

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

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE SOLO FRANCO  
ARENOSO SOB DISTINTOS SISTEMAS DE  
PREPARO, TRÁFEGO MECANIZADO E RESÍDUOS  
VEGETAIS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**André Anibal Brandt**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2005**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE SOLO FRANCO  
ARENOSO SOB DISTINTOS SISTEMAS DE PREPARO,  
TRÁFEGO MECANIZADO E RESÍDUOS VEGETAIS**

por

**André Anibal Brandt**

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

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2005**

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 MECÂNICAS DE SOLO FRANCO ARENOSO  
SOB DISTINTOS SISTEMAS DE PREPARO, TRÁFEGO  
MECANIZADO E RESÍDUOS VEGETAIS**

elaborada por  
**André Anibal Brandt**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

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

---

**Oswaldo Ryohei Kato, Dr. (EMBRAPA)**

---

**José Mario Doleys Soares, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 18 de fevereiro de 2005

## **AGRADECIMENTO**

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e ao Departamento de Solos, que possibilitaram a realização do presente trabalho.

À CAPES, pela importante ajuda financeira, pela concessão da bolsa.

Ao professor orientador José Miguel Reichert e aos demais integrantes da comissão de orientação, pela dedicação e amizade.

Ao professor. José Mário Doleys Soares e aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil, pelo empréstimo de equipamentos para a realização deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Solos, e ao secretário do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, que sempre nos ajudaram, compartilhando as suas experiências.

Agradeço, àqueles bolsistas de iniciação científica e colaboradores que não importando a dimensão ou a importância do trabalho, o realizaram de forma brilhante e com qualidade.

Aos colegas de curso, especialmente ao Clóvis Moisés Priebe Berval, cuja amizade tornou mais fácil suportar esta jornada e a distância da família.

Aos amigos de todas as horas, alguns geograficamente mais distantes outros nem tanto, o meu muito obrigado.

Agradeço o apoio da família que foi muito importante para a realização deste trabalho.

E em especial agradeço à minha namorada Jocleita Peruzzo Ferrareze, pelo incentivo, compreensão, apoio e amor em todos os momentos, especialmente aqueles em que não pude estar junto dela.

## SUMÁRIO

|  | PÁGINA |
|--|--------|
| AGRADECIMENTO.....   | 3      |
| SUMÁRIO.....   | 4      |
| LISTA DE TABELAS .....   | 6      |
| LISTA DE FIGURAS .....   | 8      |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....   | 11     |
| RESUMO.....  | 13     |
| ABSTRACT .....   | 14     |
| 1. INTRODUÇÃO GERAL.....   | 15     |
| 2. Hipótese do trabalho .....  | 16     |
| 2.1. Objetivos.....  | 16     |
| 3. Estudo I: CAPACIDADE DE SUPORTE DO SOLO COM<br>AVALIAÇÕES DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO,<br>COMPRESSIBILIDADE E CISALHAMENTO DO SOLO..... | 17     |
| 3.1. Introdução.....   | 17     |
| 3.1.1. Compressibilidade do solo .....   | 17     |
| 3.1.2. Cisalhamento do solo.....   | 20     |
| 3.1.3. Resistência à Penetração .....  | 24     |
| 3.2. Material e Métodos .....  | 25     |
| 3.2.1. Solo.....   | 25     |
| 3.2.2. Tratamentos .....   | 26     |
| 3.2.3. Especificações das máquinas agrícolas .....   | 26     |
| 3.2.4. Determinações.....  | 28     |
| 3.3. Análise estatística .....   | 30     |
| 3.4. Resultados e Discussão.....   | 30     |
| 3.4.1. Compressibilidade.....  | 30     |
| 3.4.2. Cisalhamento .....  | 39     |
| 3.4.3. Curva característica de água no solo.....   | 42     |
| 3.4.4. Densidade e porosidade do solo.....   | 44     |
| 3.4.5. Resistência à penetração.....   | 45     |

|  |    |
|--|----|
| 3.5. Conclusões.....   | 53 |
| 4. Estudo II. EFEITO DE PALHA DE MILHO NA SUPERFÍCIE DO SOLO NO TRÁFEGO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS E COMPACTAÇÃO MÁXIMA E RELATIVA DO SOLO COM ENSAIO DE PROCTOR..... | 54 |
| 4.1. Introdução.....   | 54 |
| 4.1.1. Ensaio de Proctor.....  | 54 |
| 4.1.2. Interface solo máquina.....   | 56 |
| 4.1.3. Determinação da área de contato e pressão aplicada.....   | 58 |
| 4.2. Material e Métodos.....   | 59 |
| 4.2.1. Solo.....   | 59 |
| 4.2.2. Preparo da área no campo.....   | 60 |
| 4.2.3. Determinação da área de contato pneu-solo no campo.....   | 63 |
| 4.2.4. Dados técnicos do trator.....   | 64 |
| 4.2.5. Ensaio de Proctor.....  | 65 |
| 4.2.6. Compressibilidade.....  | 68 |
| 4.2.7. Cisalhamento.....   | 68 |
| 4.2.8. Densidade do solo.....  | 69 |
| 4.3. Análise estatística.....  | 70 |
| 4.4. Resultados e Discussão.....   | 70 |
| 4.4.1. Proctor Alterado.....   | 70 |
| 4.4.2. Compressibilidade.....  | 73 |
| 4.4.3. Resistência ao cisalhamento.....  | 74 |
| 4.4.4. Resistência à penetração.....   | 76 |
| 4.4.5. Densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total.....   | 76 |
| 4.5. Conclusões.....   | 78 |
| 5. Conclusões Gerais.....  | 78 |
| 6. Bibliografia Citada.....  | 79 |
| 7. Anexos.....   | 86 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Características do trator utilizado nos ensaios com especificações de áreas de contato e pressões exercidas. ....  | 26 |
| Tabela 2 – Grau de saturação para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC01 (escarificado em 2001), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004), PC03 (preparo convencional 2003) e PC04 (preparo convencional 2004), em três tensões e duas profundidades. ..                       | 33 |
| Tabela 3 – Coeficiente de compressibilidade (Cc) para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC01 (escarificado em 2001), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004), PC03 (preparo convencional 2003) e PC04 (preparo convencional 2004), em três tensões e duas profundidades. .... | 35 |
| Tabela 4 – Coeficiente de compressibilidade (Cc) para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades e quatro tensões. ....   | 37 |
| Tabela 5 – Grau de saturação para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades e quatro tensões. ....   | 39 |
| Tabela 6– Parâmetros de cisalhamento direto e potencial de tração dos tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades. ....   | 42 |
| Tabela 7 – Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades. ....   | 44 |
| Tabela 8 – Características técnicas do trator utilizado nos ensaios com especificações de áreas de contato e pressões exercidas sobre o solo.   | 65 |
| Tabela 9 – Densidade máxima com diferentes níveis de energia no ensaio de Proctor Alterado, sem palha e 12 Mg ha <sup>-1</sup> de palha. ....   | 71 |

|   |    |
|---|----|
| Tabela 10 – Umidade crítica com diferentes níveis de energia no ensaio de Proctor Alterado, sem palha e 12 Mg ha <sup>-1</sup> de palha. ....   | 72 |
| Tabela 11 – Densidade do solo (Ds), energia equivalente (Ee) e energia dissipada (Edi) em função da energia de compactação (Ec) e da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio Proctor Alterado..... | 72 |
| Tabela 12 – Pressão de pré-consolidação para o solo submetido a três níveis de tráfego, em quatro profundidades, determinada.....   | 73 |
| Tabela 13 - Coeficiente de compressibilidade (Cc) para o solo submetido a três níveis de tráfego e quatro profundidades. ....   | 74 |
| Tabela 14– Densidade, porosidade total, macro e microporosidade, sob diferente níveis de tráfego em diferentes profundidades.....   | 78 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Ilustração para a determinação do coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ) e da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), método de Casagrande. ....  | 19 |
| Figura 2 – Comportamento de diferentes tipos de solo a coesão e tensão cisalhante (Ashburner & Sims, 1984). ....   | 23 |
| Figura 3 – Perfil do solo após a lavração .....  | 27 |
| Figura 4 – Perfil do solo após a escarificação. ....   | 27 |
| Figura 5 – Pressão de pré-consolidação em função da tensão para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC01 (escarificado em 2001), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004), PC03 (preparo convencional 2003) e PC04 (preparo convencional 2004), em três tensões e duas profundidades. As barras verticais representam o valor de DMS (5%), onde ns= não significativo e *= significativo a 5%. .... | 31 |
| Figura 6 – Pressão de pré-consolidação em função do grau de saturação para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC01 (escarificado em 2001), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004), PC03 (preparo convencional 2003) e PC04 (preparo convencional 2004), em três tensões e duas profundidades. ....   | 34 |
| Figura 7 – Pressão de pré-consolidação em função da tensão para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades e quatro tensões. As barras verticais representam o valor de DMS (5%), onde ns= não significativo e *= significativo a 5%. ....   | 36 |
| Figura 8 – Pressão de pré-consolidação em função do grau de saturação para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades e quatro tensões. ....   | 38 |
| Figura 9 – Envoltórias de cisalhamento para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades. ....   | 40 |
| Figura 10 – Curva de retenção de água nas duas profundidades para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04  |    |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
|           | (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades e quinze tensões.....   | 43 |
| Figura 11 | - Resistência à penetração, a) e umidade volumétrica, b) para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004). .....   | 45 |
| Figura 12 | - Pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) em função da resistência à penetração (RP) para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades. ....  | 46 |
| Figura 13 | - Relação da resistência do solo à penetração estimada pelo modelo de Busscher (1990) e resistência do solo medida, para os tratamentos a) PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004); b) todos os tratamentos com um ajuste. ....   | 48 |
| Figura 14 | - Resistência à penetração (RP) estimada representada pela malha e RP observada representada pelos pontos em função da densidade e umidade do solo, para os tratamentos; a) ESC04 (escarificado em 2004); b) PC04 (preparo convencional 2004); c) ESC02 (escarificado em 2002); d) PD13 (plantio direto 13 anos); e) profundidade 0-2 cm; f) profundidade 10-12 cm; e f) todos os tratamentos. ....                      | 49 |
| Figura 15 | - Relação da pressão de pré-consolidação do solo estimada pelo modelo de Busscher (1990) e pré-consolidação do solo medida, para os tratamentos a) PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004); b) todos os tratamentos com um ajuste.....  | 51 |
| Figura 16 | - Pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) estimada representada pela malha e $\sigma_p$ observada representada pelos pontos em função da densidade e umidade do solo, para os tratamentos; a) ESC04 (escarificado em 2004); b) PC04 (preparo convencional 2004); c) ESC02 (escarificado em 2002); d) PD13 (plantio direto 13 anos); e) profundidade 0-2 cm; f) profundidade 10-12 cm; e f) todos os tratamentos. .... | 52 |
| Figura 17 | - Áreas de contato do pneu: (a) diagonal (elipse); (b) radial (retangular) e (c) diagonal largo. (Neujahr, 1998). ....   | 57 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 18 – Relação entre carregamento por pneu e pressão de insuflagem. (Konstantinovic, 2003).   | 58 |
| Figura 19 – Relação entre carregamento por pneu e pressão de insuflação. Institut Landtechnik. Bonn.   | 59 |
| Figura 20 - Limpeza da área para ensaio (a), e resistência à penetração na área, no rastro e deixado pela colhedora e fora dele (b).                                     | 60 |
| Figura 21 – Coleta das amostras de compressibilidade e densidade antes da escarificação.   | 61 |
| Figura 22 - Escarificação da área para desestruturação do solo (a) e aspecto da área após a escarificação (b).   | 61 |
| Figura 23 - Detalhe da palha de milho sobre as parcelas (a) e do tráfego do trator sobre as parcelas (nível de 2 passadas).  | 62 |
| Figura 24 - Detalhe da coleta das amostras de compressibilidade e de cisalhamento (a), e do aspecto da área após o tráfego (b).  | 63 |
| Figura 25 – Determinação da área de contato pneu-solo, detalhe do pneu traseiro e das tábuas (a), e a área de contato demarcada no solo e medição do pneu dianteiro (b). | 64 |
| Figura 26 – Distribuição do peso em um trator de rodas (Adaptado de Paccola, 1996).  | 65 |
| Figura 27 – Coleta do solo a campo profundidade de 0 a 10 cm (a) e secagem do solo ao ar para a realização do ensaio de Proctor (b).                                     | 66 |
| Figura 28 – Medição com o paquímetro para o cálculo do volume (a) e ensaio de proctor alterado com a superfície irregular (b).   | 67 |
| Figura 29 – Proctor alterado com o disco metálico (a) e o disco metálico com o soquete encaixado no centro (b).  | 67 |
| Figura 30 – Prensa de cisalhamento direto do laboratório de Mecânica do Solo.  | 69 |
| Figura 31 – Curvas do ensaio de Proctor Alterado, sem palha e com 12 Mg ha <sup>-1</sup> de palha de milho, com 3 níveis de energia.                                     | 71 |
| Figura 32 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo com dois níveis de tráfego.   | 75 |
| Figura 33 – Resistência à penetração e umidade gravimétrica nos diferentes níveis de tráfego com e sem palha nas diferentes profundidades.                               | 77 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|            |  |
|------------|--|
| $\phi$     | Ângulo de atrito interno.                                  |
| $\mu$      | Coefficiente de atrito.                                    |
| $\tau$     | Tensão de cisalhamento.                                    |
| $\sigma$   | Tensão normal efetiva.                                     |
| $\theta$   | Umidade volumétrica do solo.                               |
| $\sigma_p$ | Pressão de pré-consolidação.                               |
| A          | Área de contato pneu-solo.                                 |
| b          | Base maior   |
| c          | Coesão do solo.  |
| Cc         | Coefficiente de compressibilidade do solo.                 |
| Dp         | Densidade de partículas                                    |
| Ds         | Densidade do solo.   |
| Dt         | Diâmetro total do pneu.                                    |
| Ec         | Energia de compactação                                     |
| ESC01      | Escarificado em 2001                                       |
| ESC02      | Escarificado em 2002                                       |
| ESC04      | Escarificado em 2004                                       |
| F          | Tensão máxima de cisalhamento ou potencial de tração.      |
| Ff         | Força tangencial a superfície de atrito.                   |
| Gs         | Grau de saturação  |
| h          | Base menor   |
| L          | Altura de queda do soquete                                 |
| L          | Largura do pneu.   |
| Mp         | Macroporosidade do solo                                    |
| mp         | Microporosidade do solo                                    |
| Mss        | Massa de solo seco   |
| Mss        | Massa de solo seco em estufa a 105°                        |
| Msu60      | Massa de solo úmido após drenagem a 60 cm de coluna d'água |
| N          | Força normal, perpendicular a superfície.                  |
| N          | Número de camadas  |

|      |                              |
|------|------------------------------|
| N    | Número de golpes por camada  |
| P    | Peso do soquete              |
| PC03 | Plantio convencional em 2003 |
| PC04 | Plantio convencional em 2004 |
| PD13 | Plantio direto à treze anos  |
| Pt   | Porosidade total do solo     |
| RP   | Resistência à penetração.    |
| V    | Volume do cilindro           |

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.

