossem processadas. As amostras foram colocadas em bacias preenchidas gradualmente com água até que estas fossem saturadas por capilaridade.



FIGURA 4 – Cilindros e caixas metálicas utilizados para a coleta de solos com estrutura preservada. Foto: Braga, 2008

### 5.3 Determinações

#### 5.3.1 Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado seguindo a norma NBR-12007/90, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1990), com alteração no tempo de aplicação das cargas. Para tal, utilizou-se um consolidômetro, modelo S-450 Terraload (Durham Geo-Interprises) (Figura 5) com indicador digital da carga aplicada e leitura analógica da deformação da amostra.

As amostras, após serem equilibradas na tensão de 10 kPa (KLUTE, 1986), foram submetidas à aplicação de cargas sucessivas e estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, com aplicação de pressão por meio de ar comprimido. Cada carga foi aplicada durante cinco minutos, pois, de acordo com Silva et al. (2000c), mais de 99 % da compactação é alcançada nesse tempo de aplicação de carga.

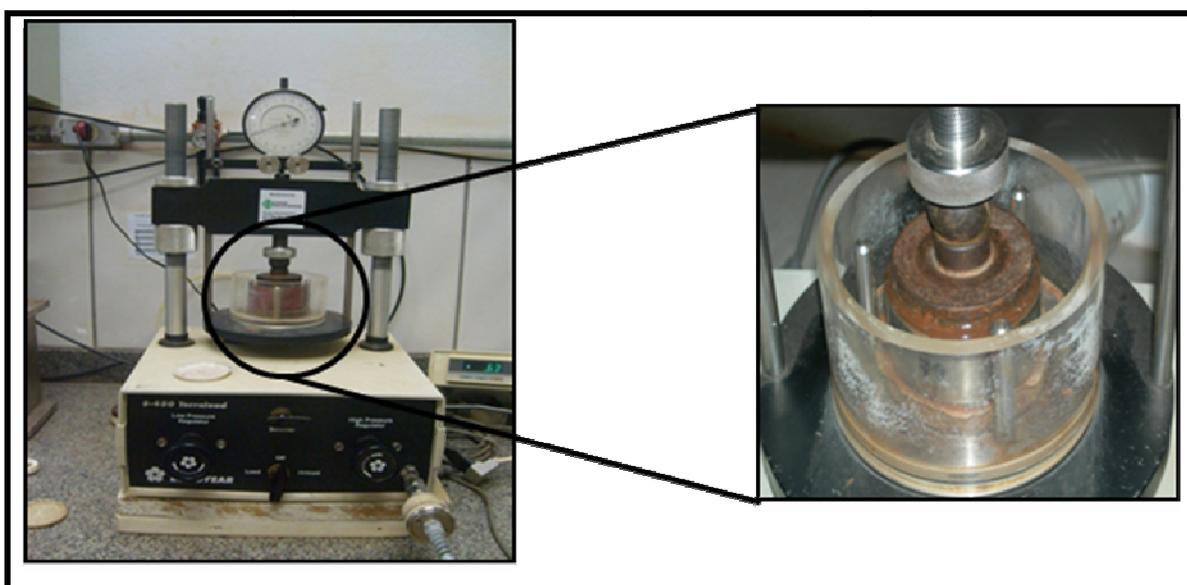


FIGURA 5 – Prensa de compressão uniaxial onde foram comprimidas as amostras de solo nas pressões de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, para fazer o teste de compressibilidade. Foto: Braga, 2008

Após o ensaio, as amostras foram secas em estufa a 105°C até peso constante para que a densidade do solo pudesse ser determinada. Com base nesses valores, foi feita a curva de compressão uniaxial, que consistiu na relação entre o logaritmo da pressão aplicada (abscissa) e a densidade do solo (ordenada).

Com a finalidade de eliminar o efeito da compactação do solo, as curvas de compressão foram normalizadas, ou seja, dividiu-se a densidade do solo ao final de cada carga aplicada pela densidade do solo inicial ( $d_s/d_{s_i}$ ).

Para a determinação da tensão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), índice de compressibilidade (IC), densidade do solo e índice de vazios, foi utilizado o software Compress (REINERT et. al, 2003), optando-se pelo método de Casagrande (HOLTZ; KOVACS, 1981), com ajuste semi-manual (método 2).

### 5.3.2 Curva de retenção de água (CRA), Porosidade e Densidade do solo

Para a obtenção da curva de retenção de água do solo, utilizaram-se amostras que sofreram deformações pela prensa uniaxial (pressões de 25; 50; 100 e 200 kPa) durante cinco minutos e, sem deformações. Após a aplicação das cargas, as amostras foram saturadas por capilaridade e submetidas às tensões de 1, 6 e 10 kPa em uma coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) e 33 e 100 kPa em câmara de pressão de Richards. O conteúdo gravimétrico de água nas tensões de 500 kPa e 1500 kPa foi obtido através de um potenciômetro de ponto de orvalho (dewpoint potentiometer) - WP4, utilizando amostras com estrutura deformada.

Assim, os valores de umidade foram obtidos em base de massa, ou seja, umidade gravimétrica, sendo posteriormente transformados em umidade volumétrica. Através do programa SWRC (DOURADO NETO et al., 2001,) obtiveram-se os parâmetros empíricos  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$ , que foram usados para o ajuste das curvas de retenção de água, realizado segundo modelo proposto por Van Genuchten (1980):

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

em que:

$\theta$  : umidade volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_r$ : umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_s$ : umidade volumétrica no ponto de saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\psi$  : tensão de água no solo ( $\text{cm H}_2\text{O}$ );

$\alpha$ ,  $n$  e  $m$ : coeficientes empíricos.

Após finalizar a aplicação das tensões nas amostras para determinação da retenção de água no solo, as amostras foram secas em estufa a 105 °C para a determinação da densidade do solo ( $D_s$ ), ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) pela fórmula (2) (EMBRAPA, 1997):

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (2)$$

em que onde  $M_s$  é a massa de solo seco (Mg) em estufa a 105 °C e  $V$  é o volume da amostras de solo ( $\text{m}^3$ ).

A porosidade total correspondeu ao volume de água contido na amostra de solo saturado, enquanto que a microporosidade correspondeu à umidade volumétrica quando a amostra esteve sob tensão de 6 kPa. A macroporosidade, por sua vez, foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade (EMBRAPA, 1997).

### 5.3.3 Permeabilidade do solo ao ar

Para a determinação da permeabilidade do solo ao ar, as amostras, após saturadas, foram colocadas na mesa de tensão onde foram equilibradas a uma tensão de 10kPa (REINERT; REICHERT, 2006). Após equilibradas, foi medida a condutividade ao ar utilizando o permeâmetro de ar (VOSSBRINK, 2004). Em seguida, as amostras foram enroladas em papel filme para evitar a perda de água por evaporação e acondicionadas em uma caixa vedada. O procedimento seguinte foi o de aplicação de cargas estáticas (25; 50; 100; 200 kPa) na prensa uniaxial pelo período de 5 minutos cada uma. Os valores de deformação mostrados no extensímetro da prensa uniaxial no início e no final do processo eram anotados para posterior correção do volume do solo. As amostras deformadas foram novamente submetidas à medida de condutividade ao ar.

O permeâmetro de ar consiste na aplicação de fluxo de ar na amostra de solo à pressão baixa (0,1 kPa) e constante (para evitar fluxo turbulento) por meio de fluxímetros com diferentes vazões, como mostra a Figura 6. O manômetro de água mede o gradiente de pressão entre o ambiente e o ar que flui pela amostra de solo.

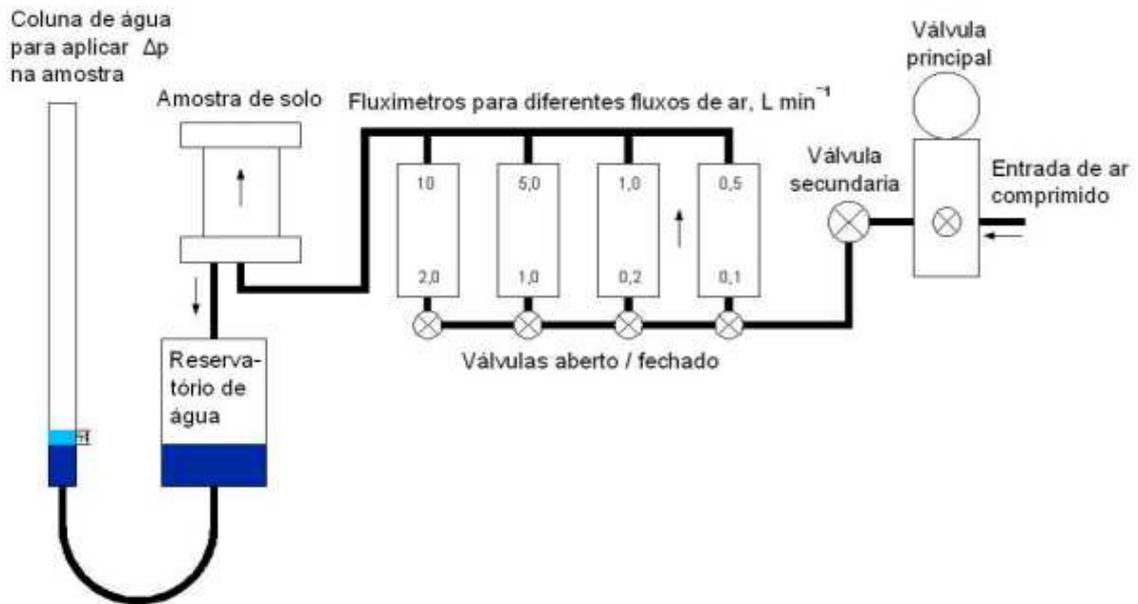


Figura 6 – Equipamento utilizado nas medidas de condutividade do solo ao ar em amostras com estrutura preservada. Fonte: VOSSBRINK (2005) e modificado por BRANDT, 2008 (comunicação pessoal).

Para o cálculo da condutividade ao ar ( $K_l$ ,  $\text{cm s}^{-1}$ ) foi utilizada a seguinte equação (3):

$$K_l = \rho_l g \frac{\Delta V L}{\Delta t \Delta p A}; \quad (3)$$

e a permeabilidade ao ar ( $K_a$ ,  $\mu\text{m}^2$ ) foi calculada a partir da condutividade ao ar (4):

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g}; \quad (4)$$

sendo:  $\rho_l$  a densidade do ar na medição ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $g$  a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ );  $\Delta V$  o volume de ar ( $\text{m}^3$ ) que passa pela amostra durante o tempo  $\Delta t$  (min);  $L$  a altura da amostra (m);  $\Delta p$  a pressão de ar aplicada (hPa);  $A$ , a área superficial da amostra ( $\text{m}^2$ ); e  $\eta$  a viscosidade do ar ( $\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ).