### **PROPRIEDADES MECÂNICAS DE SOLO FRANCO ARENOSO SOB DISTINTOS SISTEMAS DE PREPARO, TRÁFEGO MECANIZADO E RESÍDUOS VEGETAIS**

Autor: André Anibal Brandt

Orientador: José Miguel Reichert

Santa Maria, 18 de Fevereiro de 2004

A mobilização excessiva do solo provoca danos à sua estrutura, problema esse que foi eliminado com o sistema de plantio direto, onde a mobilização ocorre só na linha de semeadura. Porém, considerando-se que nos últimos anos houve um aumento do uso dos solos agrícolas e da mecanização, tem-se maior problema de compactação nas camadas superficiais do solo no sistema de plantio direto. O presente estudo teve o objetivo de determinar o efeito do estado de compactação o qual foi realizado num Argissolo Vermelho-Amarelo, onde no primeiro estudo coletou-se amostras em duas profundidades para a realização dos ensaios, e no segundo estudo coletou-se amostras em quatro profundidades. No primeiro estudo, realizaram-se ensaios de compressibilidade, cisalhamento, resistência à penetração, curva de retenção de água e densidade do solo, com o objetivo de verificar se os diferentes manejos do solo alterariam as propriedades físicas do solo avaliadas. Os resultados mostraram que o revolvimento do solo não teve um efeito significativo nas propriedades físicas avaliadas. O segundo estudo teve como objetivo avaliar o efeito da palha de milho na redução da compactação do solo. Realizaram-se ensaios a campo e laboratório para verificar a hipótese de que a palha de milho absorve energia com o tráfego de máquinas agrícolas. Os ensaios de laboratório mostraram que a palha teve efeito significativo na redução da compactação do solo, mas isso não ocorreu quando o solo foi submetido ao tráfego de máquinas agrícolas.

## **ABSTRACT**

Master Science Dissertation  
Graduate Program in Agricultural Engineering  
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

### **MECHANICAL PROPERTIES OF A SANDY LOAM SOIL AFFECTED BY TILLAGE STEMS MECHANICAL TRAFFIC AND SURFACE MULCH**

Author: André Anibal Brandt  
Advisor: José Miguel Reichert  
Santa Maria, February 18, 2005.

The excessive mobilization of the soil causes losses to its structure. This is eliminated with the no tillage system, where mobilization only occurs in the planting line. However, considering that lately there was an increase in the use of the agricultural soils and of the mechanization, compaction problem in the surface soil layer in the system of no tillage has increased. The study had the objective of determining the effect of the compaction state which was accomplished in a Hapludalf, where in the first study soil samples were collected at two depths for the accomplishment of the tests, and in the second study samples were collected in four depths. In the first study, we determined uniaxial compression, direct shearing trials, penetration resistance, water retention curves, and soil density with the objective of evaluating different soil tillage changes in the physical properties of the soil. The results showed that the soil tillage did not have a significant effect on the soil physical properties evaluated. The second study had as objective the evaluation of the effect of the corn straw in the reduction of soil compaction in the field and in laboratory to verify the supposition that the corn straw absorbs energy with the traffic of agricultural machines. The laboratory tests showed that straw has a significant effect in the reduction of the soil compaction, but that did not have an effect when the soil was submitted to the traffic of agricultural machines in the field.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A mecanização agrícola proporciona o desenvolvimento de uma agricultura mais intensiva, porém essa agricultura associada aos preparos conservacionistas está provocando mudanças significativas em algumas propriedades físicas do solo. Isso se deve ao tráfego contínuo de máquinas agrícolas, principalmente em dias de alta umidade do solo, provocando uma maior compactação.

Considerando-se que o tráfego de veículos em solo agrícola não obedece às mesmas teorias que regem o tráfego em terreno duro, uma série de interações ocorre na interface solo-máquina, pelo contato dos pneus agrícolas com a superfície do solo.

O tráfego de máquinas agrícolas, dotadas obviamente de pneus de tração, em solo não consolidado, leva ao patinamento, o qual aumenta consideravelmente com a umidade, provocando uma maior compactação do solo.

O solo em condições adversas ao tráfego apresenta resistência às cargas aplicadas pelos pneus, sem exceder o limite elástico e sem deformar-se permanentemente. A extensão dessas deformações depende das características físicas do solo e da pressão que o pneu exerce sobre o solo.

A adoção de práticas conservacionistas como o plantio direto, geralmente, ocorreu em solos que já apresentavam problemas físicos como a desagregação e a redução da matéria orgânica. Em solos com essas condições o rearranjo natural das partículas, com a falta de matéria orgânica, e o tráfego de máquinas e pisoteio causados pelos animais, causam uma compactação prejudicial ao desenvolvimento das plantas.

Várias pesquisas têm sido realizadas nas últimas décadas demonstrando a necessidade de diminuir o tráfego com máquinas sobre as áreas de cultivo por ocasião das operações necessárias para o preparo do solo. Um grande avanço foi à adoção do sistema de plantio direto, porém com o passar do tempo também nessas áreas começam a ocorrer problemas relacionados principalmente ao comportamento estrutural do solo, com a redução do espaço poroso o que causa implicações sobre a movimentação da água e gases no seu interior.

## **2. Hipótese do trabalho**

1. Diferentes preparos do solo que caracterizam distintos estados de compactação e umidades, impõem diferentes deformações plásticas e cisalhantes.

2. Esses estados imprimem distintas pressões de pré-consolidação, índice de compressão e coesão do solo.

3. A palha reduz o efeito da compactação do solo, quando este é submetido ao tráfego de máquinas agrícolas.

### **2.1. Objetivos**

O objetivo principal desse estudo foi determinar o efeito do estado de compactação em propriedades mecânicas do solo, com ênfase na compressibilidade, cisalhamento e resistência à penetração do solo.

Os objetivos específicos são: (i) estabelecer relações entre compactação com propriedades físicas e mecânicas do solo; (ii) testar uma alternativa para minimizar os efeitos negativos da compactação em solo.

Para alcançar os objetivos foram desenvolvidos dois estudos, os quais são relatados neste trabalho. O primeiro estudo foi baseado no ensaio de compressão uniaxial, no ensaio de cisalhamento direto e na pressão de pré-consolidação com base na resistência à penetração do solo, densidade do solo, curva característica e porosidade.

O segundo foi baseado no efeito da palha de milho na dissipação de energia transmitida para o solo pelas máquinas agrícolas nas operações de manejo, e ensaio de Proctor para a determinação da compactação máxima e relativa do solo.

### **3. Estudo I: CAPACIDADE DE SUPORTE DO SOLO COM AVALIAÇÕES DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO, COMPRESSIBILIDADE E CISALHAMENTO DO SOLO.**

#### **3.1. Introdução**

##### **3.1.1. Compressibilidade do solo**

A mobilização excessiva do solo provoca danos à sua estrutura, cujo problema foi eliminado com o sistema de plantio direto, onde a mobilização somente ocorre na linha de semeadura. Porém, considerando-se que nos últimos anos houve um aumento do uso dos solos agrícolas e da mecanização, tem-se maior problema de compactação nas camadas superficiais do solo no sistema de plantio direto.

Sempre que o solo sofre cargas externas, ocorre o processo de compactação, o que resulta em modificações na estrutura, com o aumento da densidade e da resistência do solo (Kondo & Dias Junior, 1999 a, b). A compactação afeta indiretamente a infiltração e condutividade da água, aeração e temperatura do solo. Segundo Stepniewski et al. (2002), essas alterações físicas, provocadas pela compactação, afetam o fluxo ou a concentração de água, oxigênio, dióxido de carbono, nutrientes e temperatura, o que pode limitar o crescimento e o desenvolvimento das plantas e causar problemas ambientais. Com isso, a compactação do solo tem provocado perda de produtividade, e levando-o à degradação parcial ou total.

Segundo Letey (1985), o ambiente físico do solo ao redor das raízes é caracterizado pela aeração, temperatura e resistência mecânica. Todas essas propriedades são modificadas pela compactação (Veen & Boone, 1990).

A infiltração de água no solo, a erosão, o déficit hídrico e nutricional das plantas e o desenvolvimento das raízes na superfície são afetados pela compactação (Rosolem et al., 1994; Moraes et al., 1995). A compactação também reduz a porosidade ou índice de vazios, modificando principalmente a distribuição do tamanho de poros (Whalley et al., 1995). Segundo Müller et al. (2001), quando o solo está compactado ocorre uma diminuição dos macroporos e aumenta a

densidade, assim aumentando a resistência ao crescimento das raízes, diminuindo o potencial de água e aumentando a falta de oxigênio no solo.

A intensidade do tráfego e as características da máquina, como a massa, a carga por eixo, o tipo de pneu e a pressão de inflação, são os principais fatores controladores da compactação dos solos agrícolas (Håkansson & Voorhees, 1997).

Outrossim, a compactação dos solos também é influenciada, pela matéria orgânica (Stone & Ekwue, 1995, Braida, 2004), teor de água (Reinert, 1990; Dias Junior, 1994; Kondo & Dias Junior, 1999 a, b) e densidade do solo (Reinert, 1990; Carpenedo, 1994; Silva et al, 2002 a, b)

Com o aumento do uso do solo e da mecanização nos últimos anos, é provável que os problemas de compactação sejam encontrados em todo o mundo (Soane & van Ouwerkerk, 1994).

Pode-se dizer que a compactação do solo é a resultante da soma do tempo de permanência, e peso da carga e o número de vezes que o solo é submetido a uma nova carga (Håkansson et al., 1988; Håkansson & Medvedev, 1995). Os componentes das máquinas podem ser adaptados, quando são entendidas as suas interações com o solo, como a pressão de inflação e o tipo de pneu, a carga por eixo e a intensidade de tráfego (Håkansson & Voorhees, 1997).

A capacidade de suporte dos solos varia com o tipo de solo, onde alguns têm uma maior capacidades de suporte, são facilmente manejados após períodos de chuvas e não têm limitações ao crescimento vegetal (Reinert, 1990). Os tipos de solos podem ser diferenciados através dos diferentes estados de agregação, ou seja, resistência interagregados e intra-agregados, textura, teor de água, matéria orgânica e a cargas que o solo já recebeu no passado (Horn & Lebert, 1994).

A curva de compressão do solo, a qual relaciona a deformação com a carga aplicada, permite estimar parâmetros que dêem auxílio para analisar a compactação do solo. Explicitamente a curva de compressão relaciona o índice de vazios com o logaritmo da pressão aplicada no solo. A partir dela obtém-se a pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), que é a estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (Dias Junior & Peirce, 1996), e o coeficiente de compressibilidade do solo ( $C_c$ ) que é um indicativo da suscetibilidade do solo à compactação (Larson et al., 1980; Holtz & Kovacs, 1981). Quando o solo sofre pressões menores que a  $\sigma_p$  ocorrem principalmente deformações elásticas, as quais são recuperáveis, mas quando se

aplicam pressões maiores ocorre uma deformação plástica, isto é, não recuperável (Holtz & Kovacs, 1981).

Assim, a  $\sigma_p$  reflete as tensões que o solo já foi submetido e o  $C_c$  revela a suscetibilidade do solo à compactação. O  $C_c$  indica a variação do índice de vazios do solo por unidade de pressão aplicada (log), onde o  $C_c$  é determinado pela inclinação da reta virgem do solo.

A determinação da  $\sigma_p$  e do  $C_c$  têm grande importância na adequação de máquinas que exerçam pressões menores sobre o solo e, se o valor da  $\sigma_p$  for superada, podemos estimar o quanto de compactação adicional ocorrerá (Kondo & Dias Junior, 1999b).

Através de ensaios de compressibilidade, pode-se verificar se os solos receberam pressões anteriores ou não. Essa relação é verificada na Figura 1 no qual quando o índice de vazios, a qualquer pressão aplicada comportar-se como uma reta, indica que qualquer carregamento resultará em deformação irreversível.

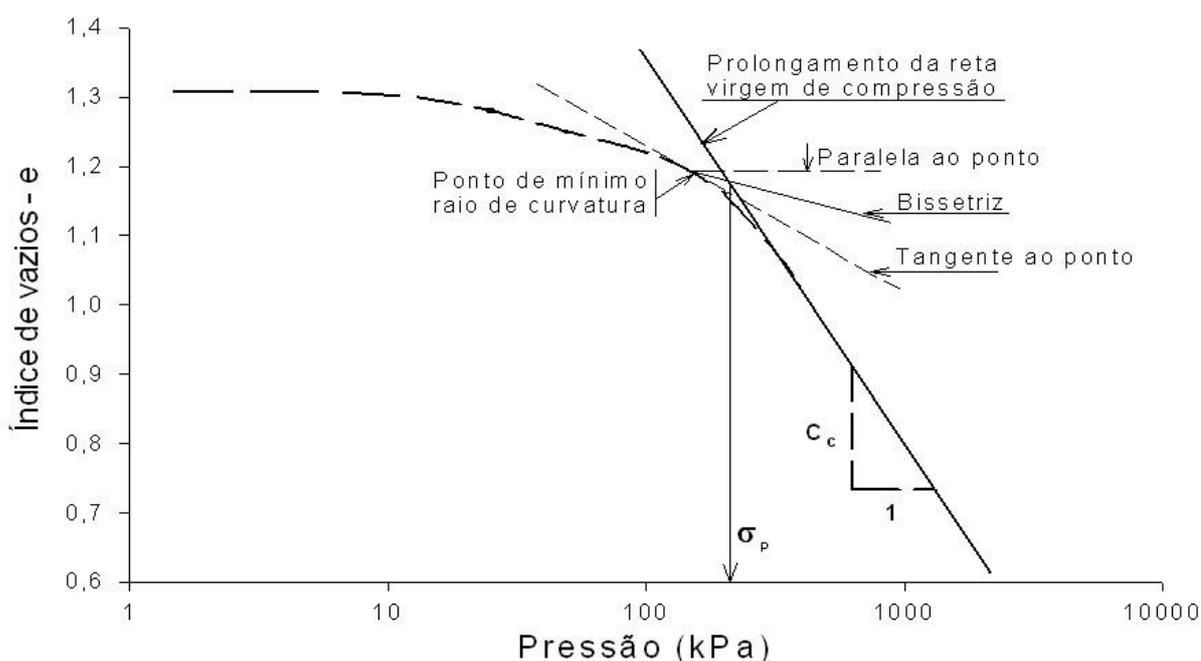


Figura 1 – Ilustração para a determinação do coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ) e da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), método de Casagrande.

A suscetibilidade do solo à compactação e a deformação estão relacionados com o estado inicial de compactação e com o teor de água no solo. Existe um conteúdo de água ótimo para ocorrer à compactação máxima em solos agrícolas (Salire et al., 1994; Dias Junior, 1994; Kondo & Dias Junior, 1999a, b; Braida 2004). Silva et al. (2002 a, b) encontraram maior associação da pressão de pré-

consolidação com a densidade do solo, associação mais fraca com o grau de saturação e menor relação com o sistema de manejo.

Quando seco, o solo é bastante coeso e apresenta uma grande resistência à compactação, mas à medida que o solo torna-se mais úmido ocorre a formação de um filme de água entre os agregados, o que facilita o deslocamento e o rearranjo das partículas sólidas da matriz do solo, o que diminui a resistência do solo à compactação (Hillel, 1980).