O cálculo da densidade do ar, usado na fórmula acima, é dado por (5):

$$\rho_l = \rho_n \times \left( \frac{T_n \times p}{p_n \times T} \right); \quad (5)$$

em que  $\rho_l$  é a densidade do ar no momento da medição ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $\rho_n$  é a densidade padrão do ar ( $1293 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $T_n$  é a temperatura padrão ( $^\circ\text{K}$ ),  $p$  é a pressão

atmosférica no momento da medição (mbar),  $p_n$  é a pressão atmosférica padrão (1013 mbar) e T é a temperatura do ar no momento da medição (°K).

#### 5.3.4 Análise granulométrica, densidade de partículas e carbono orgânico total

A granulometria do solo foi determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997). A dispersão das 20 g de solo seco ao ar usadas na determinação foi realizada por meio de agitação horizontal, com 120 rpm e durante 4 horas, além da utilização de NaOH 6 % (dispersante químico) e duas esferas de nylon (dispersante mecânico), conforme método descrito por Suzuki et al. (2004a,b).

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico modificado proposto por Gubiani et al. (2006).

O teor de carbono orgânico total no solo foi determinado em amostras de solo com diâmetro menor que 2,0 mm pelo método da combustão úmida descrita em EMBRAPA, (1999) e modificada por Rheinheimer et al. (2008). A metodologia consiste na redução do dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) por compostos de C orgânico e subsequente determinação do dicromato não reduzido por titulação de oxirredução com  $\text{Fe}^{2+}$ , que nesse caso foi o sulfato ferroso amoniacal  $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ .

#### 5.3.5 Análise estatística

Foi feita a correlação linear de Pearson entre as variáveis Índice de compressão (IC) e pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), com as variáveis grau de saturação (GS), índice de vazios (IV), densidade do solo (Ds), Areia, Silte, Argila e carbono orgânico (C O).

O efeito dos tratamentos (perfis) em relação às propriedades avaliadas ( $\sigma_p$ , IC, Ds, IV e GS) foi avaliado pela significância dos contrastes ortogonais dos horizontes superficiais (Ap, A e A1) entre os 5 perfis estudados: Gleissolos X Argissolos - GX x PV, Gleissolo cota mais baixa X Gleissolo cota mais alta - GX [1 x 2], Argissolo encosta inferior e superior X Argissolo topo - PV [(3, 4) x (5)] e Argissolo encosta inferior X Argissolo encosta superior - PV [3 x 4]. Também foi avaliado a significância dos contrastes estudados entre todos os horizontes dos 5 perfis para as propriedades anteriormente mencionadas: A(0, p, 1, 2, B x B(A, t1, t2, g), Cg e Ap

x A(0,1,2,B) e A(0,1,2) x AB e A(0) x A(1,2) e A(1) x A(2) e BA x B(0,t1,t2,g), Cg e B(0,t1,t2,g) x Cg e B(t1,t2) x Bg e B(t1)xB(t2).

O teste “t” de significância foi utilizado para as interpretações dos resultados de curva de retenção de água (CRA) e permeabilidade ao ar.

Em ambos os testes foi usado o programa estatístico SAS (statistical analysis system).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Compressibilidade do solo

Os resultados da correlação linear de Pearson entre as variáveis  $\sigma_p$  e IC e as variáveis grau de saturação, densidade, índice de vazios, areia, silte, argila e carbono orgânico para todos os solos da topossequência estudada constam na Tabela 2. Dentre as variáveis correlacionadas, a  $\sigma_p$  apresentou correlação significativa com as variáveis areia e argila. À medida que o teor de argila aumenta, os valores de  $\sigma_p$  tornam-se maiores. Com a quantidade de areia, a correlação é negativa, ou seja, ocorre um decréscimo na capacidade de suporte de carga à medida que a quantidade de areia é maior. Em alguns solos do Rio Grande do Sul, Suzuki et al. (2008) observaram um aumento na capacidade de suporte de carga com o acréscimo no teor de argila, comportamento que pode se atribuído às forças de coesão entre as partículas de argila (IMHOFF, 2002).

Além da granulometria, a matéria orgânica do solo influencia a  $\sigma_p$ . Apesar da correlação entre o carbono orgânico e a  $\sigma_p$  ter sido negativa, esta não foi estatisticamente significativa. Segundo Horn; Lebert (1994), a uma mesma densidade e a um mesmo potencial de água, o solo é mais compressivo quanto menor o conteúdo de substâncias orgânicas. Estudando a  $\sigma_p$  em Gleissolos Háplicos cultivados e sem uso agrícola, Mentges (2010) também não observou relação entre esta e o teor de carbono orgânico do solo. No entanto, de acordo com Braidá (2004), a matéria orgânica exerce dois efeitos contrários sobre a resistência do solo à compactação, um relacionado com o aumento da coesão entre as partículas minerais e outro com a mudança no arranjo das mesmas, com redução da

densidade, sendo que no primeiro a capacidade de suporte de carga do solo aumenta, e no segundo diminui.

TABELA 2 – Coeficientes de correlação linear de Pearson ( $r$ ) entre as variáveis pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e índice de compressão (IC) com as variáveis grau de saturação (GS), índice de vazios (IV), densidade do solo (Ds), areia, silte, argila e carbono orgânico total (CO) de todos os horizontes da topossequência Argissolos-Gleissolo.

	GS	IV	Ds	Areia	Silte	Argila	C O
$\sigma_p$	-0,19 <sup>ns</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>	-0,15 <sup>ns</sup>	-0,51 <sup>*</sup>	-0,12 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>**</sup>	-0,26 <sup>ns</sup>
IC	0,15 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>ns</sup>	-0,74 <sup>**</sup>	-0,22 <sup>ns</sup>	-0,10 <sup>ns</sup>	0,27 <sup>ns</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>

\* = significativo a 1% de probabilidade de erro; \*\* = significativo a 5% de probabilidade de erro; ns = não significativo.

Para a topossequência avaliada, a  $\sigma_p$  não foi significativamente correlacionada com o grau de saturação, índice de vazios e densidade do solo (Tabela 2), corroborando com os estudos de Mentges (2010). No entanto, Silva et al. (2002b), avaliando a influência do teor de água, expressa pelo grau de saturação, na  $\sigma_p$  de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e um Latossolo Vermelho distrófico típico, observou que  $\sigma_p$  reduziu com o aumento no teor de água, o que acarretou em deformações plásticas com pequenas pressões aplicadas ao solo. Quando o solo se encontra com baixo conteúdo de água, torna-se mais resistente às deformações impostas por pressões externas em função da alta fricção entre suas partículas, enquanto que, com o incremento da umidade, a coesão e atrito entre as partículas reduzem, pelo fato da água atuar como um lubrificante, favorecendo o rearranjo das partículas e, por consequência, reduzindo a capacidade em suportar cargas (HILLEL, 1998; REICHERT et al., 2007).

Como comentado acima, a densidade do solo e o índice de vazios não se correlacionaram significativamente com a  $\sigma_p$ . No entanto, esperava-se que a capacidade de suporte de carga aumentasse à medida que a densidade elevasse e o índice de vazios reduzisse visto que, em um solo mais denso, ocorre um maior contato entre as partículas, o que eleva a capacidade de suportar cargas. Silva et al. (2002b) e Debiasi et al. (2008) observaram incremento na capacidade de suporte com o aumento da densidade do solo. No entanto, em um Argissolo Vermelho distrófico arênico de textura franco arenosa, não houve efeito da densidade do solo no parâmetro pressão de preconsolidação, fato relacionado ao reduzido grau de

saturação das amostras (LIMA et al., 2006).

O índice de compressão (IC) apresentou correlação negativa e significativa apenas com a variável densidade do solo. A menor suscetibilidade à compactação está associada a maiores pontos de contatos entre as partículas e agregados do solo quando o esse está mais denso, o que dificulta a movimentação relativa das mesmas (IMHOFF, 2002). Resultados semelhantes foram observadas por Debiasi et al. (2008) e Mentges (2010), respectivamente, em um Argissolo Vermelho Distrófico típico e um Gleissolo Háplico. Estes autores observaram que o índice de compressão diminuiu linearmente à medida que a densidade se elevou.

Considerando todos os horizontes nos respectivos solos da toposequência em estudo, o IC não se correlacionou positivamente com o grau de saturação. Conforme Braida et al. (2010), o IC apresenta uma relação quadrática com a quantidade de água presente no solo, ou seja, existe uma condição de umidade em que a suscetibilidade à compactação é máxima. À medida que aumenta a umidade, aumenta a compressibilidade, pelo fato da água reduzir a coesão e o atrito entre as partículas do solo. Após um ponto de máxima suscetibilidade à compactação, esta decresce, pelo fato de surgirem pressões neutras, ocorrendo apenas deformação quando o ar é expulso do espaço poroso. Em um Argissolo Amarelo Coeso latossólico de textura média/argilosa, Silva; Cabeda (2006) observaram maiores valores de IC nas amostras com maior conteúdo de água. Em um Latossolo Vermelho distrófico típico e um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, Silva et al. (2002a) observaram que o índice de compressão foi pouco influenciado pelo grau de saturação.

A fração sólida e a fração orgânica dos solos em estudo não apresentaram relação significativa com o IC (Tabela 2). Em seu estudo, Mentges (2010) também não observou efeito do teor de argila na suscetibilidade à compactação, enquanto que o teor de carbono orgânico afetou significativamente e positivamente o IC. Os estudos de Imhoff et al. (2004) e Suzuki et al. (2008) mostraram que um incremento no teor de argila aumenta o IC. Solos argilosos são mais suscetíveis à compactação pelo fato destes serem mais úmidos em maiores tensões. Considerando o efeito da fração orgânica do solo na suscetibilidade à compactação de um Nitossolo Vermelho argiloso, a adição anual de 3 Mg de cama de aviário resultou em um aumento no IC (VEIGA et al., 2007). Conforme Braida et al. (2010), o aumento da matéria orgânica

e a presença de resíduos culturais proporcionam elasticidade ao solo, o que reduz a suscetibilidade à compactação.

Considerando que o comportamento compressivo do solo varia em função das propriedades físicas e hídricas desse, pressupõe-se que, em uma topossequência, devido a variações existentes, comportamentos distintos em relação à capacidade de suporte de carga e a suscetibilidade à compactação devem ocorrer. De fato, diferenças ocorreram, sendo de 94,39% a probabilidade da classe dos Gleissolos apresentar maior capacidade de suporte de carga que os Argissolos (Tabela 3). No entanto, este resultado contraria o observado na Tabela 2, em que a  $\sigma_p$  é positivamente correlacionada com o teor de argila e de forma negativa com a quantidade de areia. Nos solos em estudo, os horizontes superficiais dos Gleissolos são mais arenosos e menos argilosos quando comparados aos horizontes superficiais dos Argissolos. No entanto, este comportamento pode ser explicado em função da densidade do solo, que tem a probabilidade de 92,54% de ser maior nos Gleissolos em relação aos Argissolos. Solos mais densos apresentam um maior empacotamento e mais pontos de contatos entre as partículas, o que eleva a capacidade de suportar cargas (SILVA; CABEDA, 2006).