### 3.1.2. Cisalhamento do solo

A resistência ao cisalhamento pode ser definida como a resistência que o solo oferece a uma nova deformação. Quando forças externas agem sobre o solo, ele sofre deformações de vários modos, conforme as tensões, a distribuição, a magnitude e a orientação desta forças.

A resistência ao cisalhamento do solo é influenciada pela distribuição, forma e tamanho de partículas, estrutura, densidade, argilominerais, tipo e quantidade de cátions trocáveis e as forças de atração e repulsão entre as partículas (McCormack & Wilding, 1979). A resistência ao cisalhamento tende a aumentar quando no solo tem uma maior presença de partículas finas (Voorhees et al., 1978), e a textura influi fortemente na resistência ao cisalhamento (Horn et al., 1994).

Através do ensaio de cisalhamento direto obtém-se a linha de ruptura de Mohr Coulomb, com a qual é possível determinar a coesão e o ângulo de atrito de solos estruturados (Lebert & Horn, 1991).

A tensão de cisalhamento para solos não coesos é expressa pela equação adaptada pelo critério de Mohr, chamada reta de Coulomb, e é válida:

$$\tau = \sigma \cdot (\operatorname{tg} \phi)$$

Onde:

$\tau$  = tensão de cisalhamento (kPa),

$\sigma$  = tensão normal efetiva (kPa),

$\phi$  = ângulo de atrito interno ( $^{\circ}$ ).

Para solos com maiores teores de argila (coesivos), a equação para determinação da tensão de cisalhamento é expressa da seguinte forma:

$$\tau = c + \sigma \cdot \text{tg } \phi$$

Onde:

$\tau$  = tensão de cisalhamento (kPa),

$c$  = coesão do solo (resistência cisalhante de um solo na ausência de pressão) (kPa),

$\sigma$  = tensão normal efetiva (kPa),

$\phi$  = ângulo de atrito interno ( $^{\circ}$ ).

Existe uma força tangencial necessária para que seja vencido o atrito entre dois corpos, denominada de coeficiente de atrito. Essa força oposta ao deslocamento constitui-se de uma mistura de pressões de escorregamento e de rolamento entre partículas e agregados do solo.

O coeficiente de atrito é definido matematicamente da seguinte forma:

$$\mu = \frac{F_f}{N} = \text{tg } \phi$$

Onde:

$\mu$  = coeficiente de atrito (adimensional),

$F_f$  = força tangencial à superfície de atrito (N),

$N$  = força normal, perpendicular à superfície (N),

$\phi$  = ângulo de atrito interno ( $^{\circ}$ ).

O coeficiente de atrito interno ( $\mu$ ) é uma propriedade dinâmica, em função do relacionamento das forças que surgem durante o movimento de um corpo rígido do solo sobre outro. O  $\mu$  independe da força normal aplicada e da área de contato da superfície. O  $\mu$  em solos varia de 0,2 a 0,8, sendo um parâmetro fundamental no caso de dimensionamento de máquinas agrícolas que mobilizam o solo, na determinação do esforço de tração necessário.

Conforme Balastreire (1987) o cálculo do potencial de tração em mecanização agrícola pode ser feito utilizando-se a seguinte equação:

$$F = A \cdot (c + \sigma \cdot \text{tg } \phi)$$

Onde:

F = tensão máxima de cisalhamento ou potencial de tração (kN),

c = coesão do solo ( $\text{kN m}^{-2}$ ),

$\sigma$  = tensão normal efetiva ( $\text{kN m}^{-2}$ ),

$\phi$  = ângulo de atrito interno ( $^{\circ}$ ),

A = área de contato pneu - solo ( $\text{m}^2$ ).

Em solos argilosos quando úmidos, o potencial de tração pode aumentar em função do aumento da área de contato do pneu do trator, porque o fator coesão é multiplicado pela área de contato. Já em solos arenosos, onde se tem um maior ângulo de atrito interno, o aumento da tração ocorre com o aumento da carga sobre os pneus de tração do trator.

Segundo Vargas (1977), a origem da coesão pode ser devida a vários fatores, como o efeito de um cimento natural (argilas, óxidos) que aglutina as partículas de solo entre si; ligação entre partículas situada muito próxima entre si, originada pelo potencial atrativo de natureza molecular ou coloidal, e o efeito da tensão superficial da água nos capilares. Entende-se por coesão a resistência do solo ao cisalhamento, quando nele não existe nenhuma pressão externa atuando (Gaggero, 1998).

Na Figura 2 está representado o comportamento da tensão cisalhante para distintos solos, onde o solo arenoso e seco tem propriedades friccionais mas não tem coesão. O solo argiloso úmido plástico tem uma alta coesão porém não tem nenhuma fricção, e por fim o solo franco úmido, apresenta características friccionais e coesivas.

A resistência mecânica à penetração, associada à resistência ao cisalhamento, é a propriedade mecânica do solo que mais afeta o crescimento das raízes das plantas (Forsythe, 1975).

A resistência ao cisalhamento normalmente permite conhecer o comportamento do solo como a resistência dos agregados e da massa do solo, sendo que a primeira está determinada pelos fenômenos de coesão molecular e a resistência da massa depende da coesão superficial e do atrito entre as partículas.

O potencial de tração do solo pode ser determinado a partir do ensaio de cisalhamento direto e, desse modo, determinar os efeitos de diferentes manejos. As características de resistência ao cisalhamento determinam o desenvolvimento de

forças trator-solo ou implemento-solo, afetando a eficiência de tração (Stafford & Tanner, 1983).

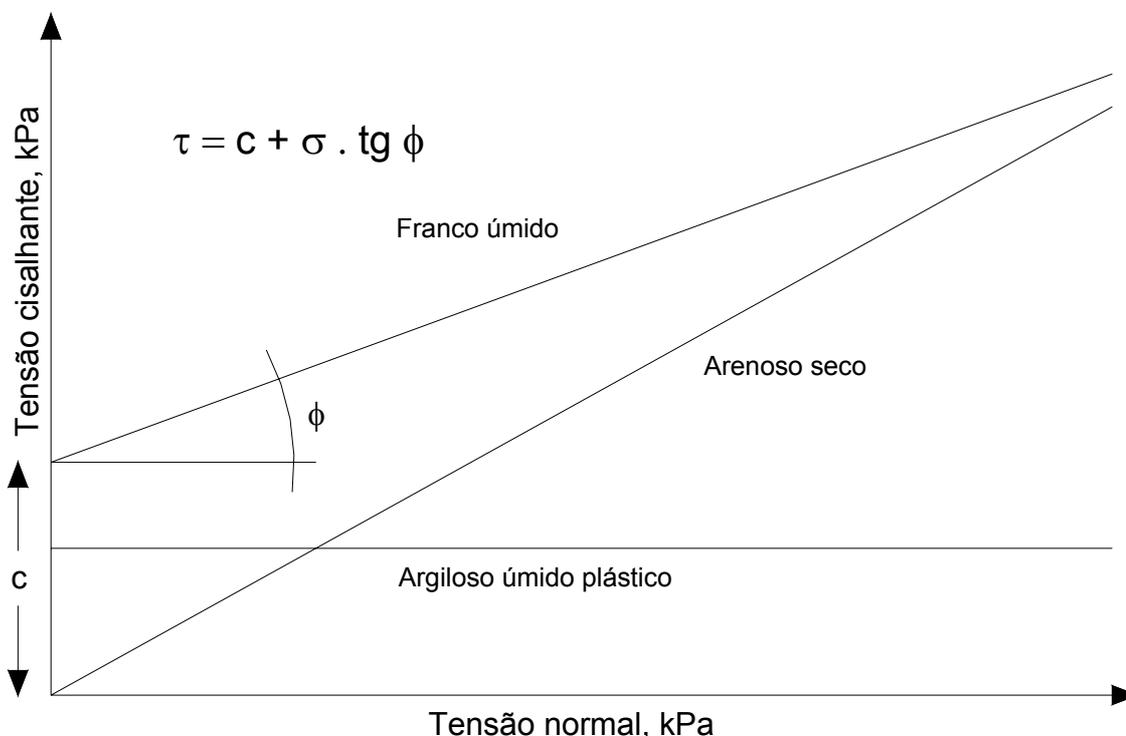


Figura 2 – Comportamento de diferentes tipos de solo a coesão e tensão cisalhante (Ashburner & Sims, 1984).

A pressão máxima sobre o solo está entre 2 a 3 vezes a pressão de inflação dos pneus (Larson & Gill, 1973). Quando a pressão interna do pneu é de 108 kPa, a pressão no solo corresponderá à faixa entre 216 a 324 kPa, o que é maior que a tensão de cisalhamento de muitos solos em uma tensão de água de 33 kPa.

Na avaliação do efeito do estado de compactação no cisalhamento do solo, Secco (2003) observou que a coesão teve uma relação direta com a densidade do solo. Em relação ao teor de água, a coesão diminuiu com o aumento do teor de água.

Com o aumento do teor de água ocorre um decréscimo da coesão do solo, o que está de acordo com os resultados de Boeni (2000). Gaggero (1998) não observou diferença significativa entre as condições antes e após o pastejo em um solo podzólico vermelho-escuro. Silva et al. (2004) observaram diferença na resistência ao cisalhamento em um Latossolo Vermelho distrófico, influenciada pelo teor de água, tipo de uso e manejo do solo.

Para solos agregados Lebert & Horn (1991) afirmam que a envoltória de Mohr pode ser dividida em duas partes, com declividades e interceptos diferentes, estando relacionadas com a resistência dos agregados do solo. Assim, a primeira envoltória é mais inclinada e com intercepto menor, representando a envoltória de ruptura definida pelo atrito e coesão interagregados, e a segunda envoltória é definida pelo atrito e coesão intraagregados, a qual só se manifesta quando os agregados são rompidos, o que ocorre quando a tensão normal for maior que a resistência dos agregados.

### **3.1.3. Resistência à Penetração**

Monitorar os solos pelos atributos físicos tem uma fundamental importância para a manutenção e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Com o monitoramento pode-se proporcionar uma melhoria na qualidade dos produtos agrícolas (Doran & Parkin, 1994).

Vários trabalhos têm registrado no sistema de plantio direto valores superiores de resistência à penetração e densidade do solo na camada superficial, quando comparados com o preparo convencional (Centurion & Demattê, 1985). Avaliando a influência do tempo de manejo do plantio direto na densidade e porosidade do solo, Henklain (1997) comprovou um incremento nos valores de densidade do solo no quarto ano do experimento.

A resistência à penetração apresenta forte relação com o crescimento das plantas (Bengough & Mullins, 1990), e é muito influenciada pelo teor de água e estrutura do solo, o que dificulta a obtenção de valores limitantes em relação à produção das culturas (Unger & Kaspar, 1994).

As classes de solo, as condições climáticas, os sistemas de culturas utilizados, o tempo de uso dos diferentes sistemas de manejo e as condições de umidade do solo em que são realizadas as operações no campo determinam a magnitude dos efeitos do manejo sobre as propriedades físicas do solo (Abrão et al. 1979, Eitz et al., 1989). Em solos sob plantio direto normalmente tem se observado um aumento do conteúdo de água (Salton & Mielniczuk, 1995). Segundo Imhoff et al. (2000), a  $\sigma_p$  e a RP são dependentes da umidade e da densidade do solo.

Comparando o sistema de plantio convencional com o plantio direto Costa et al. (2003) observaram que o plantio direto teve melhores condições estruturais,

evidenciadas principalmente pela redução da densidade em superfície e pelo aumento da estabilidade de agregados.

Dias Junior & Ferreira (1999) calibraram os valores de pressão de pré-consolidação com os da resistência à penetração, para um Podzólico Amarelo e um Plintossolo, realizadas em duas profundidades, onde a relação entre a  $\sigma_p$  e RP que encontraram foi da forma  $\sigma_p = b_0 + b_1 \cdot RP$ , onde os valores dos coeficientes de determinação foram significativos. Com essa equação, por meio da determinação da RP calcula-se a  $\sigma_p$ , a qual é usada como uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo.

Ao analisar o efeito da Ds e da umidade volumétrica ( $\theta$ ) nos valores de RP, Silva (2003) observou que o modelo duplo exponencial correlacionou melhor o resultado obtido de RP do que modelos lineares. Genro Jr (2002) afirma que modelos lineares relacionam a RP com a umidade do solo, quando a Ds está em uma mesma faixa.

Lima (2004) obteve uma relação significativa positiva e linear entre a  $\sigma_p$  e a resistência à penetração medida em laboratório e a campo, e afirma também que  $\sigma_p$  pode ser adequadamente estimada a partir de uma propriedade de fácil determinação como a resistência à penetração medida diretamente a campo.

## **3.2. Material e Métodos**

### **3.2.1. Solo**

O solo em estudo é classificado como um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (EMBRAPA, 1999), localizado na área experimental do Departamento de Solos, da Universidade Federal de Santa Maria, no município de Santa Maria, localizado na região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, latitude 29°41'00" Sul, longitude 53°48'00" oeste e altitude de 95 metros aproximadamente. O clima da região enquadra-se na classificação "Cfa" de Köppen, clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, e a temperatura do mês mais frio entre -3°C e 18°C (Moreno 1961).

### 3.2.2. Tratamentos

Os tratamentos foram diferentes preparos do solo: plantio direto consolidado 13 anos (PD13), preparo convencional em 2003 (PC03), preparo convencional em 2004 (PC04), escarificado em 2001 (ESC01), escarificado em 2002 (ESC02) e escarificado em 2004 (ESC04), distribuídos em parcelas de 5 x 15 metros. O preparo convencional 2004 foi feito nas parcelas do preparo convencional 2003, e o escarificado 2004 nas parcelas do escarificado em 2001.

### 3.2.3. Especificações das máquinas agrícolas

As operações de preparo, plantio e manejo das parcelas foram realizados com um trator marca Massey Ferguson, Modelo 275 sem TDA (Tração Dianteira Assistida), pertencente ao Departamento de Solos. A determinação da pressão exercida sobre o solo pelos pneus foi realizada a partir dos parâmetros técnicos do trator descritos na Tabela 1. A determinação da área de contato foi calculada com base na equação desenvolvida por Inns & Kilgour (1978):

$$A = 0,87 \cdot L \cdot 0,31 \cdot Dt$$

Onde

A = área de contato (cm<sup>2</sup>),

L = largura do pneu (cm),

Dt = diâmetro total do pneu (cm).

Tabela 1 – Características do trator utilizado nos ensaios com especificações de áreas de contato e pressões exercidas.

| <b>Trator</b>  | <b>Massey Ferguson 275</b> |
|--|----------------------------|
| Potência do motor, kw (cv)                               | 53,0(72)                   |
| Peso total (kgf)   | 2665                       |
| Peso dianteiro (kgf)                                     | 800                        |
| Peso traseiro (kgf)                                      | 1865                       |
| Pressão de inflação dos pneus (kPa)                      | 200                        |
| Especificação pneu dianteiro                             | 7.5-16                     |
| Especificação pneu traseiro                              | 14.9-28                    |
| Área de contato pneu-solo (dianteiro) (cm <sup>2</sup> ) | 863                        |
| Área de contato pneu-solo (traseiro) (cm <sup>2</sup> )  | 2915                       |
| Pressão de contato pneu dianteiro (kPa / pneu)           | 45                         |
| Pressão de contato pneu traseiro (kPa / pneu)            | 31                         |
| Pressão total exercida pelo trator (kPa)                 | 152                        |

As parcelas com preparo convencional foram lavradas com um arado de três discos fixos com 26" de diâmetro. A operação de lavração foi realizada a uma velocidade média de  $4 \text{ km h}^{-1}$  e a uma profundidade que variou entre 25 e 30 cm. Na Figura 3 pode-se observar o perfil do solo após a lavração, sendo que o fundo ficou praticamente plano, ao contrário das parcelas escarificadas.