Para a variável  $\sigma_p$ , foi observada baixa probabilidade de ocorrerem diferenças nos contrastes que comparam os dois Gleissolos (GX [1 x 2]) e os Argissolos da porção inferior e superior com o Argissolo localizado no topo da coxilha (contraste PV [(3, 4) x (5)]) (Tabela 3). Esse comportamento se deve à pouca variação na

granulometria quando comparado os solos dos contrastes citados, visto que esta propriedade (quantidade de areia e argila) foi significativamente correlacionada com a topossequência de solos em estudo. No contraste PV [3 x 4] são avaliadas as diferenças entre o Argissolo da porção inferior (3) e o Argissolo da porção superior (4) da topossequência. O contraste apresentou uma probabilidade de 93,09% da capacidade de suporte de carga do Argissolo da porção inferior ser maior que do Argissolo da porção superior da encosta. Este comportamento se explica novamente pela maior densidade e menor índice de vazios do perfil da porção inferior, o que confere ao solo maior resistência e, por conseqüência, maior capacidade de suporte de carga.

TABELA 3 – Pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), índice de compressão (IC), densidade do solo inicial (Ds), índice de vazios (IV), grau de saturação inicial (GS), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes dos horizontes superficiais (A, A1 e Ap) dos cinco perfis estudados.

Perfil*	Horizontes	Médias	Contrastes	Estimativa	t	Pr > t
----- $\sigma_p$ (kPa) -----						
1 (GX)	A	74,24	GX x PV	45,0033	2,06	0,0561
2 (GX)	A1	82,44	GX [1 x 2]	-8,2000	-0,80	0,4334
3 (PV)	Ap	72,57	PV [(3, 4) x (5)]	11,5467	0,54	0,5942
4 (PV)	Ap	48,55	PV [3 x 4]	24,0167	1,95	0,0691
5 (PV)	Ap	64,80	-	-	-	-
----- IC -----						
1 (GX)	A	0,11	GX x PV	-0,2407	-7,30	<0,0001
2 (GX)	A1	0,08	GX [1 x 2]	0,0280	1,82	0,0880
3 (PV)	Ap	0,19	PV [(3, 4) x (5)]	-0,1853	-5,78	<0,0001
4 (PV)	Ap	0,17	PV [3 x 4]	0,0142	0,76	0,4575
5 (PV)	Ap	0,18	-	-	-	-
----- Ds (g cm <sup>-3</sup> ) -----						
1 (GX)	A	1,62	GX x PV	0,1633	1,91	0,0746
2 (GX)	A1	1,74	GX [1 x 2]	-0,1180	-2,95	0,0094
3 (PV)	Ap	1,61	PV [(3, 4) x (5)]	0,1526	1,83	0,0854
4 (PV)	Ap	1,49	PV [3 x 4]	0,1142	2,36	0,0311
5 (PV)	Ap	1,73	-	-	-	-
----- IV -----						
1 (GX)	A	0,58	GX x PV	-0,1090	-1,23	0,2361
2 (GX)	A1	0,47	GX [1 x 2]	0,1080	2,61	0,0189
3 (PV)	Ap	0,56	PV [(3, 4) x (5)]	-0,0720	-0,84	0,4153
4 (PV)	Ap	0,69	PV [3 x 4]	-0,1275	-2,55	0,0213
5 (PV)	Ap	0,49	-	-	-	-
----- GS (%) -----						
1 (GX)	A	49,79	GX x PV	-6,1112	-2,64	0,0177
2 (GX)	A1	64,13	GX [1 x 2]	-14,3420	4,77	0,0002
3 (PV)	Ap	57,55	PV [(3, 4) x (5)]	-1,1673	-2,24	0,0400
4 (PV)	Ap	44,94	PV [3 x 4]	12,6067	1,63	0,1233
5 (PV)	Ap	67,34	GX x PV	-	-	-

\* GX: Gleissolo Háplico; PV: Argissolo Vermelho.

Considerando que as pressões médias aplicadas ao solo pelos pneus de tratores e colhedoras variam normalmente entre 100 e 200 kPa e que a pressão aplicadas por carretas agrícolas pode chegar até 600 kPa (CARPENEDO, 1994), cuidados devem ser tomados para que a compactação dos solos em estudo seja evitada. Em comparação com os valores observados por Carpenedo (1994), os

valores  $\sigma_p$  de encontrados neste trabalho foram bastante baixos, o que leva a crer que esta área não foi ou poucas vezes foi trafegada. Além disso, o pisoteio animal não está elevando a capacidade de suporte de carga ou as pressões aplicadas pelos cascos dos animais não estão ou chegam até a ordem dos valores observados na Tabela 3.

Além da capacidade de suporte de carga, o conhecimento da suscetibilidade à compactação é fundamental para que as práticas de manejo e a utilização agrícola dos solos sejam realizadas de maneira adequada para que não ocorra o processo de compactação. Ocorreram diferenças estatisticamente significativas entre os contrastes GX x PV e PV [(3, 4) x (5)] para a variável IC (Tabela 3). Estes contrastes indicam que os Gleissolos são menos suscetíveis à compactação que os Argissolos e que a suscetibilidade à compactação do solo no topo da coxilha é menor que na encosta. Além disso, comparando os dois Gleissolos em estudo, a probabilidade de estes serem diferentes é de 91,2%, sendo que o Gleissolo coletado no segundo perfil é menos suscetível a compactar que o do primeiro perfil. Estes comportamentos são explicados pela variação na densidade, que foi negativa e significativamente correlacionada com o IC, ou seja, solos mais densos são menos suscetíveis à compactação em virtude do maior número de pontos de contato entre as partículas e os agregados do solo (IMHOFF, 2002).

A densidade variou nos horizontes superficiais da topossequência estudada. É de 92,54% a probabilidade da densidade dos Gleissolos ser maior que dos Argissolos e, comparando os primeiros, a densidade do Gleissolo do segundo perfil é significativamente maior que a densidade do primeiro Gleissolo (Tabela 3). O Argissolo localizado no topo da coxilha apresenta uma probabilidade de 91,46% da densidade ser maior que os solos localizados nos terços médios e inferior, enquanto que a densidade do último é significativamente maior que a densidade do Argissolo localizado no terço médio da topossequência. A maior densidade nos Gleissolos pode ser explicada pela menor quantidade de argila destes em comparação aos Argissolos, visto que, geralmente, solos mais argilosos são menos densos. Outro fator que pode ter afetado o comportamento observado é a quantidade de carbono orgânico, fator que pode ter sido responsável pela menor densidade do Gleissolo localizado no perfil 1 em relação ao segundo perfil.

Quanto aos Argissolos, o localizado no topo da coxilha apresenta maior densidade em função deste ser anualmente manejado e trafegado para a

implantação das pastagens anuais, além do pisoteio intenso dos animais. O tráfego é considerado o maior responsável pela ocorrência da compactação do solo (SOANE OUWERKERK, 1994). Além disso, outros fatores são considerados, como a utilização errônea da pressão de inflação dos pneus agrícolas (HÅKANSSON, 2005) e realização das operações agrícolas com teores inadequados de água no solo (REICHERT et al., 2007). Apesar dos altos valores de densidade, especialmente nos perfis 2 (Gleissolo) e 5 (Argissolo) (Tabela 4), em nenhum dos solos avaliados a densidade do solo foi maior que a densidade crítica para solos de textura franco arenosa (perfil 1, 3, 4 e 5) e areia franca (perfil 2) (REICHERT et al., 2009).

O índice de vazios apresentou comportamento semelhante ao da densidade do solo, porém de ordem inversa, o que pode contribuir no entendimento dos comportamentos observados para a  $\sigma_p$  e IC. O grau de saturação (GS), determinado em amostras submetidas à tensão de 10 kPa, foi maior nos Gleissolos (contrastes GX x PV) (Tabela 3) e, nestes, o perfil 2 apresentou maior GS. Os solos dos perfis 2 e 5 foram os que apresentaram maior densidade, fato que pode explicar o maior GS. Em um solo compactado, geralmente a quantidade de macroporos é reduzido e os microporos aumentam e, com isso, o conteúdo volumétrico de água e a capacidade de campo são aumentados (REICHERT et al., 2007).

Como dito anteriormente, a curva de compressão representa graficamente o logaritmo da pressão externa aplicada a um corpo de prova, com algum parâmetro ligado à estrutura do solo, como por exemplo, o índice de vazios ou a densidade do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996). Por meio de seu comportamento (linear ou curvilínea) e sua deformação ao longo das cargas aplicadas, é possível inferir sobre quão resistente é o solo à deformação e se esse já sofreu influência de processos externos.

A curva de compressão e a curva de compressão normalizada dos horizontes do Perfil 1 (Gleissolo Háplico) estão ilustradas na Figura 7. O horizonte A apresentou as menores deformações ao longo das cargas aplicadas, enquanto que, nos horizontes Bg e Cg, principalmente no último, as deformações foram maiores, sendo que as maiores deformações foram observadas quando cargas de aproximadamente 80 kPa foram aplicadas sobre as amostras. Tal comportamento se deve à maior densidade e menor índice de vazios do horizonte A (Tabela 4), o que favorece a uma maior resistência do solo, o que evita que maiores deformações ocorram.

O Perfil 2 (Figura 8a,b) teve comportamento semelhantemente ao Perfil 1, porém com deformações menos intensas quando comparado ao primeiro perfil. O horizonte Bg apresentou as maiores deformações, enquanto que o horizonte A1 foi menos compressivo, com o horizonte A2 ocupando uma condição intermediária. Novamente, o comportamento está atribuído à maior densidade e menor índice de vazios dos horizontes superficiais (A1 e A2) (Tabela 4), evitando que maiores deformações ocorram. Além disso, este perfil apresentou-se mais denso e com menor índice de vazios que o perfil anterior, o que explica as deformações menos intensas ocorridas quando as cargas foram aplicadas.

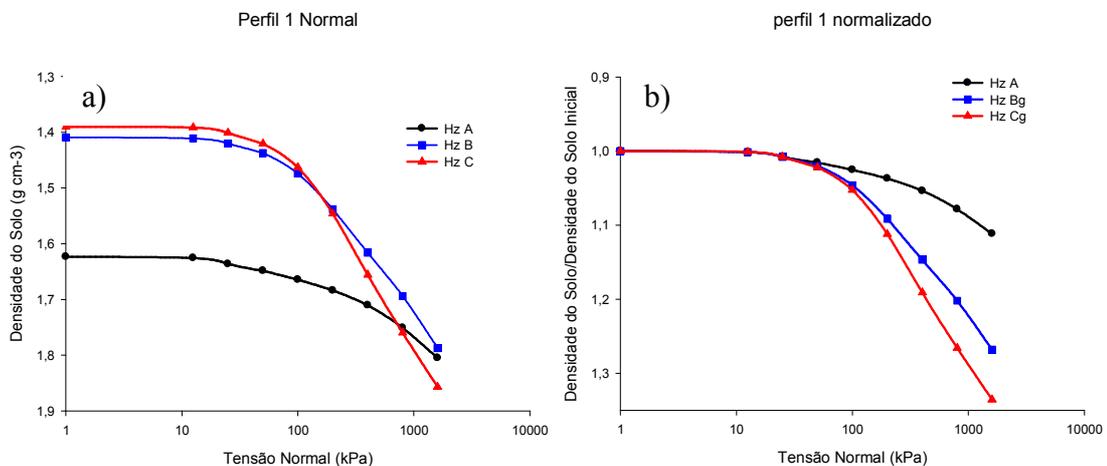


FIGURA 7 – Curva de compressão do solo (a) e curva de compressão normalizada (b) para os horizontes do Gleissolo Háplico (Perfil 1).