Figura 3 – Perfil do solo após a lavração

Nas parcelas escarificadas utilizou-se um escarificador com cinco hastes, com comprimento de 50 cm. Essa operação foi realizada à profundidade média de 25 a 30 cm e a uma velocidade média de  $3 \text{ km h}^{-1}$ . Na Figura 4 pode-se observar o perfil do solo após a escarificação. O fundo não ficou plano e as hastes do escarificador estavam com distâncias desuniformes, mas isto não interferiu na coleta das amostras, pois as amostras foram coletadas na profundidade máxima de 12 cm.



Figura 4 – Perfil do solo após a escarificação.

Após ter sido lavrada e escarificada, a área foi gradeada com o objetivo de destorroar e nivelar a superfície do solo, para a realização do plantio do feijão. Essa

operação foi realizada com uma grade niveladora com 24 discos, a uma velocidade média de 10 de  $\text{km h}^{-1}$ .

A operação de plantio do feijão foi realizada com uma semeadora de semeadura direta, com cinco linhas. Como foi utilizada a mesma semeadora, específica para semeadura direta, quando operava em solo revolvido o operador do trator tinha que acionar o comando hidráulico com o objetivo de erguer um pouco a semeadora, para a semeadura não ser muito profunda. A semeadura foi realizada a uma velocidade média de 6  $\text{km h}^{-1}$  e a uma profundidade média de 8 cm em todas as unidades experimentais.

#### **3.2.4. Determinações**

Para os ensaios de compressão uniaxial foram coletadas nas unidades experimentais, ao acaso, 96 amostras em cilindros com um diâmetro de 5,50 cm e altura de 2,0 cm em média, e para o ensaio de cisalhamento direto foram coletadas ao acaso, 144 amostras em caixas de 5x5 cm de lado e altura de 1,95 cm em média. Todas essas amostras foram coletadas com estrutura preservada. As amostras de compressibilidade foram coletadas no mês de fevereiro e outubro de 2004, e as amostras de cisalhamento em outubro do mesmo ano, coletadas em duas profundidades de 0-2 e 10-12 cm. Essas profundidades foram escolhidas para os testes de compressibilidade porque a superfície do solo sofre diretamente o tráfego das máquinas e mobilização por elementos da semeadura, enquanto na profundidade de 10-12 cm se verifica uma camada compactada em sistemas de plantio direto.

As amostras para os ensaios de compressão uniaxial foram saturadas em água por 24 horas e após submetidas às tensões de 6, 33, 100 e 300 kPa. A tensão de 6 kPa foi obtida na mesa de tensão e as tensões de 33, 100 e 300 kPa foram obtidas na câmara de pressão de Richards. As amostras para os ensaios de cisalhamento foram saturadas por 24 horas em água e após submetidas à tensão de 33 kPa na câmara de pressão de Richards.

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado seguindo-se a NBR-12007/90, da Associação Brasileira de Normas Técnicas, com algumas alterações. As amostras nesses testes não foram ensaiadas saturadas, conforme a norma, onde foram aplicadas cargas estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa,

durante cinco minutos de aplicação de cada carga. Nesse tempo, conforme Silva et al. (2000), ocorre 99% da deformação do solo. Para a determinação da  $\sigma_p$  e  $C_c$  utilizou-se o software Compress (Reinert et. al, 2003), optando-se pelo método de Casagrande (Holtz & Kovacs, 1981). O grau de saturação ( $G_s$ ) foi obtido pela equação  $G_s = \frac{\theta}{P_t}$ , onde  $\theta$  = umidade volumétrica e  $P_t$  = porosidade total.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados aplicando-se cargas normais de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa. Após aplicada a carga, aguardava-se 5 minutos para iniciar-se o cisalhamento propriamente dito, com velocidade de deslocamento de  $0,33 \text{ mm min}^{-1}$ . Os valores obtidos na leitura da mola na prensa de cisalhamento foram plotados e ajustou-se uma reta aos pontos e obteve-se a coesão e o ângulo de atrito interno.

O ensaio de resistência à penetração (RP) foi realizado no campo com o solo em diferentes umidades. Os ensaios de RP foram feitos ao acaso nas unidades experimentais em estudo, utilizando-se um penetrógrafo manual, com armazenamento eletrônico de dados (RIMIK, CP 20). Para a determinação da umidade, foram coletadas amostras de solo com um trado calador até 30 cm em intervalos de 5 cm de profundidade, em cada unidade experimental. Para a determinação da densidade de partículas foram coletadas amostras com estrutura alterada, a qual foi determinada pelo método do balão volumétrico.

Para analisar o efeito da densidade ( $D_s$ ) e da umidade volumétrica ( $\theta$ ) sobre os valores de RP, foi utilizado um modelo duplo exponencial o qual correlacionou melhor o resultado obtido de RP ao ser comparado a um modelo linear (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1999). A partir dos valores de RP,  $D_s$ , e  $\theta$  foram calculados os parâmetros “a”, “b” e “c” para a seguinte equação  $RP = a \cdot \theta^b \cdot D_s^c$  (Busscher, 1990).

Os gráficos da RP e  $\sigma_p$  estimada e observada em função da  $D_s$  e  $\theta$  foram gerados utilizando-se o software Surfer 8.0. O “grid” da RP estimada foi gerado utilizando-se o método da regressão polinomial quadrática e para a  $\sigma_p$  utilizou-se o método da curvatura mínima. Utilizou-se diferentes métodos porque o método da regressão polinomial quadrática não ajustou muito bem os pontos da  $\sigma_p$ .

### 3.3. Análise estatística

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

### 3.4. Resultados e Discussão

#### 3.4.1. Compressibilidade

A pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) (Figura 5) na profundidade de 0-2 cm, em solo mais úmido (tensão 6 kPa), foi maior no tratamento PD13, mas não diferiu do PC03. Esperava-se que o ESC01 também tivesse uma  $\sigma_p$  maior do que a encontrada, pelo fato de ser a que há mais tempo foi revolvida. Nessa condição de umidade, o PC04 teve a menor  $\sigma_p$ , a qual apenas diferiu do PC03 e PD13.

Em solo mais seco (tensão 100 e 300 kPa), o PD13 teve a maior  $\sigma_p$  e diferiu apenas do PC04; esperava-se que diferisse também do ESC04, o que não ocorreu. O PC04, na condição de solo mais seco, teve a menor  $\sigma_p$ , o que era esperado, diferindo do PC03 e PD13 na tensão de 100 kPa; na tensão de 300 kPa, diferiu apenas do PD13.

Na profundidade de 10-12 cm, em solo mais úmido (tensão de 6 kPa), o PD13 teve a maior  $\sigma_p$ , diferindo do ESC01 e PC04, enquanto o ESC01 teve a menor  $\sigma_p$ , diferindo do PD13. Na tensão de 100 kPa, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Para a tensão de 300 kPa, o ESC02 teve a maior  $\sigma_p$ , diferindo apenas do ESC04, e a menor  $\sigma_p$  foi do ESC04 o qual diferiu do ESC02 (Figura 5). Esperava-se que o PC04 não diferisse do ESC04, o que não ocorreu. Os valores médios da pressão da pré-consolidação estão na tabela do Anexo C.

Observa-se de maneira geral que quanto mais seco o solo maior é a  $\sigma_p$ , independente do manejo do solo. Segundo Hillel (1980), isso ocorre porque, com o aumento da umidade do solo há uma diminuição da coesão entre as partículas do solo e a água forma filmes sobre as partículas sólidas, o que reduz o atrito entre as partículas.

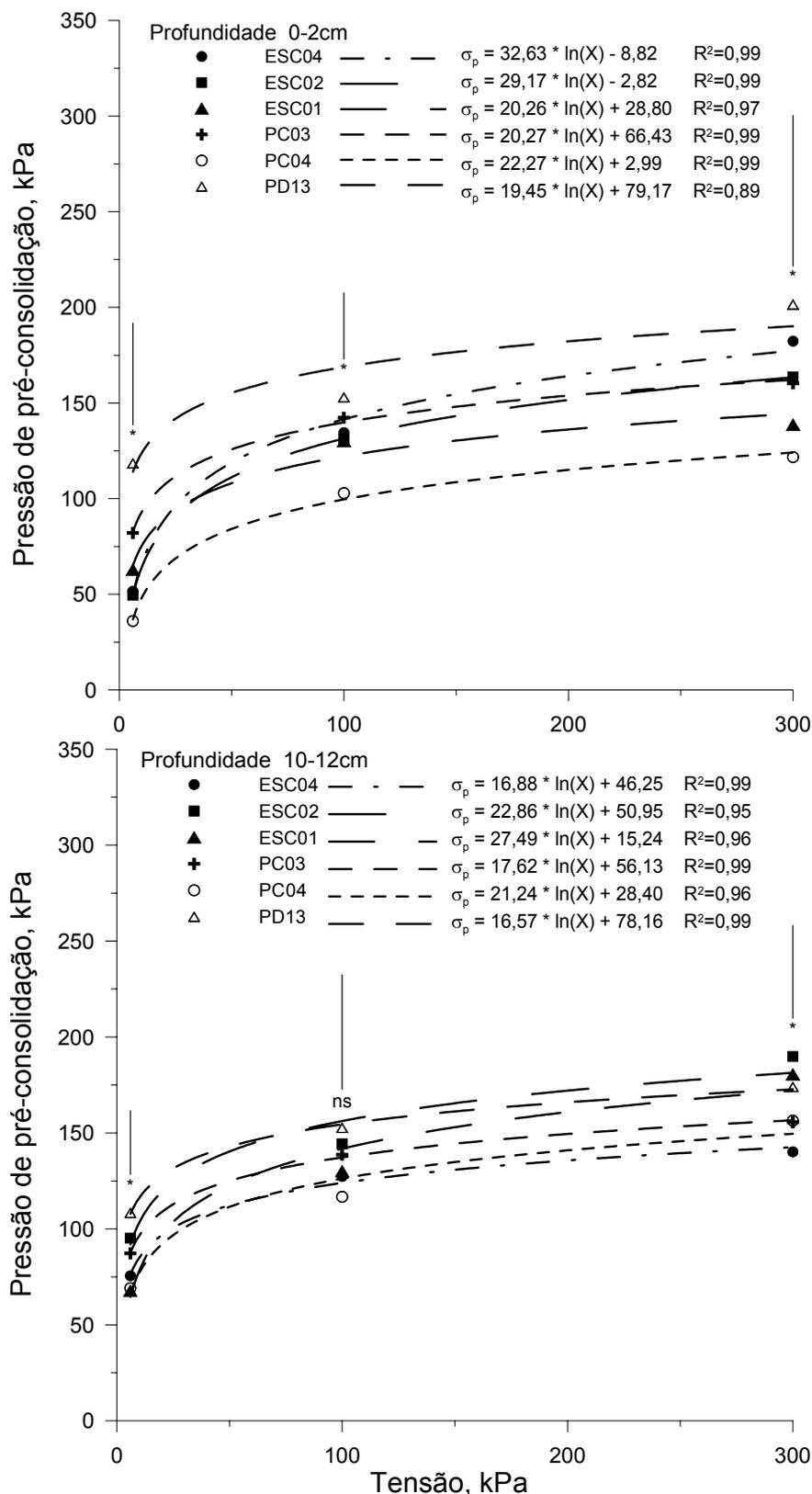


Figura 5 – Pressão de pré-consolidação em função da tensão para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC01 (escarificado em 2001), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004), PC03 (preparo convencional 2003) e PC04 (preparo convencional 2004), em três tensões e duas profundidades. As barras verticais representam o valor de DMS (5%), onde ns= não significativo e \*= significativo a 5%.

A maior  $\sigma_p$  do PD13 era esperado, pois este solo estava mais consolidado, pelo não revolvimento do mesmo há treze anos. Esse tratamento dificilmente sofrerá uma nova deformação se for manejado em uma baixa umidade do solo, pois o trator utilizado no manejo do experimento exerce uma pressão média no solo de 150 kPa, a qual é menor que a  $\sigma_p$  de 230 kPa observada na tensão de 300 kPa. Contudo, se o PD13 for manejado a uma tensão de 6 kPa, no qual a  $\sigma_p$  observada foi de 125 kPa, haverá deformação do solo. A menor  $\sigma_p$  foi observada no PC04, cujo sistema está sujeito à compactação adicional nas três tensões em que o solo foi ensaiado, pelo fato de que a  $\sigma_p$  foi menor nessas tensões que a pressão exercida pelo trator.

O trator utilizado para o manejo do experimento exerce uma pressão média de 150 kPa no solo, o qual está na faixa da maior parte das máquinas agrícolas como tratores e colhedoras pois esses aplicam uma pressão média de 10 a 200 kPa na superfície do solo (Carpenedo, 1994).

Antes de se realizar qualquer operação de manejo do solo ou da cultura, o agricultor deveria observar qual o teor de água no solo e ter o conhecimento de qual é a umidade crítica, ou seja, onde o solo tem a maior compactação quando submetido a uma carga adicional. Contudo, o agricultor geralmente realiza as operações de manejo das culturas (exemplo: pulverização) mesmo com uma umidade desfavorável do solo, pois não pode esperar, muitas vezes, em função do grau de infestação por pragas, moléstias ou ervas daninhas, que comprometem a produção das culturas.

Quanto maior o  $G_s$  menor é a  $\sigma_p$  do solo. O  $G_s$  foi evidentemente maior na tensão de 6 kPa, onde na profundidade de 0-2 cm o PC03 teve o maior  $G_s$ , o qual diferiu do ESC02, ESC04 e PC04, enquanto o menor  $G_s$  foi observado no PC04, o qual diferenciou do PD13, ESC01 e PC03. Na tensão de 100 kPa, o maior  $G_s$  foi do PD13, o qual diferiu do ESC04 e PC04, enquanto o menor  $G_s$  foi do PC04, o qual apenas diferenciou do PD13. Na tensão de 300 kPa, o maior  $G_s$  foi do ESC02, diferindo do PC04 e PD13; o menor  $G_s$  foi do PD13, o qual diferenciou do ESC02 e do PC03 (Tabela 2).

Na profundidade de 10-12 cm na tensão de 6 kPa, o  $G_s$  não diferiu entre os tratamentos, sendo que na tensão de 100 kPa o maior  $G_s$  foi do ESC04, o qual apenas diferiu do ESC01; o menor  $G_s$  foi do ESC01, o qual apenas diferiu do

ESC04. Na tensão de 300 kPa, o maior Gs foi do PD13, o qual diferiu do ESC01 e PC03; o menor Gs foi no ESC01, o qual só não diferiu do PC03 (Tabela 2).