Avaliando o comportamento compressivo de dois Gleissolos Háplicos com e sem uso agrícola, Mentges (2010) observou comportamento distinto, porém não contraditório do observado neste trabalho. O autor constatou que as maiores deformações ocorreram nos horizontes superficiais (Ap e A1), enquanto que os horizontes subsuperficiais (A, A2, Cg1 e Cg2) foram menos compressivos, fato associado à maior densidade e menor macroporosidade destes. Além disso, foi considerado também o fato dos horizontes subsuperficiais, especialmente os horizontes Cg1 e Cg2, terem sido pouco afetados pelos processos pedogenéticos, apresentando uma estrutura maciça, enquanto que nos horizontes superficiais geralmente uma estrutura prismática predomina (STRECK et al., 2008). Dessa forma, parece claro que os Gleissolos avaliados neste estudo sofreram o processo

de compactação do solo, principalmente pelo pisoteio bovino, visto estarem mais densos e com menos poros quando comparado aos horizontes subjacentes.

TABELA 4 – Distribuição dos horizontes, grau de saturação inicial (GS), pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), índice de compressão (IC), índice de vazios (IV) e densidade do solo inicial (Ds) da topossequência Argissolos-Gleissolo<sup>(1)</sup>.

Perfil	Horizontes	GS (%)	$\sigma_p$	IC	IV	Ds (g cm <sup>-3</sup> )
1 (GX)	A	49,79	74,24	0,11	0,58	1,62
	Bg	57,4	75,78	0,27	0,83	1,41
	Cg	56,96	86,98	0,34	0,83	1,39
2 (GX)	A1	64,13	82,44	0,08	0,47	1,74
	A2	57,44	59,48	0,10	0,56	1,66
	Bg	70,86	55,30	0,21	0,66	1,54
3 (PV)	Ap	57,55	72,57	0,19	0,56	1,60
	A1	47,91	104,32	0,27	0,68	1,50
	BA	44,25	60,70	0,33	0,76	1,43
	Bt1	62,96	74,78	0,29	0,67	1,50
	Bt2	94,97	58,18	0,19	0,59	1,50
4 (PV)	Ap	44,94	48,55	0,17	0,69	1,49
	A1	51,89	67,88	0,19	0,59	1,59
	A2	48,16	74,65	0,35	0,81	1,43
	AB	55,02	95,32	0,33	0,81	1,46
	BA	77,29	84,23	0,26	0,71	1,45
	Bt1	85,77	129,38	0,18	0,75	1,50
	Bt2	91,37	111,60	0,16	0,66	1,51
5 (PV)	Ap	67,34	64,80	0,18	0,49	1,73
	A1	61,94	102,70	0,24	0,66	1,57
	AB	67,03	129,98	0,30	0,74	1,50
	BA	77,33	126,00	0,25	0,77	1,47
	Bt1	80,21	106,90	0,24	0,77	1,45
	Bt2	83,14	162,65	0,21	0,69	1,52

(1) GX: Gleissolo Háplico; PV: Argissolo Vermelho.

Nas Figuras 9, 10 e 11 está ilustrado o comportamento compressivo dos Argissolos da topossequência em estudo. No Argissolo localizado na porção inferior da encosta (Figura 9a,b), o horizonte BA apresentou as maiores deformações, enquanto que o horizontes Ap foram os que menos sofreram os efeitos das cargas aplicadas. Os demais horizontes (A1, Bt1 e Bt2) identificados neste perfil tiveram um

comportamento intermediário em relação aos horizontes anteriormente citados. Da mesma forma ao observado nos dois Gleissolos da topossequência, a maior densidade e o menor índice de vazios foram os fatores determinantes para que menores deformações ocorressem no horizonte superficial Ap (Tabela 4). Como já comentando anteriormente, esse horizonte é o que mais sofre influência de fatores externos, principalmente ação antrópica quando da realização das práticas culturais, o que pode ocasionar um aumento na densidade, efeito que evidencia o processo de compactação do solo.

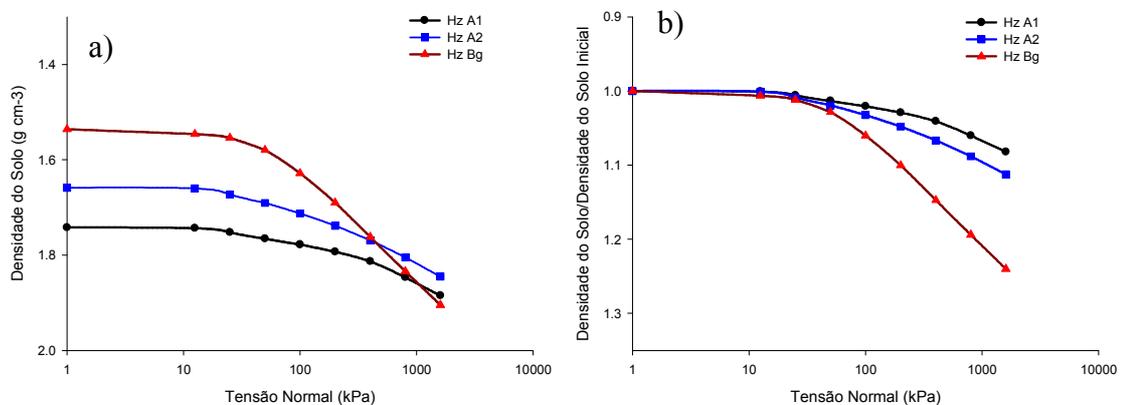


FIGURA 8 – Curva de compressão do solo (a) e curva de compressão normalizada (b) para os horizontes do Gleissolo Háplico (Perfil 2).

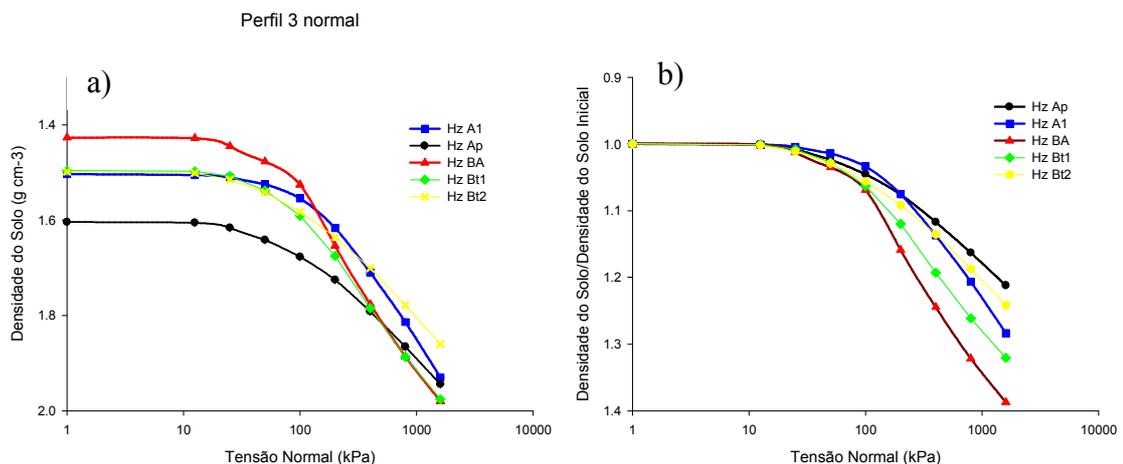


FIGURA 9 – Curva de compressão do solo (a) e curva de compressão normalizada (b) para os horizontes do Argissolo Vermelho (Perfil 3).

Para os Argissolos localizados na cota superior (Perfil 4) e no topo da coxilha (Perfil 5), um comportamento distinto foi observado para os perfis comentados

anteriormente. Nesses horizontes, a densidade e o índice de vazios não foram fatores determinantes para que as deformações ocorressem em maior ou menor grau, e sim o teor de argila e o grau de saturação, que exerceram forte influência no comportamento compressivo desses solos.

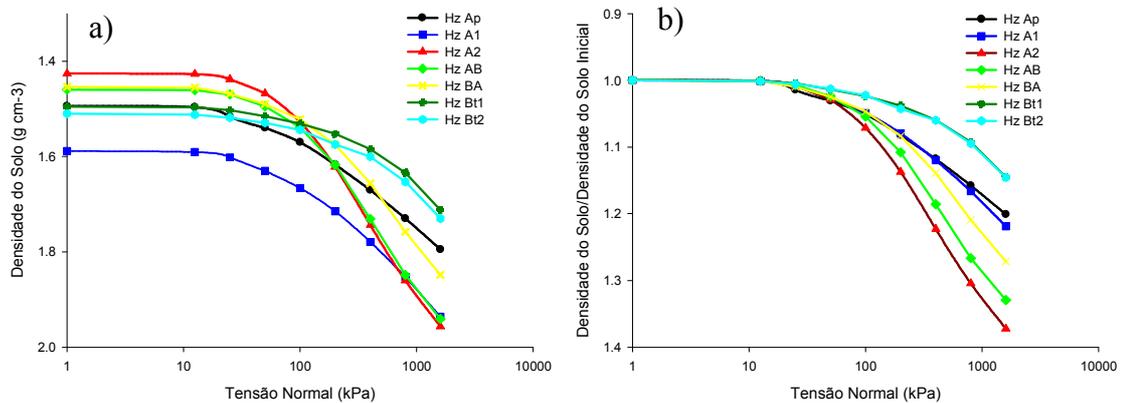


FIGURA 10 – Curva de compressão do solo (a) e curva de compressão normalizada (b) para os horizontes do Argissolo Vermelho (Perfil 4).

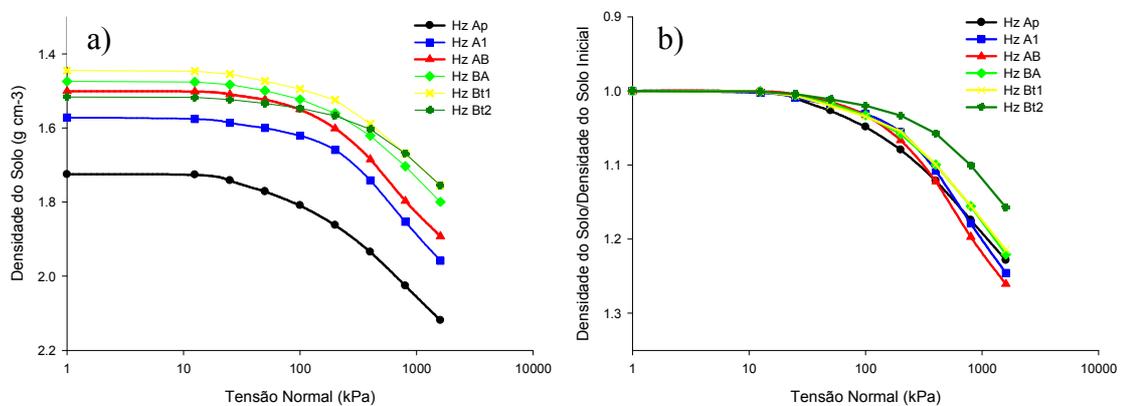


FIGURA 11 – Curva de compressão do solo (a) e curva de compressão normalizada (b) para os horizontes do Argissolo Vermelho-Amarelo (Perfil 5).

No Perfil 4 (Figura 10a,b), os maiores incrementos na densidade à medida que se aumentaram as cargas aplicadas ocorreram no horizonte A2, enquanto que os horizontes Bt1 e Bt2 apresentaram comportamento semelhante, deformando-se menos. Os demais horizontes desse perfil (AB, BA, A1 e Ap) apresentaram um comportamento intermediário em relação ao aumento de densidade quando as pressões sobre as amostras foram aplicadas. No Perfil 5 (Figura 11a,b) o horizonte Bt2 também foi o que menos se deformou, sendo que os demais horizontes

apresentaram comportamento semelhante (Figura 10b). Porém, convém destacar que o horizonte AB sofreu as maiores deformações.

Como comentado anteriormente, a maior quantidade de argila presente nos horizontes Bt1 e Bt2 fez com que esses se deformassem menos quando cargas maiores foram aplicadas. Solos ou horizontes argilosos apresentam maior porosidade (e/ou índice de vazios) que solos ou horizontes arenosos, tal como pode-se observar na Tabela 4. No entanto, grande parte desses espaços vazios são de microporos, que são os poros responsáveis pela retenção de água quando a umidade está abaixo da capacidade de campo, o que explica o maior grau de saturação observado nos horizontes Bt1 e Bt2 (Tabela 4). Quando o solo se encontra com alta quantidade de água, pressões neutras surgem e as deformações ocorrem apenas quando o ar é expulso do meio poroso (BRAIDA et al., 2010). Após a expulsão do ar, o solo encontra-se praticamente saturado, comportando-se como um fluido, o que evita que maiores deformações ocorram. Tal comportamento foi observado nos horizontes citados.

Apesar de diferenças estatísticas significativas terem ocorrido no contraste que compara todos os horizontes “A” em relação aos horizontes “B” dos solos da topossequência em estudo (contraste A(0, p, 1, 2, B x B(A, t1, t2, g), Cg) (Tabela 5), sendo maior a densidade do solo e menor o grau de saturação nos horizontes “A”, foram os horizontes mais profundos (BA, Bt1, Bt2, Bg e Cg) que apresentaram a maior  $\sigma_p$  (Tabela 5). Tal comportamento se deve ao fato desses possuírem maior quantidade de argila (Tabela 1) pois, como observado anteriormente, a capacidade de suporte de carga é positivamente correlacionada com o teor de argila (Tabela 2), fato explicado pela maior força de coesão em solos argilosos (IMHOFF, 2002).

Nos contrastes Ap x A(0,1,2,B) e A(0,1,2) x AB comportamento semelhante também foi observado (Tabela 5). Os horizontes Ap, apesar de apresentar maior densidade (Tabela 6) em função destes terem sido influenciados pela ação antrópica, através das práticas de manejo e tráfego de máquinas, apresentaram menor capacidade de carga que os demais horizontes “A”. Nos horizontes classificados como A, mas que já apresentam características de horizontes B (horizontes AB), principalmente características morfológicas, estruturais e granulométricas (maior teor de argila), sendo a última a responsável pelo aumento na  $\sigma_p$ .

Os horizontes Bt (Bt1 e Bt2) suportaram maiores cargas que o horizonte Bg (Tabela 5). Esperava-se esse comportamento para o horizonte Bg, visto esse ter sido pouco influenciado pelos processos pedogenéticos, apresentasse menos espaços vazios em sua estrutura, sendo grande parte deles formados por pequenos poros, tornando o solo pouco compressível, o que contribuiria para uma maior  $\sigma_p$ . No entanto, estes horizontes apresentaram mais vazios em sua estrutura, sem ocorrer no entanto diferenças significativas na densidade (Tabela 5). Novamente, a maior quantidade de argila nos horizontes Bt1 e Bt2 explicam o comportamento observado.

TABELA 5 - Pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), índice de compressão (IC), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes dos horizontes da topossequência Argissolos-Gleissolo.

Contrastes	Estimativa	Valor t	Pr > t
----- $\sigma_p$ (kPa) -----			
A(0, p, 1, 2, B) x B(A, t1, t2, g), Cg	-155,5433	-2,83	0,0057
Ap x A(0,1,2,B)	-233,2600	-3,21	0,0019
A(0,1,2) x AB	-205,5100	-3,40	0,0010
A(0) x A(1,2)	-46,0300	-0,67	0,5071
A(1) x A(2)	-49,6300	-1,33	0,1857
BA x B(0,t1,t2,g), Cg	-48,7700	-0,71	0,4769
B(0,t1,t2,g) x Cg	78,7250	0,87	0,3876
B(t1,t2) x Bg	250,2450	4,73	<0,0001
B(t1)x B(t2)	-21,3750	-0,77	0,4411
----- IC -----			
A(0, p, 1, 2, B x B(A, t1, t2, g), Cg	-0,4138	-4,96	<0,0001
Ap x A(0,1,2,B)	-0,3630	-3,29	0,0015
A(0,1,2) x AB	-0,9030	-9,85	<0,0001
A(0) x A(1,2)	-0,5810	-5,54	<0,0001
A(1) x A(2)	0,0650	1,15	0,2531
BA x B(0,t1,t2,g), Cg	0,4425	4,27	<0,0001
B(0,t1,t2,g) x Cg	-0,9420	-6,84	<0,0001
B(t1,t2) x Bg	-0,1820	-2,27	0,0259
B(t1)x B(t2)	0,1460	3,48	0,0008

Como anteriormente discutido, o IC correlacionou-se negativamente com a densidade do solo (Tabela 2). Além da densidade, outros fatores podem interferir no comportamento compressivo do solo, como a umidade e os teores de argila e carbono orgânico do solo. Considerando os horizontes em estudo, a densidade foi fator determinante no comportamento do IC, pois os horizontes mais densos (Tabela 6) foram menos suscetíveis à compactação, como observado nos contrastes A(0, p, 1, 2, B x B(A, t1, t2, g), Cg, Ap x A(0,1,2,B), A(0,1,2) x AB e A(0) x A(1,2) (Tabela 5), em que os horizontes à esquerda de cada contraste apresentaram os menores valores de IC, distinguindo-se significativamente dos horizontes com os quais foram contrastados. Além disso, pode-se considerar que os horizontes à direita dos contrastes, em função de serem mais argilosos (Tabela 1), estavam mais saturados

(Tabela 6), o que também contribuiu para a maior suscetibilidade à compactação. Quando o solo está mais denso, o número de pontos de contato entre as partículas e os agregados do solo é maior, o que dificulta a movimentação das mesmas (IMHOFF, 2002). Por outro lado um solo com maior quantidade de água é mais suscetível à compactação, pois a água reduz a coesão e o atrito entre as partículas do solo.

Ocorreram diferenças significativas para a densidade do solo, índice de vazios e grau de saturação entre os horizontes A1 e A2 (Tabela 6), sendo que os primeiros são mais densos, apresentam um menor índice de vazios e grau de saturação. Dessa forma, esperava-se que os horizontes A2 fossem mais suscetíveis à compactação. No entanto, apesar dessas diferenças, a compressibilidade desses horizontes foi semelhante, não ocorrendo diferenças significativas.

Considerando os horizontes subsuperficiais em estudo, os horizontes que sofreram o processo de Gleização (horizontes Bg e Cg dos contrastes  $B(0,t_1,t_2,g) \times Cg$  e  $B(t_1,t_2) \times Bg$ ) foram mais suscetíveis à compactação (Tabela 5). Esses horizontes são menos densos (apesar de não ser significativa a diferença a 5% de probabilidade de erro para o horizonte Bg), apresentam maior índice de vazios e estão menos saturados (Tabela 6). Essas diferenças explicam o comportamento observado.

Os horizontes BA e Bt1 (contrastes  $BA \times B(0,t_1,t_2,g)$ ,  $Cg$  e  $B(t_1) \times B(t_2)$ ) também são mais suscetíveis à compactação em relação aos horizontes com eles contrastados. Apesar de diferenças significativas não terem ocorrido, esses horizontes são menos densos, o que pode explicar os maiores valores de IC. Além disso, esses solos apresentam os mais vazios e menor grau de saturação, o que contribui para explicar o comportamento observado.

TABELA 6 – Densidade do solo (Ds), índice de vazios (IC), grau de saturação (GS), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes dos horizontes da topossequência Argissolos-Gleissolo.

Contrastes	Estimativa	Valor t	Pr > t
----- Ds (g kg <sup>-1</sup> ) -----			
A(0, p, 1, 2, B x B(A, t1, t2, g), Cg	1,1232	9,17	<0,0001
Ap x A(0,1,2,B)	0,5186	3,23	0,0018
A(0,1,2) x AB	0,6419	4,43	<0,0001
A(0) x A(1,2)	0,3733	2,46	0,0160
A(1) x A(2)	0,2113	2,40	0,0184
BA x B(0,t1,t2,g), Cg	-0,2282	-1,52	0,1319
B(0,t1,t2,g) x Cg	0,7844	3,94	0,0002
B(t1,t2) x Bg	0,1340	1,11	0,2712
B(t1)xB(t2)	-0,0880	-1,46	0,1495
----- IV -----			
A(0, p, 1, 2, B x B(A, t1, t2, g), Cg	-0,9531	-6,72	<0,0001
Ap x A(0,1,2,B)	-0,7865	-4,23	<0,0001
A(0,1,2) x AB	-1,0107	-6,02	<0,0001
A(0) x A(1,2)	-0,4064	-2,31	0,0233
A(1) x A(2)	-0,2779	-2,73	0,0077
BA x B(0,t1,t2,g), Cg	0,2420	1,39	0,1672
B(0,t1,t2,g) x Cg	-1,0040	-4,36	<0,0001
B(t1,t2) x Bg	-0,3580	-2,56	0,0124
B(t1)xB(t2)	0,2575	3,68	0,0004
----- GS (%) -----			
A(0, p, 1, 2, B x B(A, t1, t2, g), Cg	-195,9418	-16,06	<0,0001
Ap x A(0,1,2,B)	-7,2415	-0,45	0,6518
A(0,1,2) x AB	-26,4810	-1,83	0,0703
A(0) x A(1,2)	-46,1375	-3,05	0,0031
A(1) x A(2)	-63,6725	-7,27	<0,0001
BA x B(0,t1,t2,g), Cg	-87,0080	-5,82	<0,0001
B(0,t1,t2,g) x Cg	170,9510	8,62	<0,0001
B(t1,t2) x Bg	113,6430	9,43	<0,0001
B(t1)xB(t2)	-40,5280	-6,72	<0,0001

## 6.2 Permeabilidade do solo ao ar

Os horizontes mais profundos tiveram maiores valores de densidade do solo em todos os perfis estudados (Tabela 7). Houve incremento significativo nos valores

de densidade do solo com o aumento da carga aplicada na amostra, demonstrando que a aplicação de cargas sucessivas e maiores, uma após a outra, no solo provocam sucessivos aumentos dos valores de densidade nos horizontes Ap e A1 em todos os perfis. Analogamente, houve ainda uma redução sucessiva na porosidade total à medida que se aumentou a carga aplicada às amostras, o que se deve principalmente à redução dos macroporos, enquanto a microporosidade foi pouco afetada, apresentando um incremento numérico apenas quando aplicadas as maiores cargas (100 e 200 kPa). Klepker & Anghinoni (1995); Corsini & Ferraudo (1999) e Onwualu & Anazodo (1989) também verificaram aumento da densidade com redução da porosidade total com o aumento da carga aplicada por máquinas agrícolas. Silva & Kay (1997) salientaram que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura e teor de carbono orgânico, mas muito pouco influenciada pelo aumento da densidade do solo, originada do tráfego de máquinas e implementos agrícolas. Isso pode ser observado analisando os valores de microporosidade os quais não apresentaram alterações à medida que se aumentou a carga aplicada.