Tabela 2 – Grau de saturação para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC01 (escarificado em 2001), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004), PC03 (preparo convencional 2003) e PC04 (preparo convencional 2004), em três tensões e duas profundidades.

| Tratamento | Tensão, kPa           |          |           |
|------------|-----------------------|----------|-----------|
|            | 6                     | 100      | 300       |
|            | Gs, %                 |          |           |
|            | Profundidade 0-2 cm   |          |           |
| PD13       | 52,32 ab              | 30,41 a  | 14,90 c   |
| ESC01      | 49,65 ab              | 25,55 ab | 16,82 abc |
| ESC02      | 44,14 bc              | 25,91 ab | 23,22 a   |
| ESC04      | 45,32 bc              | 23,87 b  | 19,32 abc |
| PC03       | 58,18 a               | 25,59 ab | 21,72 ab  |
| PC04       | 37,86 c               | 21,77 b  | 15,03 bc  |
|            | Profundidade 10-12 cm |          |           |
| PD13       | 58,79 a               | 36,93 ab | 37,12 a   |
| ESC01      | 59,02 a               | 31,15 b  | 22,75 b   |
| ESC02      | 63,19 a               | 38,87 ab | 35,75 a   |
| ESC04      | 62,31 a               | 40,81 a  | 32,16 a   |
| PC03       | 57,96 a               | 34,33 ab | 25,00 b   |
| PC04       | 67,97 a               | 35,85 ab | 32,31 a   |

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade

Para um argissolo, Braida (2004) observou que em saturações baixas a  $\sigma_p$  é maior quanto maior for a densidade do solo, mas para Gs elevado a mesma tende a ser independente da densidade inicial do solo. Neste estudo, pode-se observar que, quanto maior o Gs menor a  $\sigma_p$ , nos tratamentos que têm densidade diferente (Figura 6).

O coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ) indica a susceptibilidade à compactação. Neste caso em estudo, em condição de solo mais seco na profundidade de 0-2 cm, o tratamento PC04 foi mais susceptível à compactação adicional. O  $C_c$  somente apresentou diferença significativa na condição de solo mais seco (tensão 300 kPa), nas duas profundidades. Na profundidade de 0-2 cm, o maior  $C_c$  foi do PC04, o qual diferiu dos tratamentos ESC01 e PC03. O menor  $C_c$  foi no PC03, o qual não diferiu do ESC01. Na profundidade de 10-12 cm, o ESC01 teve o maior  $C_c$ , não diferindo do PC03, enquanto o menor  $C_c$  foi no ESC04, diferindo do ESC01 (Tabela 3).

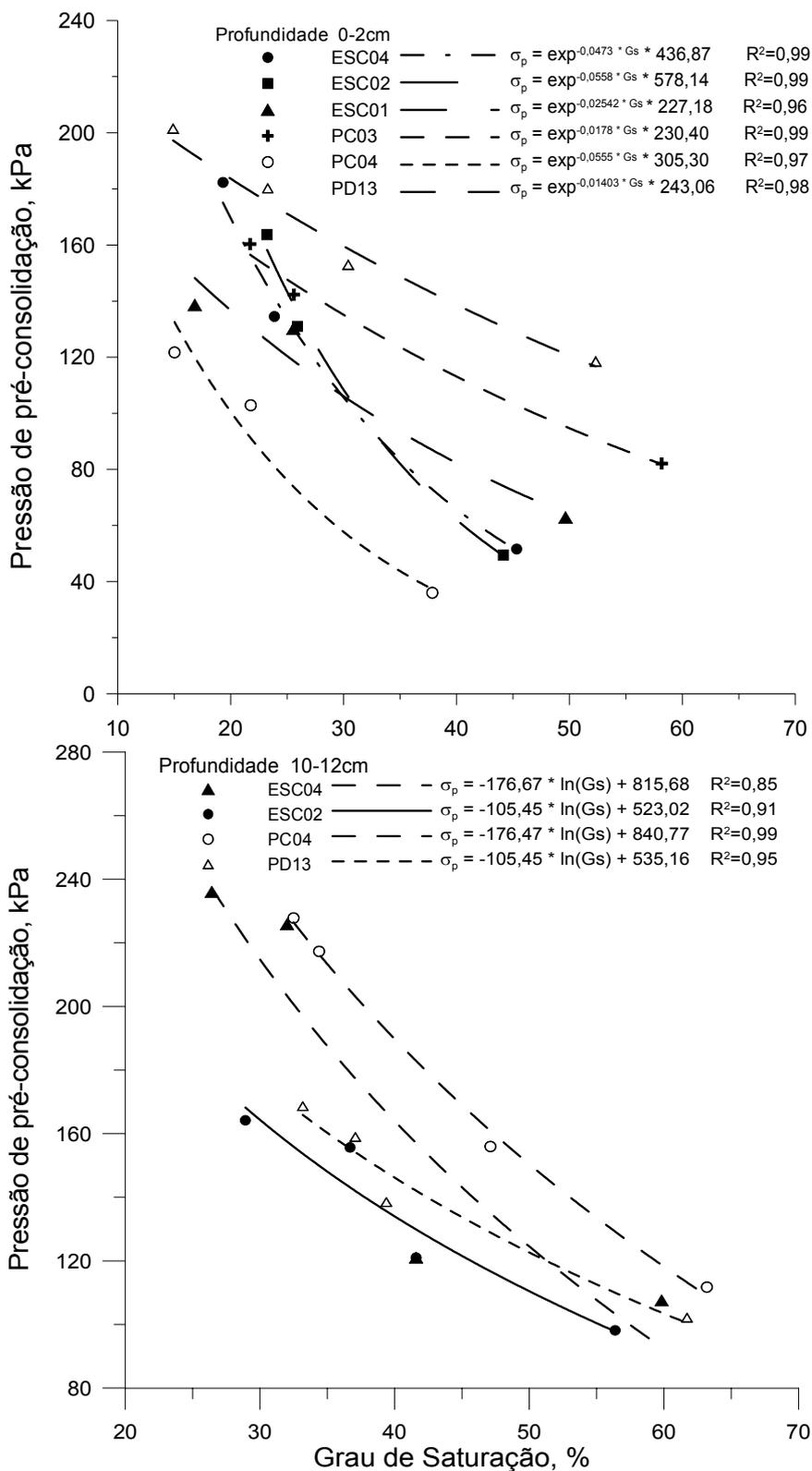


Figura 6 – Pressão de pré-consolidação em função do grau de saturação para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC01 (escarificado em 2001), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004), PC03 (preparo convencional 2003) e PC04 (preparo convencional 2004), em três tensões e duas profundidades.

Tabela 3 – Coeficiente de compressibilidade ( $C_c$ ) para os tratamentos PD13 (plântio direto 13 anos), ESC01 (escarificado em 2001), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004), PC03 (preparo convencional 2003) e PC04 (preparo convencional 2004), em três tensões e duas profundidades.

| Tratamento                   | Tensão, kPa |        |         |
|------------------------------|-------------|--------|---------|
|                              | 6           | 100    | 300     |
|                              | $C_c$       |        |         |
| <b>Profundidade 0-2 cm</b>   |             |        |         |
| PD13                         | 0,26 a      | 0,26 a | 0,37 ab |
| ESC01                        | 0,27 a      | 0,21 a | 0,25 bc |
| ESC02                        | 0,33 a      | 0,37 a | 0,35 ab |
| ESC04                        | 0,28 a      | 0,31 a | 0,36 ab |
| PC03                         | 0,26 a      | 0,32 a | 0,19 c  |
| PC04                         | 0,36 a      | 0,34 a | 0,42 a  |
| <b>Profundidade 10-12 cm</b> |             |        |         |
| PD13                         | 0,14 a      | 0,11 a | 0,11 b  |
| ESC01                        | 0,17 a      | 0,20 a | 0,24 a  |
| ESC02                        | 0,18 a      | 0,12 a | 0,11 b  |
| ESC04                        | 0,13 a      | 0,12 a | 0,10 b  |
| PC03                         | 0,20 a      | 0,23 a | 0,18 ab |
| PC04                         | 0,14 a      | 0,15 a | 0,14 b  |

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade

Oito meses após a primeira coleta, foi realizada outra amostragem experimental para os ensaios da  $\sigma_p$ . Os resultados são apresentados a Figura 7.

Obteve-se uma maior  $\sigma_p$  nos tratamentos em que o solo foi revolvido no ano de 2004, quando em condição mais seca (tensão de 100 e 300 kPa), o que pode ter ocorrido em função da coleta ter sido realizada em umidades diferentes. A coleta das amostras dos tratamentos ESC02 e PD13 foi realizada quando o solo estava com baixo teor de água ( $0,11 \text{ g g}^{-1}$ ), o que pode ter causado uma desestruturação das amostras na coleta, em função da vibração gerada pelos golpes de martelo sobre o extrator usado para enterrar o cilindro. Nos tratamentos ESC04 e PC04, a coleta foi realizada quando o solo estava com uma umidade mais alta ( $0,15 \text{ g g}^{-1}$ ) e por isso pode não ter ocorrido a desestruturação das amostras no momento da coleta.

Na profundidade de 0-2 cm, na tensão de 6 e 33 kPa, a  $\sigma_p$  não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. Na tensão de 100 kPa, a maior  $\sigma_p$  ocorreu no ESC04, o qual diferiu do PD13 e ESC02; a menor  $\sigma_p$  foi do ESC02, o qual apenas diferiu do ESC04. Na tensão de 300 kPa, a maior  $\sigma_p$  foi no ESC04, o qual diferiu do ESC02 e PD13; e a menor  $\sigma_p$  foi do PD13, o qual apenas diferiu do

ESC04 (Figura 7). Os valores médios da pressão da pré-consolidação estão na tabela do Anexo C.

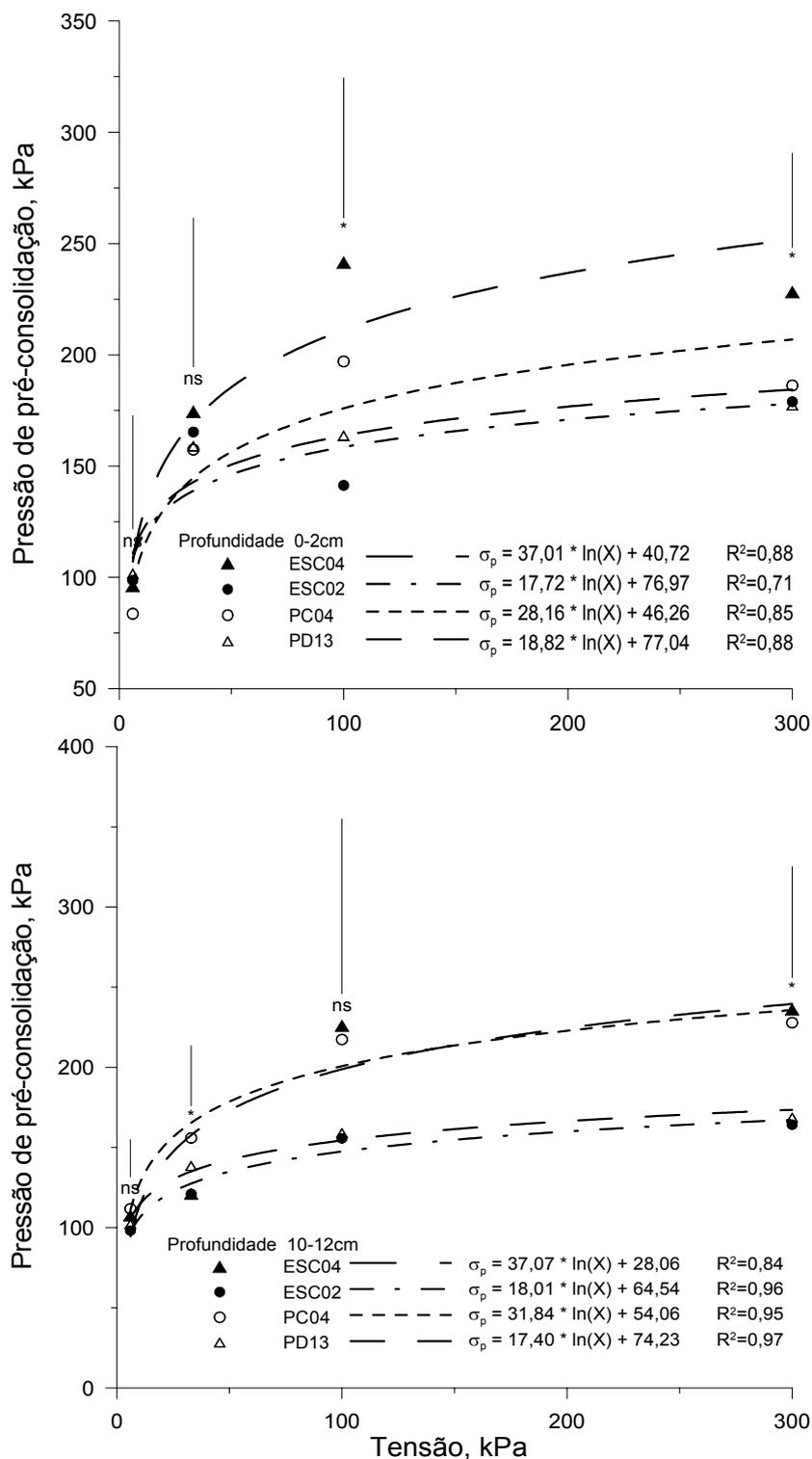


Figura 7 – Pressão de pré-consolidação em função da tensão para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades e quatro tensões. As barras verticais representam o valor de DMS (5%), onde ns= não significativo e \*= significativo a 5%.

O Cc somente teve diferença significativa na profundidade de 10-12 cm na tensão de 6 kPa, onde o maior Cc foi o PD13, o qual diferiu do ESC02, e o menor Cc foi do ESC02, o qual diferiu do PD13 (Tabela 4).

Tabela 4 – Coeficiente de compressibilidade (Cc) para os tratamentos PD13 (plântio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades e quatro tensões.

| Tratamento                   | Tensão, kPa |        |        |        |
|------------------------------|-------------|--------|--------|--------|
|                              | 6           | 33     | 100    | 300    |
|                              | Cc          |        |        |        |
| <b>Profundidade 0-2 cm</b>   |             |        |        |        |
| PD13                         | 0,21 a      | 0,25 a | 0,25 a | 0,21 a |
| ESC02                        | 0,23 a      | 0,27 a | 0,29 a | 0,35 a |
| ESC04                        | 0,21 a      | 0,29 a | 0,26 a | 0,26 a |
| PC04                         | 0,22 a      | 0,29 a | 0,23 a | 0,21 a |
| <b>Profundidade 10-12 cm</b> |             |        |        |        |
| PD13                         | 0,21 a      | 0,18 a | 0,18 a | 0,14 a |
| ESC02                        | 0,14 b      | 0,16 a | 0,12 a | 0,15 a |
| ESC04                        | 0,17 ab     | 0,16 a | 0,14 a | 0,18 a |
| PC04                         | 0,19 ab     | 0,19 a | 0,19 a | 0,17 a |

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade

O Gs para os manejos em estudo, na profundidade de 0-2 cm, apenas diferiu na tensão de 100 kPa. O maior Gs foi do ESC02, o qual apenas diferiu do ESC04, o qual por sua vez teve o menor Gs e diferiu do PD13 e ESC02. Na profundidade de 10-12 cm, houve diferença significativa na tensão de 33 e 300 kPa. Na tensão de 33 kPa, o PC04 teve o maior Gs, diferindo do PD13 o qual apresentou o menor Gs. Na tensão de 300 kPa, o maior Gs foi do PD13, que diferiu apenas do ESC04, com o menor Gs (Figura 8 e Tabela 5).