Tabela 7 – Valores médios de porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e densidade do solo (Ds) dos horizontes superficiais e subsuperficial dos perfis 1, 3 e 5 da topossequência estudada para quatro cargas externas aplicadas.

Hz.	Carga kPa	Pt	Macro $m^3 m^{-3}$	Micro	Ds $Mg m^{-3}$
<b>Perfil 1</b>					
A	25	0,44	0,12	0,32	1,42
	50	0,41	0,09	0,32	1,51
	100	0,34	0,08	0,26	1,69
	200	0,37	0,05	0,32	1,62
Bg	25	0,42	0,12	0,31	1,48
	50	0,40	0,13	0,27	1,55
	100	0,41	0,11	0,29	1,53
	200	0,40	0,10	0,31	1,54
<b>Perfil 3</b>					
Ap	25	0,42	0,18	0,25	1,45
	50	0,39	0,13	0,26	1,52
	100	0,37	0,10	0,27	1,57
	200	0,36	0,09	0,27	1,60
A1	25	0,40	0,16	0,24	1,51

	50	0,40	0,16	0,24	1,51
	100	0,39	0,15	0,24	1,53
	200	0,36	0,11	0,25	1,61
<b>Perfil 5</b>					
Ap	25	0,34	0,10	0,25	1,68
	50	0,35	0,09	0,26	1,68
	100	0,33	0,07	0,25	1,73
	200	0,32	0,06	0,26	1,74
A1	25	0,42	0,14	0,28	1,51
	50	0,41	0,12	0,29	1,53
	100	0,40	0,10	0,30	1,56
	200	0,38	0,08	0,31	1,60

Isso também é descrito por Reichert et al. (2003), os quais acrescentam ainda que, com a compactação, há um aumento da densidade e da resistência do solo, redução da porosidade, principalmente macroporosidade ou porosidade de aeração (poros maiores que 50 mm), além de afetar diversos de seus atributos como a condutividade hidráulica, permeabilidade, infiltração de água e outras características ligadas à porosidade do solo. Essas alterações físicas, provocadas pela compactação, afetam o fluxo ou a concentração de água, oxigênio, dióxido de carbono, nutrientes e temperatura, que podem limitar o crescimento e desenvolvimento das plantas e causar problemas ambientais. Pode-se ainda destacar que, sob condições de maior densidade do solo na superfície, há possibilidade de reduções na produtividade das culturas quando da ocorrência de déficit hídrico nos estágios fenológicos críticos, o que foi constatado por Onwualu & Anazodo (1989). A longo prazo é possível que o acúmulo de matéria orgânica e a redução no tráfego contribuam para reduzir a densidade do solo (SILVA;KAY, 1997). A maior Ds nos solos cultivados está relacionada com a compactação do solo pelo tráfego de máquinas e implementos (HAJABBASI et al.,1997; HARTEMINK, 1998; CAVENAGE et al., 1999), com a redução dos teores de matéria orgânica (SILVA; KAY, 1997; DALAL; CHAN, 2001) e com a menor estabilidade da estrutura do solo (HORN et al., 1995).

As densidades observadas no horizonte Ap e A1 dos perfis 1 e 3 estão abaixo do limite crítico de densidade proposto por Reichert et al. (2009) (1,6 a 1,7 Mg cm<sup>-3</sup>) para essa classe de solo quando as amostras são submetidas às menores cargas (25 e 50 kPa) Entretanto, com o aumento da carga aplicada há também o aumento da densidade, a qual passa a se aproximar dos níveis críticos apontados

por Reichert et al. (2009), os quais encontraram aumento da densidade do solo a ocorrência de compactação corroborando com os resultados encontrados. O horizonte Ap do perfil 5 apresenta DS acima dos valores críticos ao crescimento e desenvolvimento das plantas, ao contrario do horizonte subsuperficial (A1) que apresenta valores inferiores de Ds. Esse fato pode ser atribuído ao preparo convencional e antropização desse horizonte, concordando com o observado por Silva et al. (2005) o qual concluiu que, dependendo do modo como é conduzido, o sistema de preparo convencional pode provocar compactação do solo, ou ainda, pode ser derivada da compressão externa efetuada pelo pisoteio animal (UHDE, 2009).

A permeabilidade ao ar do solo é um indicador para verificar as alterações do sistema poroso do solo causadas pela compactação dos sistemas de manejo adotados. O fluxo de ar ocorre no solo principalmente nos poros grandes, onde também ocorre o fluxo preferencial de água (BLANCO-CANQUI et al. 2007). A relação entre os valores de permeabilidade ao ar antes (Kaa) e depois (Kad), de aplicadas as cargas de 25, 50, 100 e 200 kPa estão apresentados na Tabela 8, bem como o teste “t” de significância entre os valores. Na maioria dos casos os valores de Ka foram maiores nos horizontes (A, A1 e Ap). Segundo Sequinatto (2010), a permeabilidade ao ar é maior normalmente nas camadas mais superficiais, onde a quantidade e continuidade de poros é maior.

Tabela 8 - Valores de permeabilidade ao ar antes (Kaa) e depois (Kad) de aplicadas as cargas de 25, 50, 100 e 200 kPa na prensa uniaxial em uma amostra equilibrada à 10 kPa de tensão.

Perfil	Hz.	Prof. m	$\mu\text{m}^2$											
			Kaa <sub>25</sub>	Kad <sub>25</sub>		Kaa <sub>50</sub>	Kad <sub>50</sub>		Kaa <sub>100</sub>	Kad <sub>100</sub>		Kaa <sub>200</sub>	Kad <sub>200</sub>	
1	A	0,00-0,16	68,67	54,27	ns	98,02	77,13	ns	126,73	40,85	*	71,92	49,39	ns
	Bg	0,16-0,34	62,43	75,00	ns	73,67	65,24	ns	104,71	88,74	*	100,78	55,97	ns
2	A1	0,00-0,22	64,51	59,00	ns	89,68	89,37	ns	86,85	95,39	ns	38,77	40,01	ns
	A2	0,22-0,50	35,87	26,43	ns	40,21	39,95	ns	59,31	43,29	ns	26,53	34,15	ns
3	Ap	0,00-0,12	95,03	99,57	ns	91,88	98,96	ns	112,65	72,53	ns	109,82	41,73	ns
	A1	0,12-0,47	66,71	59,62	ns	61,80	58,08	ns	92,51	55,32	ns	64,82	23,91	*
4	Ap	0,00-0,10	60,74	27,5	ns	102,81	45,17	ns	87,75	44,61	ns	78,45	32,01	*
	A1	0,10-0,40	65,80	87,12	ns	51,88	91,14	ns	46,18	54,99	ns	44,29	37,07	ns
5	Ap	0,00-0,20	41,44	27,31	ns	54,09	18,78	*	68,64	44,49	*	45,55	13,90	ns
	A1	0,20-0,53	53,14	81,25	ns	56,31	71,06	ns	41,44	53,14	ns	46,82	21,63	*

Hz. – horizonte; Prof. – profundidade. <sup>ns</sup> – não significativo; \* significativo à nível de 5 %.

As amostras de todos os horizontes quando submetidas à carga de 25 kPa apresentaram valores de porosidade de aeração acima de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , valor considerado como o mínimo para garantir adequada aeração do solo, como relatado em Reichert et. al. (2007). Entretanto, com o aumento das cargas houve uma redução desses valores, chegando a níveis inferiores ao nível crítico de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Porém, Prevedello (1996) relata que, além da quantificação e classificação diamétrica, a qualidade dos poros é de suma importância, pois diz respeito à continuidade, forma e distribuição dos poros e estas características são responsáveis pela retenção e transporte de água no solo. Segundo Dias Junior (2000), o efeito primário da compactação é a redução do volume de poros, causando um reagrupamento das partículas. O aumento da densidade do solo e a redução da porosidade alteram a capacidade de trocas gasosas, retenção de água, condutividade hidráulica e resistência do solo à penetração ocasionando impedimento mecânico ao crescimento de raízes (REICHERT et al., 2007).

A permeabilidade ao ar foi maior quando as amostras foram submetidas às menores cargas (25 e 50 kPa), reduzindo com o aumento das cargas, diferindo estatisticamente apenas no horizonte Ap do perfil 5. Esse comportamento está relacionado à pressão de pré-consolidação dos horizontes, os quais apresentam valores de pré-consolidação maiores que essas cargas, assim cargas inferiores a capacidade de suporte do solo não promoveram grandes alterações na estrutura porosa, não se refletindo na capacidade de aeração dos horizontes estudados. Entretanto, no horizonte Ap do perfil 5, verificou-se uma drástica redução da permeabilidade ao ar, a qual está associada à redução da porosidade total e macroporosidade. De acordo com Horn (2003), o fluxo de gás é reduzido pela diminuição no diâmetro do poro, aumento da saturação de água e com aumento da compactação do solo, pois as partículas e, ou, poros do solo se reorganizam, causando anisotropia das funções do poro. Thomasson (1978) acrescenta ainda que valores adequados de capacidade de aeração são dependentes das condições climáticas e os valores críticos de porosidade de aeração devem ser ampliados sob condições mais úmidas.

Assim, os resultados demonstram que a aplicação de níveis crescentes de estresse mecânico nos ensaios de compressão unidimensional, sob pressões

consideradas fracas (25 e 50) kPa, não produzem efeitos negativos sobre a estrutura do solo com reflexos no espaço poroso, resultando em modificações no armazenamento de água e permeabilidade ao ar. Tais pressões situam-se freqüentemente abaixo das pressões historicamente submetidas ao solo, logo mantêm as características do espaço poroso do solo (DIAS JUNIOR, 2000). Isto contempla a hipótese do trabalho de que pressões, inferiores a pressão de pré-consolidação, não afetam significativamente a estrutura e porosidade do solo. Entretanto, Bortoluzzi et al. (2008) verificaram que a aplicação de níveis crescentes de estresse mecânico nos ensaios de compressão unidimensional, mesmo sob pressões consideradas fracas (inferiores a 50 kPa), produziram efeitos negativos sobre a estrutura do solo e a repartição do espaço poroso entre o ar e a água em função do rearranjo da estrutura da matriz sólida aos estresses sofridos, reduzindo a aeração em Argissolo Vermelho.