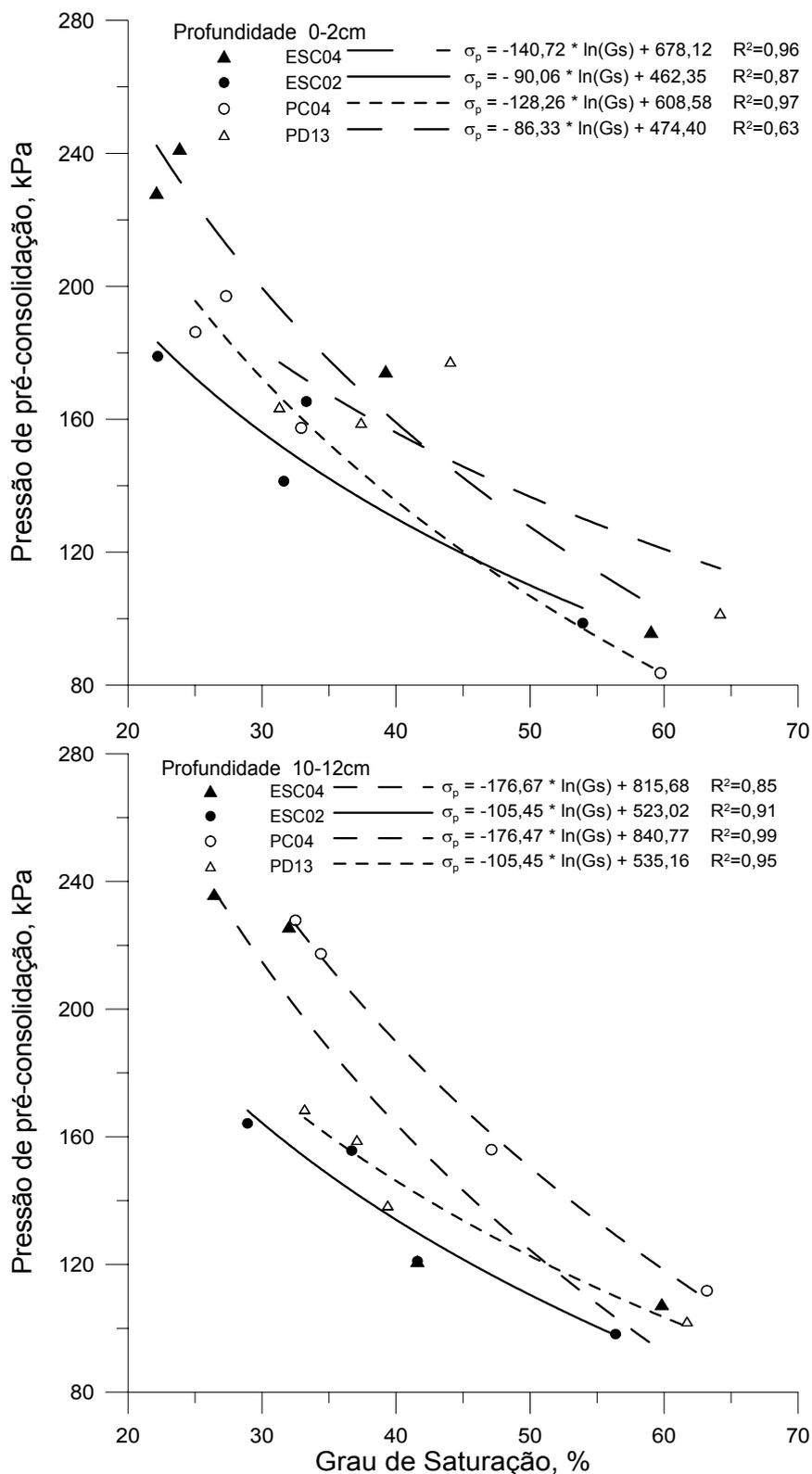


Figura 8 – Pressão de pré-consolidação em função do grau de saturação para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades e quatro tensões.

Tabela 5 – Grau de saturação para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades e quatro tensões.

| Tratamento                  | Tensão, kPa          |          |          |          |
|-----------------------------|----------------------|----------|----------|----------|
|                             | 6                    | 33       | 100      | 300      |
|                             | Grau de Saturação, % |          |          |          |
| <b>Profundidade 0-2cm</b>   |                      |          |          |          |
| PD13                        | 64,18 a              | 37,39 a  | 31,30 a  | 44,05 a  |
| ESC02                       | 53,93 a              | 33,31 a  | 31,62 a  | 22,22 a  |
| ESC04                       | 59,04 a              | 39,23 a  | 23,85 b  | 22,12 a  |
| PC04                        | 59,73 a              | 32,92 a  | 27,31 ab | 25,03 a  |
| <b>Profundidade 10-12cm</b> |                      |          |          |          |
| PD13                        | 61,71 a              | 39,38 b  | 37,09 a  | 33,18 a  |
| ESC02                       | 56,38 a              | 41,59 ab | 36,69 a  | 28,91 ab |
| ESC04                       | 59,83 a              | 41,59 ab | 32,01 a  | 26,42 b  |
| PC04                        | 63,19 a              | 47,12 a  | 34,39 a  | 32,49 ab |

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade

### 3.4.2. Cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados aplicando-se tensões normais até 800 kPa (Figura 9), com amostras de estrutura preservada, buscando-se a envoltória do solo em duas partes (Lebert & Horn, 1991). Nos resultados dos ensaios realizados não ficou clara a existência de dois segmentos nas envoltórias obtidas, com isso não foi possível determinar a resistência interagregados e intraagregados. Gaggero (1998) e Carpenedo (1994) verificaram claramente a existência de dois segmentos nas envoltórias para, respectivamente, um solo Podzólico Vermelho Escuro, e Podzólico Vermelho-Amarelo e Latossolo Roxo-Distrófico.

A tensão cisalhante não teve diferença significativa entre os tratamentos e em profundidade.

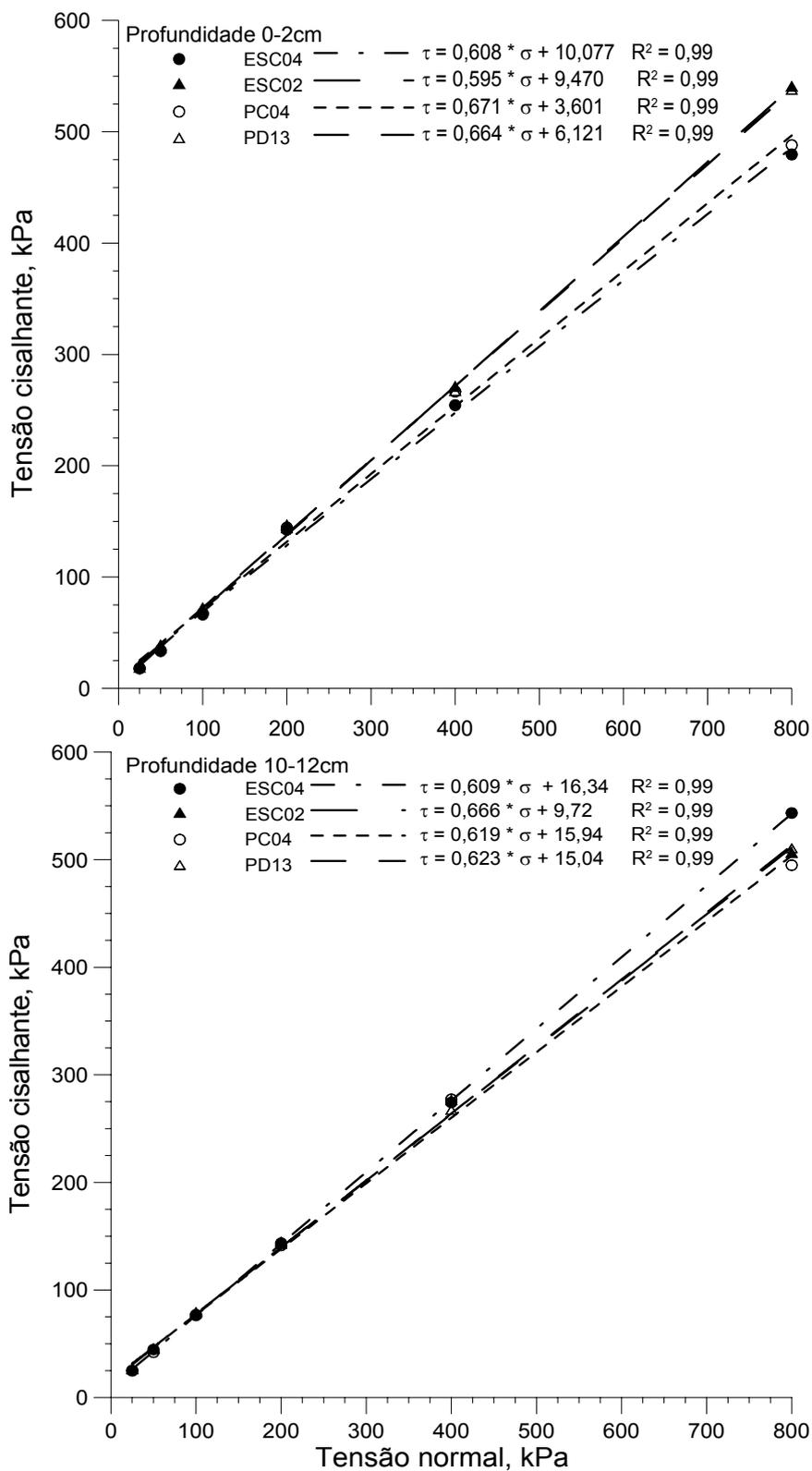


Figura 9 – Envoltórias de cisalhamento para os tratamentos PD13 (plântio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades.

O ponto de inflexão entre as duas envoltórias de resistência do solo ao cisalhamento (interagregados e intraagregados), é o ponto de cruzamento da primeira com a segunda envoltória, onde este ponto é o ponto de resistência dos agregados (Lebert & Horn, 1991). O primeiro segmento corresponde a tensões normais de até 300 kPa e, ao utilizar-se tensões normais menores que esse valor, os agregados do solo permanecem intactos e a envoltória é definida pelo atrito e a coesão entre os agregados. Isso resulta um ângulo de atrito maior, em função da rugosidade superficial e do tamanho dos agregados, e uma coesão menor, onde o número de pontos de contato e a força das ligações nesses pontos são menores do que nos espaços intraagregados. Aplicando-se tensões maiores que a resistência dos agregados, esses se rompem e a envoltória de cisalhamento é definida pela coesão e o atrito das partículas primárias do solo. A maior coesão é função da maior interação das partículas primárias do solo, sendo o ângulo de atrito menor devido à pequena rugosidade e ao menor tamanho das partículas (Lebert & Horn, 1991)

Com os resultados de coesão do solo e ângulo de atrito interno obtidos a partir dos ensaios, calculou-se o potencial de tração do solo para os quatro tratamentos e em duas profundidades (Tabela 6).

A resistência do solo ao cisalhamento tem influência direta na forças solo-trator ou solo-implemento, o que afeta a eficiência de tração (Stafford & Tanner, 1983). A redução da pressão de inflação dos pneus é uma alternativa utilizada para minimizar o efeito compactante das máquinas agrícolas e aumentar o potencial de tração. Quando o pneu trabalha com baixa pressão, sua área de contato com o solo é maior comparada com um pneu de alta pressão (Boeni, 2000).

Tabela 6– Parâmetros de cisalhamento direto e potencial de tração dos tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades.

| Tratamento                   | PI, kPa | A, m <sup>2</sup> | $\sigma$ , kN m <sup>-2</sup> | C, kN m <sup>-2</sup> | $\phi$ , ° | F, kN |
|------------------------------|---------|-------------------|-------------------------------|-----------------------|------------|-------|
| <b>Profundidade 0-2 cm</b>   |         |                   |                               |                       |            |       |
| <b>PC04</b>                  | 200     | 0,2915            | 152                           | 10,07 a               | 31,30 a    | 29,88 |
| <b>ESC04</b>                 | 200     | 0,2915            | 152                           | 9,47 a                | 30,75 a    | 29,12 |
| <b>ESC02</b>                 | 200     | 0,2915            | 152                           | 3,60 a                | 33,86 a    | 30,78 |
| <b>PD13</b>                  | 200     | 0,2915            | 152                           | 6,12 a                | 33,58 a    | 31,20 |
| <b>Profundidade 10-12 cm</b> |         |                   |                               |                       |            |       |
| <b>PC04</b>                  | 200     | 0,2915            | 152                           | 16,34 a               | 31,34 a    | 31,75 |
| <b>ESC04</b>                 | 200     | 0,2915            | 152                           | 9,72 a                | 33,66 a    | 32,34 |
| <b>ESC02</b>                 | 200     | 0,2915            | 152                           | 15,94 a               | 31,76 a    | 32,07 |
| <b>PD13</b>                  | 200     | 0,2915            | 152                           | 15,04 a               | 31,92 a    | 31,99 |

PI = pressão de inflação dos pneus; A = área de contato pneu-solo;  $\sigma$  = tensão normal efetiva; c = coesão do solo;  $\phi$  = ângulo de atrito interno; F = potencial de tração.

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade

### 3.4.3. Curva característica de água no solo

Na profundidade de 0-2 cm, houve pouca diferença entre os tratamentos na retenção de água nas tensões de 40 e 60 kPa (solo mais úmido). O ESC04 e o PC04 tiveram o maior volume de água retida, onde somente o ESC04 diferiu do ESC02 e PD13 (Figura 10). Esse volume maior de água retida nessas tensões pode ser devido ao maior volume de microporos (Tabela 7). De maneira geral, os tratamentos com revolvimento de solo em 2004 tiveram maior volume de água retida até o potencial de 330 kPa.

Na profundidade de 10-12 cm, obteve-se maior diferença no volume de água retida no solo entre os tratamentos. Nessa profundidade, o PC04 foi o tratamento com maior volume de água retida em todos os potenciais, o qual diferiu do ESC02 e do PD13.