Após a aplicação das cargas 100 e 200 kPa, nos perfis 1, 2, 4 e 5, observou-se redução da permeabilidade ao ar diferindo significativamente do valor obtido anteriormente à aplicação da carga. Isso está associado à deformação ocasionada pela aplicação da carga e ao deslocamento e rearranjo de partículas de areia, silte e argila, reduzindo a quantidade de macroporos, aumentando a quantidade de microporos e diminuindo a porosidade total; com isso há um impedimento a passagem de ar pelos poros diminuindo a permeabilidade ao ar do solo. Isso corrobora com o encontrado por Horn & Rostek (2000), os quais, estudando um solo que sofreu uma compressão unidimensional de 150 kPa, observaram a diminuição da permeabilidade ao ar e da porosidade do solo e atribuíram esse comportamento ao aumento do conteúdo volumétrico de sólidos, da densidade do solo e drástica redução na macroporosidade. Bortoluzzi et al. (2008) verificaram que a aplicação de níveis crescentes de estresse mecânico promoveu redução do espaço poroso. Hill (1990) acrescenta que os efeitos agravados até o ponto de inviabilizar a continuidade do sistema e, assim, reduzir severamente a difusão de gases no solo.

### **6.3 Curva de retenção de água no solo**

A curva de retenção de água é de grande importância para o conhecimento do movimento de água no solo (UHDE, 2009). É influenciada por diversos fatores, como a distribuição relativa do tamanho, da forma e do arranjo das partículas do solo (REEVE et al., 1973; SHARMA; UEHARA, 1968). Em baixas tensões, a

retenção decorre da estrutura e da distribuição dos tamanhos de poros (BEUTLER et al., 2002), associados ao efeito da matéria orgânica na formação e estabilização de agregados. Em tensões maiores, a retenção não depende da estrutura do solo, mas da composição granulométrica e da mineralogia, devido à área superficial específica, que é onde ocorre a adsorção de água (GUPTA; LARSON, 1979).

Observa-se que os valores de umidade do solo vão diminuindo conforme aumenta a tensão aplicada (Figura 12), devido à saída de água dos poros e assim aumentando o espaço aéreo. Nos horizontes superficiais, a quantidade de água presente no potencial de -10 kPa, referida na literatura como capacidade de campo (CC) para solos com textura franco-arenosa (HILLEL, 1998), foi superior que à umidade nos horizontes subsuperficiais nos perfis estudados. Nas curvas de retenção do perfil 1 não se observaram diferenças significativas entre as amostras que sofreram a ação das cargas de 25, 50, 100 e 200 kPa no horizonte Bg. Entretanto, no horizonte Ap, observou-se diferenças significativas na seção final da curva de retenção (tensões de 1000 e 1500 kPa). Nesse perfil, as amostras submetidas às pressões de maiores cargas (100 e 200 kPa) não apresentaram diferenças no conteúdo de água retida na CC das demais amostras, mas, observaram-se diferenças significativas nas maiores tensões.

Esse comportamento está relacionado com o processo de compactação do solo que promove a redução da macroporosidade e porosidade total. Isso também foi observado nos horizontes Ap e A1 do perfil 3 e horizonte Ap do perfil 5 confirmando a hipótese do trabalho a qual previa um aumento do armazenamento de água nas maiores tensões com o aumento do estado de compactação. De acordo com Silva et al. (1988), a compactação provocada pelo uso agrícola normalmente ocasiona uma drástica redução na macroporosidade podendo haver, em muitos casos, maior volume de microporos, o que aumentaria a capacidade de armazenamento de água (BERTOL; SANTOS, 1995). Os resultados encontrados no trabalho corroboram com Archer & Smith (1972), os quais concluíram que a Ds influenciou inversa e significativamente a retenção de água ( $p < 0,05$ ) e descrevem que a Ds tem ação sobre a retenção de água, decorrente de sua influência na porosidade total e distribuição do tamanho dos poros.

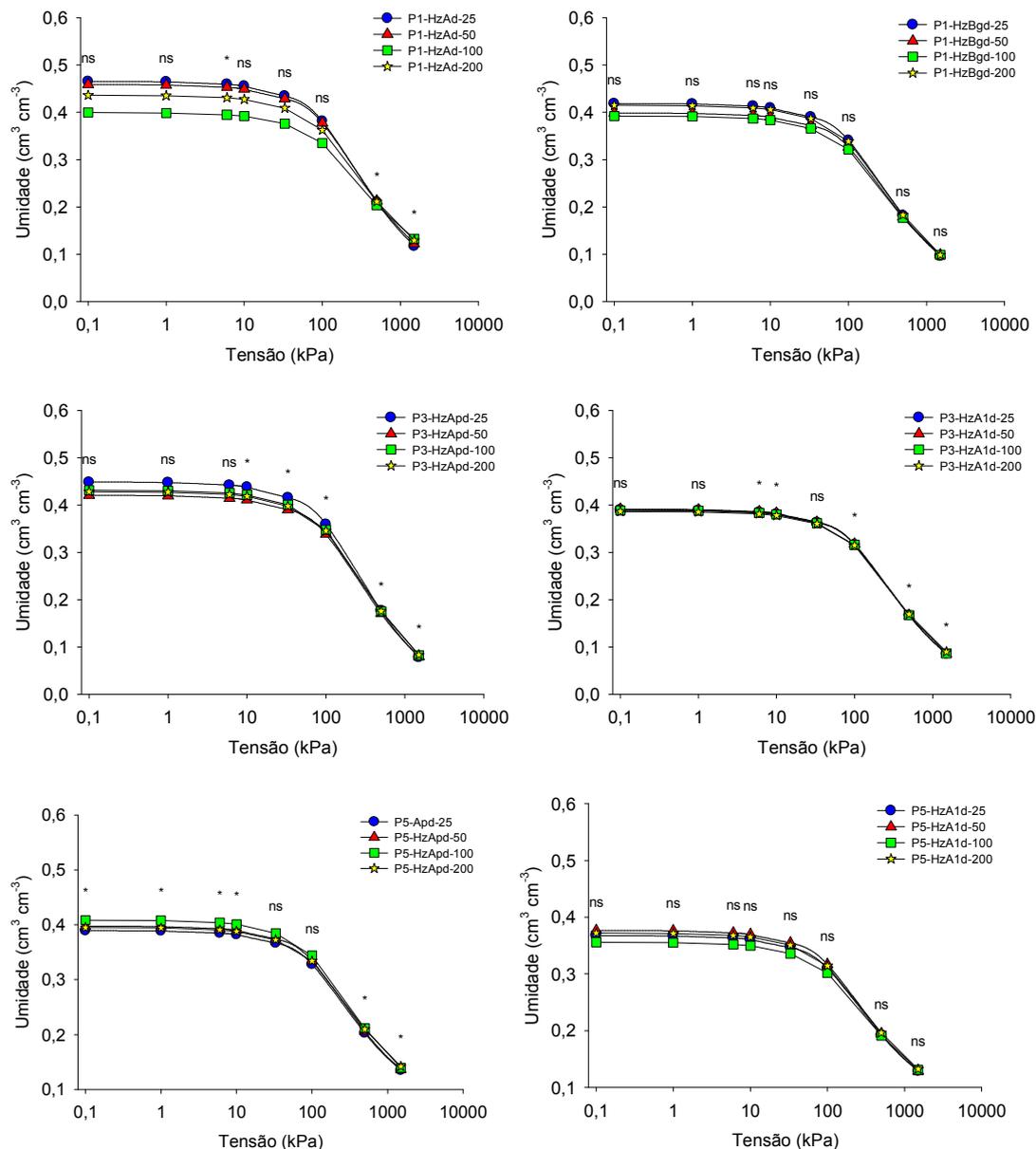


Figura 12 – Curva de retenção de água depois de aplicadas as cargas de 25, 50, 100 e 200 kPa nos horizontes superficiais dos perfis 1 (Gleissolo Háplico) 3 e 5 (Argissolo Vermelho Distrófico).

A compactação do solo geralmente reduz a quantidade de água disponível (AD) para as plantas e quatro fatores são responsáveis por este efeito. Primeiramente, a compactação reduz os macroporos. À medida que as partículas de argila são aproximadas, pelo processo de compactação, a resistência do solo à penetração pode tornar-se superior a 2000 kPa, o nível considerado limitante para a penetração radicular (REINERT et al; 2008, REICHERT et al., 2007). Em segundo lugar, a redução na macroporosidade geralmente significa que menos água é retida

na CC. Terceiro, com a redução da quantidade de macroporos, haverá menor porosidade de aeração, quando o solo estiver próximo da CC. Quarto, haverá um aumento da microporosidade devido ao rearranjo pelo processo de compactação, isso resulta em maior armazenamento de água nas maiores tensões, próximas ao ponto de murcha permanente (PMP). Segundo Libardi (2005) e Hillel (1998), sob elevados potenciais, a retenção é fortemente influenciada pela porosidade total que diminui com o aumento na densidade, enquanto sob baixos potenciais, a retenção é controlada pela granulometria e volume de microporos, que tem correlação positiva com a densidade do solo. No entanto, Hillel (1998) destaca que os maiores conteúdos de água retidos em elevados potenciais não resultam em benefício para as plantas, devido à retenção da água com maior tensão, a qual permanece indisponível para as plantas.

Os resultados demonstram que a aplicação de níveis crescentes de estresse mecânico nos ensaios de compressão unidimensional, sob elevadas pressões (100 e 200 kPa), as quais se situam frequentemente acima das pressões historicamente submetidas ao solo, produzem efeitos negativos sobre a estrutura do solo com reflexos no espaço poroso, resultando em modificações no armazenamento de água e permeabilidade ao ar.

Portanto, com a redução dos macroporos devido à deformação do solo pela aplicação de uma carga elevada, há diminuição da permeabilidade ao ar que é fortemente influenciada pelo volume de macroporos. Isso indica que variações ocorridas no espaço poroso do solo, em função do rearranjo da estrutura da matriz sólida, podem alterar profundamente a proporção entre a água e o ar nesse espaço. O resultado é um aumento do conteúdo de água retido em grandes tensões associado à redução da permeabilidade ao ar em função da redução dos macroporos e da maior retenção de água em microporos que surgem a partir da deformação física. Essa deformação se deve à uma reorganização das partículas finas como as argilas, o silte e a matéria orgânica, diminuindo o espaço antes ocupado pelo ar. Com a maior retenção de água observa-se uma alteração da distribuição do espaço aéreo, o qual passa a apresentar maior volume preenchido com água e um aumento da tortuosidade e/ou da descontinuidade dos mesmos, refletindo em decréscimo da permeabilidade ao ar à medida que se incrementa a aplicação de cargas a partir da tensão de pré-consolidação.

O aumento da retenção de água no solo é de certa forma benéfico e

desejado, mas o aumento da retenção de água em elevadas tensões não implica em maior disponibilidade de água para as plantas, além de apresentar efeitos deletérios na qualidade do espaço ocupado por ar no solo. Porém, isso vem acompanhado do aumento na densidade do solo, que pode refletir em maior resistência à penetração das raízes, característica muito importante para solos arenosos (SECCO et al., 2004; COLLARES et al., 2006).