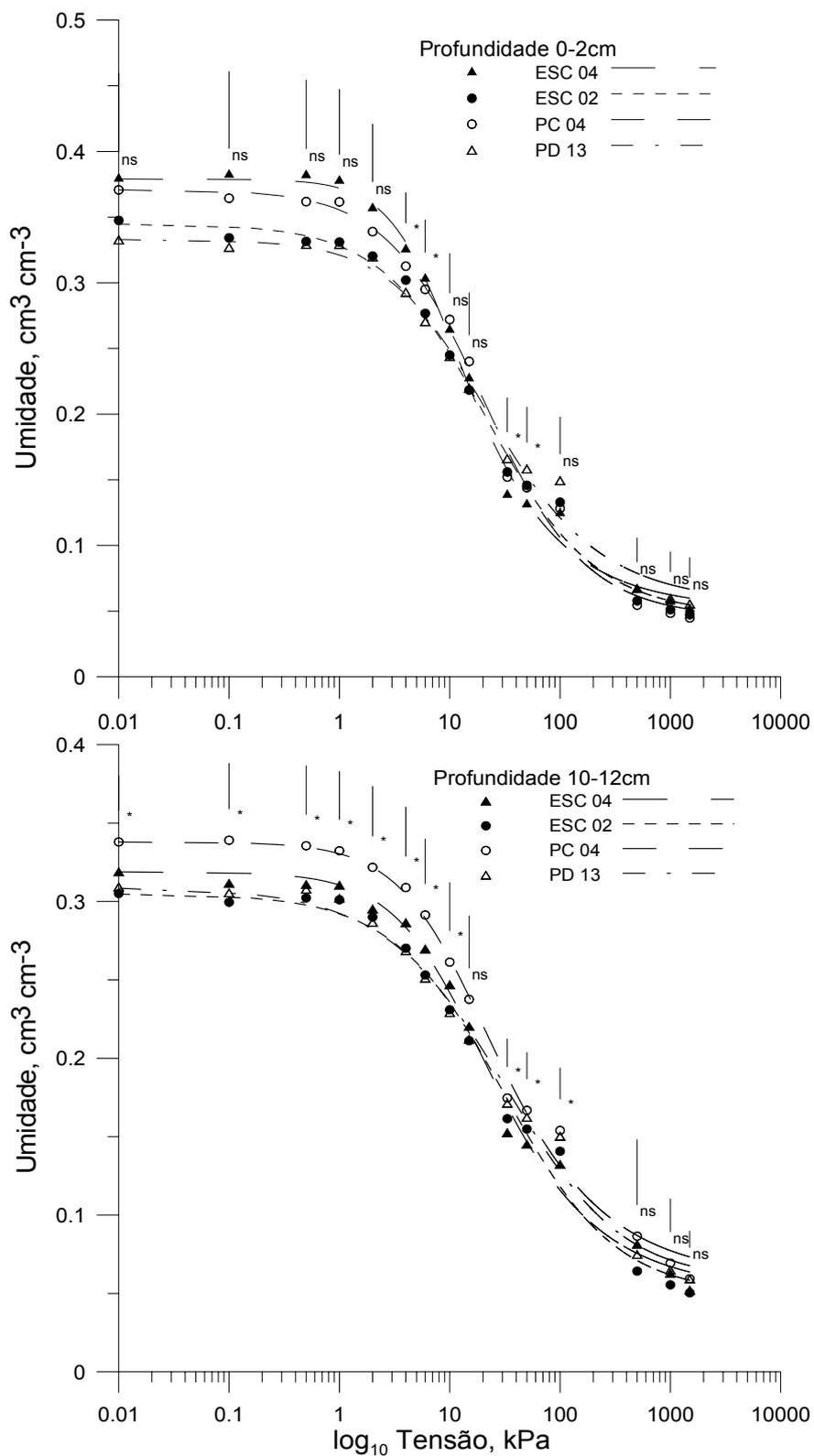


Figura 10 – Curva de retenção de água nas duas profundidades para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades e quinze tensões.

### 3.4.4. Densidade e porosidade do solo

A densidade do solo, macroporosidade e porosidade total na profundidade de 0-2 cm não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos. Essa amostragem foi feita oito meses após a lavração e escarificação, mostrando que a reconsolidação do solo ocorre rapidamente. A microporosidade foi maior no PC04, a qual apenas diferiu do PD13, e a menor foi do PD13, a qual diferiu do ESC04 e do PC04. Em relação à microporosidade, observa-se que os tratamentos revolvidos em 2004 apresentaram maior microporosidade, a qual ainda não foi afetada tanto pelo tráfego das máquinas sobre o solo.

Na profundidade de 10-12, a macroporosidade não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. A maior densidade do solo foi observada no ESC02, o qual diferiu do ESC04, e a menor densidade no ESC04, o qual apenas diferiu do ESC02. O PC04 teve a maior microporosidade, diferindo do ESC02 e do PD13 e o PD13, o qual diferiu do ESC04 e PC04. A maior porosidade total foi observada no PC04 a qual diferiu do ESC02, e a menor porosidade no ESC02, o qual diferiu do ESC04.

Tabela 7 – Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades.

| <b>Tratamento</b>     | <b>Densidade<br/>Mg m<sup>3</sup></b> | <b>Macroporosidade<br/>%</b> | <b>Microporosidade<br/>%</b> | <b>Porosidade Total<br/>%</b> |
|-----------------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Profundidade 0-2 cm   |                                       |                              |                              |                               |
| <b>PD13</b>           | 1,61 a                                | 11,41 a                      | 26,97 b                      | 38,39 a                       |
| <b>ESC04</b>          | 1,47 a                                | 14,09 a                      | 29,74 a                      | 43,82 a                       |
| <b>ESC02</b>          | 1,60 a                                | 10,21 a                      | 28,67 ab                     | 38,88 a                       |
| <b>PC04</b>           | 1,49 a                                | 13,43 a                      | 29,82 a                      | 43,24 a                       |
| Profundidade 10-12 cm |                                       |                              |                              |                               |
| <b>PD13</b>           | 1,68 ab                               | 10,92 a                      | 24,94 c                      | 35,86 ab                      |
| <b>ESC04</b>          | 1,64 b                                | 10,20 a                      | 27,29 ab                     | 37,49 a                       |
| <b>ESC02</b>          | 1,73 a                                | 8,89 a                       | 25,08 bc                     | 33,97 b                       |
| <b>PC04</b>           | 1,66 ab                               | 8,23 a                       | 28,25 a                      | 36,48 ab                      |

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade

### 3.4.5. Resistência à penetração

Os dados de resistência à penetração (RP) e umidade volumétrica ( $\theta$ ) estão apresentados na Figura 11. Esperava-se diferença significativa entre os tratamentos nas profundidades menores, o que não ocorreu. Houve diferença significativa na RP nas profundidades de 250 a 285 mm, a qual não deve ser afetada pelos diferentes manejos do solo. Os dados de RP apresentados foram obtidos oito meses após a escarificação, mostrando que a acomodação do solo foi rápida e que o revolvimento do solo, tanto com escarificação como com a lavração, não tem efeito na RP do solo com o passar do tempo.

De maneira geral, considera-se o valor de  $RP=2000$  kPa como crítico ao crescimento radicular (Taylor et al., 1966). Neste estudo, o maior valor de RP observado foi de 1854 kPa no PD13, sendo inferior ao limite crítico para o desenvolvimento do sistema radicular.

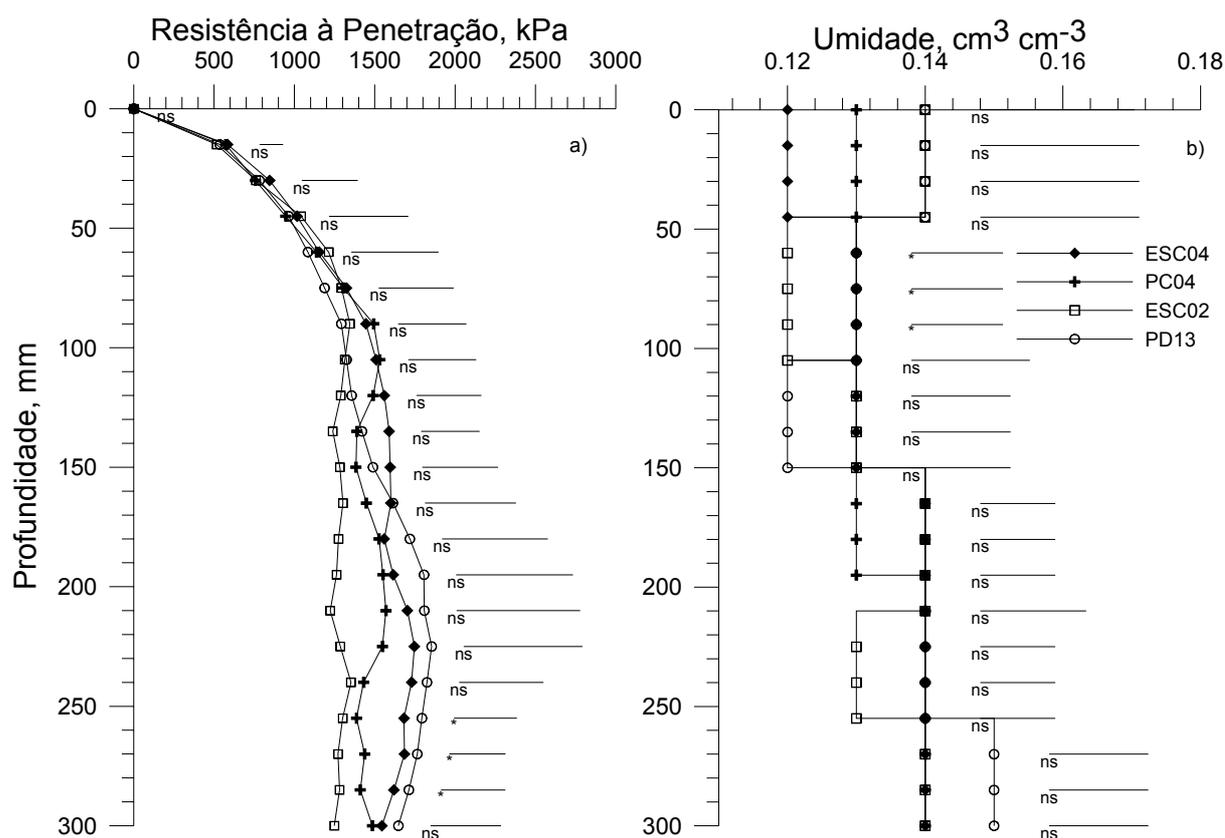


Figura 11 - Resistência à penetração, a) e umidade volumétrica, b) para os tratamentos PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004).

A partir dos dados de  $\sigma_p$  e RP, pretendia-se estabelecer relações entre  $\theta$ ,  $D_s$ , RP e  $\sigma_p$  do solo. Esperava-se obter  $\sigma_p=f(RP)$  para diferentes valores de umidade e  $\sigma_p=f(D_s)$ , para finalmente estimar a  $\sigma_p=f(RP)$  contudo, a relação da  $\sigma_p$  em função da RP inexistiu (Figura 12).

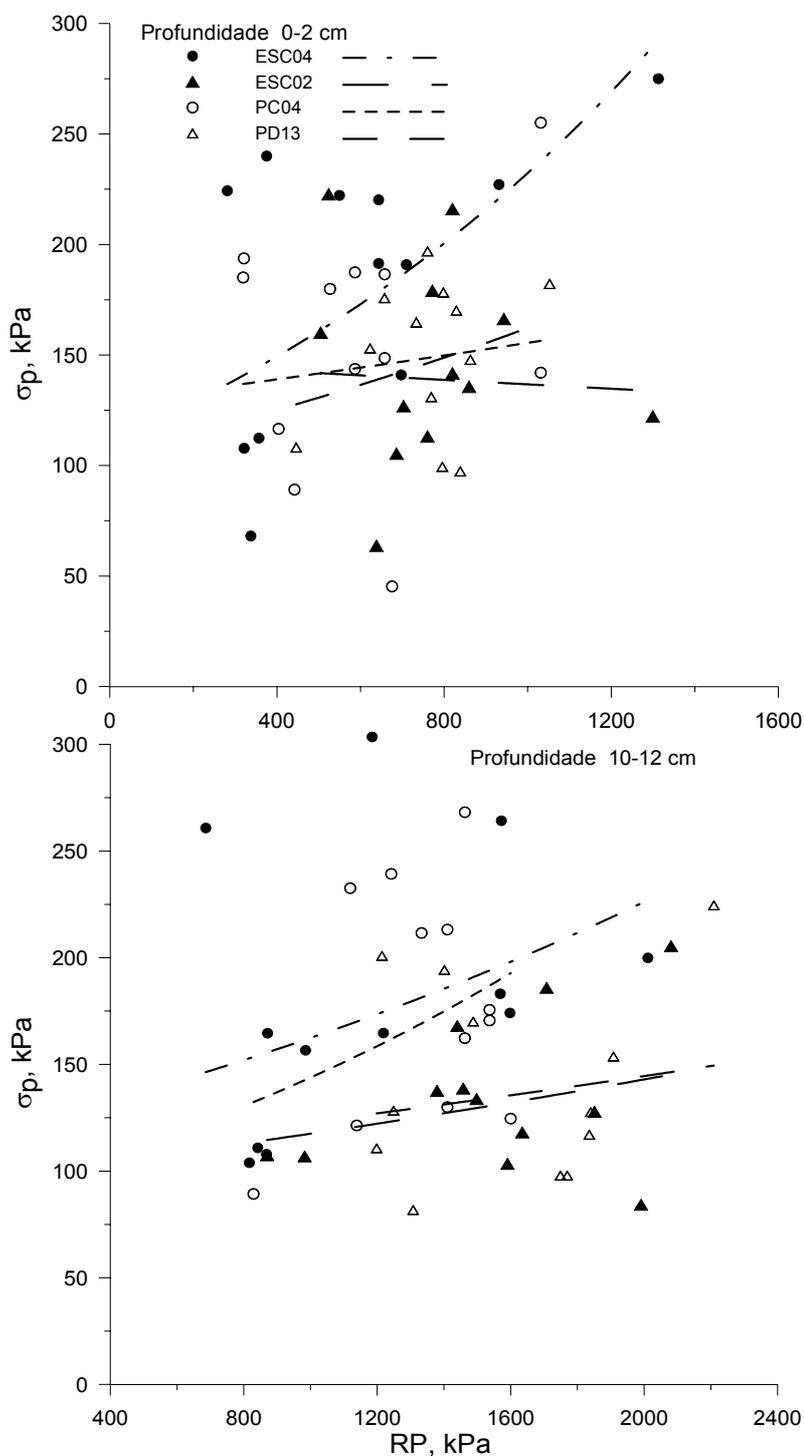


Figura 12 - Pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) em função da resistência à penetração (RP) para os tratamentos PD13 (plântio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004), em duas profundidades.

Essa relação tem grande aplicação prática no campo, pois conhecendo-se a  $\sigma_p=f(RP)$  pode-se medir a RP no campo e calcular a  $\sigma_p$ , com a finalidade de decidir se é possível executar operações motomecanizadas. Para isso, é necessário também ter o conhecimento da máquina, principalmente a pressão que exerce sobre o solo (Dias Junior, 1999).

Como não se obteve sucesso na relação da  $\sigma_p=f(RP)$ , partiu-se para uma relação mais complexa. Como a  $\sigma_p$  e a RP dependem simultaneamente da Ds e da  $\theta$ , para analisar o efeito da Ds e  $\theta$  nos valores de  $\sigma_p$  e RP utilizou-se o modelo duplo exponencial  $RP = a \cdot \theta^b \cdot Ds^c$  de Busscher (1990). Os coeficientes “a”, “b” e “c” foram obtidos a partir do software SAS, utilizando-se a metodologia PROC NLIN. Os resultados de RP observada e estimada são apresentados na Figura 13.