## 7 CONCLUSÕES

Os Gleissolos apresentaram maior capacidade de suporte e são menos suscetíveis à compactação do que os Argissolos. Dentre os Gleissolos, o perfil 2 (várzea - cota mais alta) apresentou menor susceptibilidade a compactação do que o perfil 1 (várzea – cota mais baixa) e dentre os Argissolos a susceptibilidade à compactação do perfil 5 (topo) é menor do que nos perfis 3 (encosta inferior) e 4 (encosta superior).

Os horizontes mais profundos (BA, Bt1, Bt2 e Cg) apresentaram maior pressão de pré consolidação ( $\sigma_p$ ) e capacidade de suporte que os horizontes superficiais (A, Ap, A1, A2 e AB) pois apresentam maior quantidade de argila.

Após aplicação das cargas de 100 e 200 kPa, os perfis 1,2 (várzea), 4 (encosta superior) e 5 (topo) apresentaram menores valores de permeabilidade, resultado da mudança de estrutura da amostra, diminuindo a macroporosidade e aumentando a microporosidade.

O processo de compactação da amostra reduziu a macroporosidade e a porosidade total promovendo um maior armazenamento de água nas maiores tensões aplicadas.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 12007. **Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro, 1990. 13p.

ABU-HAMDEH, N. H.; REEDER, R. C. Measuring and predicting stress distribution under tractive devices in undisturbed soils. **Biosystems Engineering**, v. 85, p. 493–502, 2003.

ARCHER, J.R.; SMITH, P.D. The relation between bulk density, available water capacity, and air capacity of soils. **Journal of Soil Science**, London, v.23, n.4, p.475-480, 1972.

BALL, B. C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (ed.). **Methods of soil analysis**, Part 4, 5th ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 2002, p. 1141-1158.

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.

BERTOL, I.; SANTOS, J.C.P. Uso do solo e propriedades físico-hídricas no Planalto Catarinense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.2, p.263-267, fev. 1995.

BEUTLER, A. N. et al. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 829-834, jul./set. 2002.

BLANCO-CANQUI, H., LAL, R. & SHIPITALO, M.J. . Aggregate disintegration and wettability for long-term management systems in the northern Appalachians. **Soil Science Society of America Journal**, Madison v. 71, n. 3 759–765. 2007.

BOCQUIER, G. **Génèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad: interprétation byogéodynamique**. Paris, ORSTOM, 1973. 350p. (Mémoires ORSTOM, 62).

BORTOLUZZI, E. C.; SILVA, V. R. da; PETRY, C.; CECCHETTI, D.; Porosidade e retenção de água em um Argissolo sob manejos convencional e direto submetido a compressões unidimensionais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v 32, p.1447-1457, 2008.

BOULAINÉ, J. **Projet de taxonomie pédologique**. Tome I. Grignon: Multicopie, 1978. 20 p.

BOULAINÉ, J. **Remarques sur quelques notions élémentaires de la pédologie**. 1. Pédon, Profil et Sol. 2. Les Horizons. 3. La variabilité latérale des sols. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 19:19-41, 1982.

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

BRAIDA, J. A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 477-485, mar./abr., 2008.

BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 131-139, fev., 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão Pedológica. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife, PE, (**DNPEA. Boletim Técnico, 30**), 1973. 431 p.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n.1, p.183-188, 1995.

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

CASSOL, JR. I. et al. Diagnóstico sócio-econômico do entorno de Santa Maria – RS. Disponível em : <[http://.../sri/CooperaçãoInternacional/Docs\\_CoopItaliana/](http://.../sri/CooperaçãoInternacional/Docs_CoopItaliana/)>. Acesso em 10 de set, 2008.

CASTRO, S.S.; COOPER, M.; SANTOS, M.C. & VIDAL TORRADO, P. Micromorfologia do solo: Bases e aplicações. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S. & ALVAREZ V., V.H., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3. p.107-164.

CAVENAGE, A.; MORAES, M.L.T.; ALVES, M.C.; CARVALHO, M.A.C.; FREITAS, M.L.M. & BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um latossolo vermelho-escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 997-1003, 1999.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, p.1663-1674, 2006.

COREY, A. T. Air Permeability. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis – Part I – Physical and Mineralogical Methods**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 1986, p. 1121-1136.

CORSINI, P.C.; FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, p.289-298, 1999

DALAL, R.C. & CHAN, K.Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt. **Australian Journal of Soil Research**, Wagga Wagga, v.39, p. 435-464, 2001.

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

DEMATTÊ, J. L. I. MARCONI, A. A drenagem na mineralogia de solos desenvolvidos de diabásico em Piracicaba (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas. v. 15, p. 1-8, 1991.

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

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J.. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure for soil compression curves. **Soil technology East Lansing**, v.8, p.131-151, 1995.

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

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., H. V. & CHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1. p. 55-94, 2000.

DOURADO NETO, D. et al. Programa computacional para modelagem de curvas de retenção de água no solo (SWRC, versão 2.00). **Scientia Agricola, Piracicaba**, v. 57, n. 1, p. 191-192, jan./mar., 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília - DF: EMBRAPA - Embrapa Produção de Informação. 412 p., 1999.

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

ETANA, A.; COMIA, R.A. & HÅKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil and Tillage Research**, 44:13-21, 1997.

FONTANELA, E. **Qualidade físico-hídrica de um Latossolo Vermelho 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.

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.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research**, Washington, v. 15, n. 6, p. 1633-1635, nov./dec. 1979.

HAJABBASI, M.A.; JALALIAN, A. & KARIMZADEH, H.R. Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran. **Plant Soil**, 190:301-308, 1997.

HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W.R.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3-4, p. 239-282, jun., 1988.

HÅKANSSON, I. **Machinery-induced compaction of arable soils: incidence, consequences, counter-measures**. Uppsala, Sweden, Dept. of Soil Sciences, Division of Soil Management. 2005. 153p.

HARTEMINK, A.E. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. **Geoderma**, 85:283-306, 1998.

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

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press. 1980. 413 p.

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

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.
- HORN, R.; LEBERT, M. 1994. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; OUWERKERT, C. van (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier. p. 45-69
- HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. & Van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research.**, 35:23-36, 1995.
- HORN, R. & ROSTEK, J. Subsoil compaction processes – State of knowledge. In: HORN, R.; van den AKKER, J.J.H. & ARVIDSSON, J., eds. **Subsoil compaction – Distribution, processes and consequences**. Reiskirchen, Catena Verlag, p.44-54. 2000.
- HORN, R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulical processes. **Geoderma**, v. 116, p. 77-88, 2003
- HUGGETT, R .J. Soil landscape systems: a model of soil Genesis. **Geoderma**, v. 13, p.1-22, 1975.
- IMHOFF, S.; PIRES DA S. A.; JUNIOR, D. M. de S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 11-18, jan./mar., 2001.
- IMHOFF, S. C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 104p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- IMHOFF, S.; SILVA, A. P. da; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n.1, p. 17–24, jan./feb., 2004.
- JENNY, H. **Factors of soil formation**: a system of quantitative pedology. New York; London: McGraw Hill Book Company, 1941. 281p.
- KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 221-227, mar./abr. 2007.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, p.395-401, 1995.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed). **Methods of soil analysis – physical and mineralogical methods**. Madison: America Society of Agronomy, 1986. p. 635-660.

KONDO, M. K. **Compressibilidade de três Latossolos sobre diferentes usos**. Lavras, 1998. 95p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Lavras.

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

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.

LIMA, C. L. E. et al. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1765-1772, nov./dez., 2006

MENTGES, M. I. **Implicações do uso do nas propriedades físico-hídricas e mecânicas de um argissolo vermelho-amarelo e de um gleissolo háplico**. 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MOSADDEGHI, M.R. et al. 2003. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, 70: 53-64.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, **Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais**, 1989. 442p.

OLIVEIRA, G. C. et al. Compressibilidade de um Latossolo vermelho argiloso deacordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciênciado Solo**, Viçosa, v. 27, p. 773-781, 2003.

ONWUALU, A.P.; ANAZODO, U.G.N. Soil compaction effects on maize production under various tillage methods in a derived savannah zone of Nigeria. **Soil & Tillage Research**, v.14, p.99-114, 1989.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo: com problemas resolvidos**. Curitiba. 446 p. 1996.

REEVE, M.J.; SMITH, P.D.; THOMASSON, A.J. The effect of density on water retention properties of field soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.24, p.355-367, 1973.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**, volume 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 49-134, 2007.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v.102, p.242-254, 2009.

REINERT, D.J.; ROBAINA, A. D.; REICHERT, J.M. COMPRESS – Software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 29., 2003. Anais. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2003. CD-ROM.

REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, 36:193-1935, 2006.

REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1805-1816, 2008.

RHEINHEIMER D. S. dos, et al. Comparação de métodos de determinação de carbono orgânico total no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 435-440, jan./fev. 2008.

ROCHA, L.C.; CARVALHO, V.L.M. Gênese e evolução dos solos na bacia do Córrego do Quebra, Gouveia - MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2003. 1 CD-ROM.

ROSA, D. P. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 122f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; ROS, C.O. da. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.797-804, 2004.

SEQUINATTO, L. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação**. 2010. 158 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society America Journal**, Madison, 61:877-883, 1997.

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

SILVA, V. R. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho amarelo distrófico arênico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 1-8, jan./mar., 2002b.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho amarelo distrófico arênico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 9-15, jan./mar., 2002a.

SILVA, M. A. S. et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 544-552, 2005.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 921-930, nov./dez., 2006.

SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. (ed). **Soil compaction in crop production**. Netherlands, p.1-21, 1994.

STRECK, E. V. et al. Solos do Rio Grande do Sul. 2. ed. .Porto Alegre: **EMATER-ASCAR**, 2008. 222 p.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 2004, 15. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004a. CD-ROM.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Areia total de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 2004, 15. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004b. CD-ROM.

SAS Institute. **SAS Statistical Package**. Version 5.1.26, SAS Inc., Cary, 1997.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Estimativa da susceptibilidade a compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 963-973, maio/jun., 2008

TAYLOR, S. A. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 14, n. 1, p. 55-61, jan./feb. 1950.

THOMASSON, A.J. Towards objective classification of soil structure. **Journal Soil Science.**, 29:38-46, 1978.

TRIANAFILIS, J.; WARD, W.T.; ODEH, I.O.A. & McBRATNEY, A.B. Creation and interpolation of continuous soil layer classes in the lower Namoi Valley. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 65:403-413, 2001.

UHDE, L. T.; **Sistema Pedológico em um ambiente antropizado da Depressão Central do RS**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2009. 226p. (Tese de Doutorado).

Van GENUCHTEN, M. T. A. Closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of na Oxisol from southern Brazil, as affected by long – term tillage systems. **Soil and Tillage Research.**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 104-113, jan., 2007.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und deformationen in waldböden durch ernteverfahren**. 2005. 107 p. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, Kiel.