A estimação da RP para os quatro tratamentos estudados foi satisfatória, onde as equações ajustadas tiveram um coeficiente de determinação ( $r^2$ ), para o ESC04, de 0,29, indicando que 29 % da variação da RP é explicada pela variação da  $\theta$  e Ds; para o PC04,  $r^2=0,40$ ; para o ESC02,  $r^2=0,68$ ; e para o PD13,  $r^2=0,31$ . Quando ajustada uma equação para todos os tratamentos juntos, obteve-se um  $r^2=0,43$ . Para o mesmo solo, Silva (2003) encontrou um  $r^2=0,71$ , e Riquelme (2004) obteve um  $r^2=0,23$ . Para um Latossolo, Genro Jr. (2002) obteve um  $r^2= 0,49$ .

Após a obtenção dos coeficientes “a”, “b” e “c”, estimou-se a  $\sigma_p$  e RP para cada tratamento (Figura 13a), e todos os tratamentos (Figura 13b), juntando as duas profundidades. Os dados para a RP observada e estimada em função da Ds e  $\theta$  são apresentados na Figura 14.

Observa-se que, em todos os tratamentos, a RP estimada aumenta com o incremento da Ds e com a redução da umidade do solo. Nos tratamentos ESC02 e PC04, observa-se que a umidade do solo não teve uma influência tão elevada no aumento da RP, mas sim o incremento da densidade.

Quando observamos todos os tratamentos em duas profundidades, observa-se que o aumento da RP se dá mais em função da Ds do que da  $\theta$  do solo.

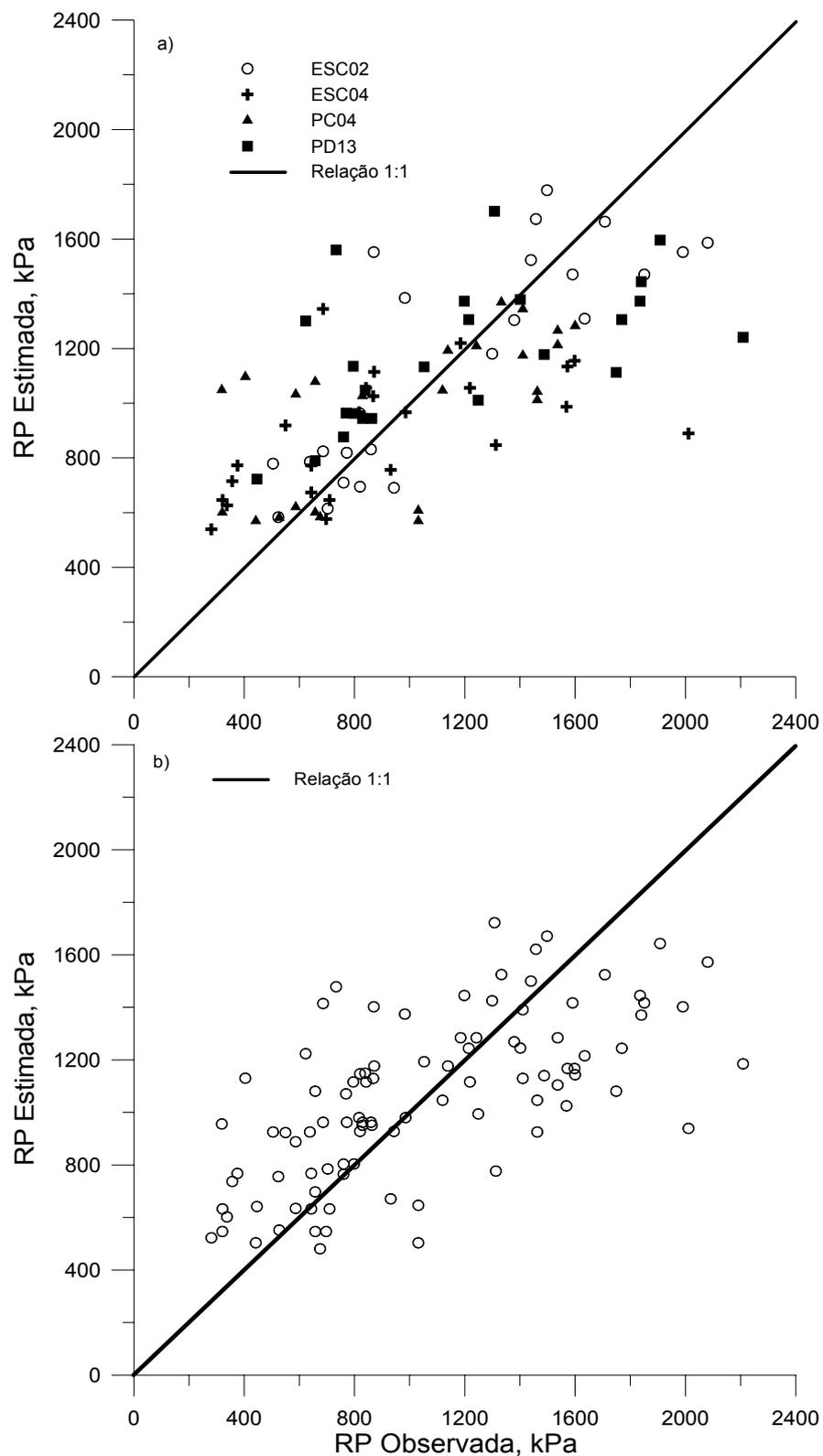


Figura 13 - Relação da resistência do solo à penetração estimada pelo modelo de Busscher (1990) e resistência do solo medida, para os tratamentos a) PD13 (plantio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004); b) todos os tratamentos com um ajuste.

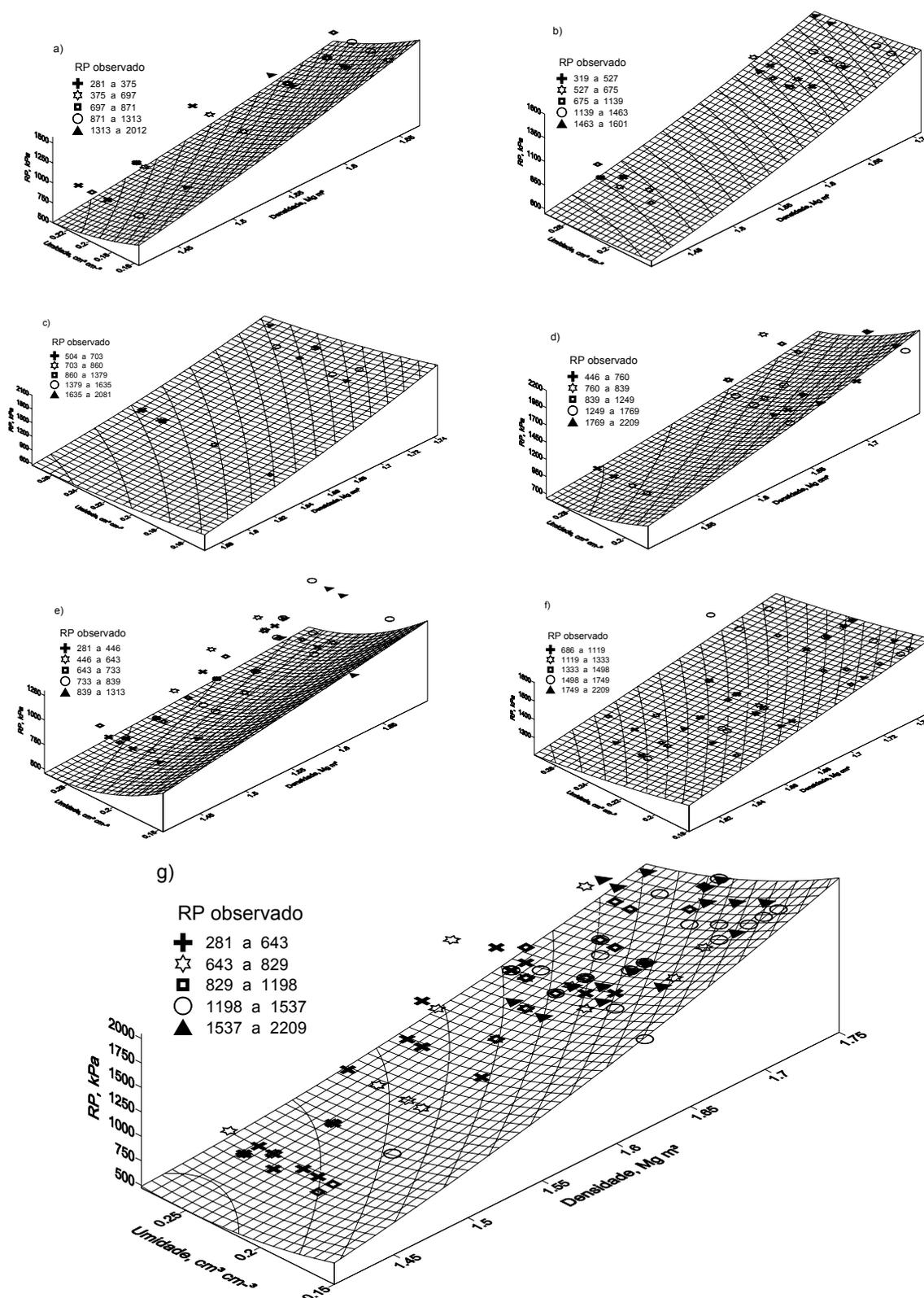


Figura 14 – Resistência à penetração (RP) estimada representada pela malha e RP observada representada pelos pontos em função da densidade e umidade do solo, para os tratamentos; a) ESC04 (escarificado em 2004); b) PC04 (preparo convencional 2004); c) ESC02 (escarificado em 2002); d) PD13 (plantio direto 13 anos); e) profundidade 0-2 cm; f) profundidade 10-12 cm; e f) todos os tratamentos.

A estimativa da  $\sigma_p$  em função da  $D_s$  e  $\theta$  pela equação de Busscher (1990) e apresentada na Figura 15. Os coeficientes de determinação para os tratamentos também foram satisfatórios. Para o tratamento ESC04 obteve-se um  $r^2=0,61$ , indicando que 61 % da variação da  $\sigma_p$  é explicada pela variação da  $\theta$  e  $D_s$ ; para o PC04,  $r^2=0,58$ ; para o ESC02,  $r^2=0,58$ ; e para o PD13,  $r^2=0,35$ . Quando ajustada uma equação para todos os tratamentos juntos, obteve-se um  $r^2= 0,47$ .

Com essa relação pode-se estimar a  $\sigma_p$ , com base na determinação da  $D_s$  e  $\theta$  no campo, não sendo mais necessária à determinação da  $\sigma_p$  em laboratório, a qual é bastante demorada.

Os valores da  $\sigma_p$  observada e estimada em função da  $D_s$  e  $\theta$  são apresentados na Figura 16. De um modo geral, a  $\sigma_p$  aumenta mais em função da diminuição da  $\theta$  do que do aumento  $D_s$  do solo. Braida (2004) observou que, quanto mais denso o solo, menor é a compressibilidade em um mesmo teor de água, o que foi confirmado em parte nesse estudo (Figura 16).

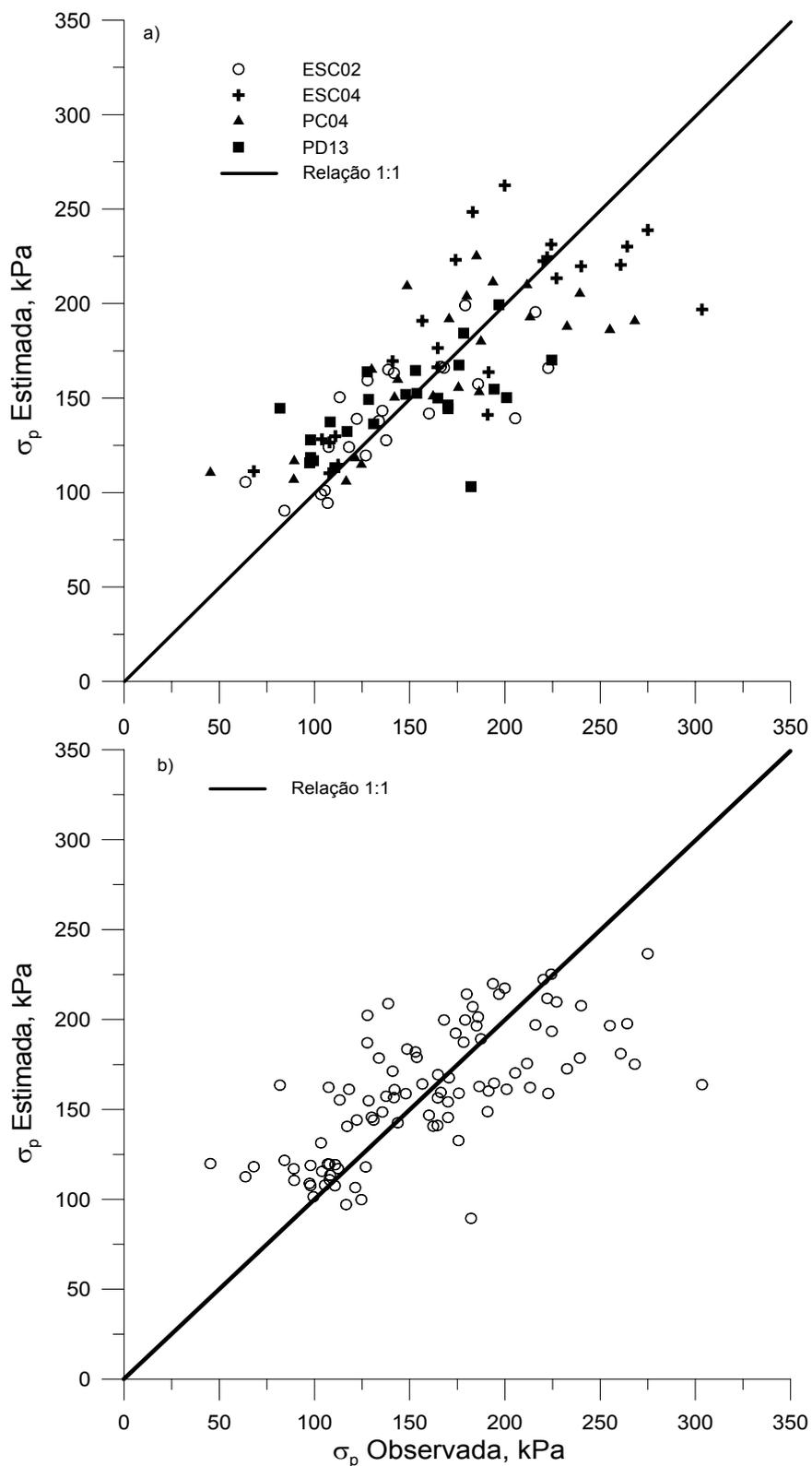


Figura 15 - Relação da pressão de pré-consolidação do solo estimada pelo modelo de Busscher (1990) e pré-consolidação do solo medida, para os tratamentos a) PD13 (plântio direto 13 anos), ESC02 (escarificado em 2002), ESC04 (escarificado em 2004) e PC04 (preparo convencional 2004); b) todos os tratamentos com um ajuste.

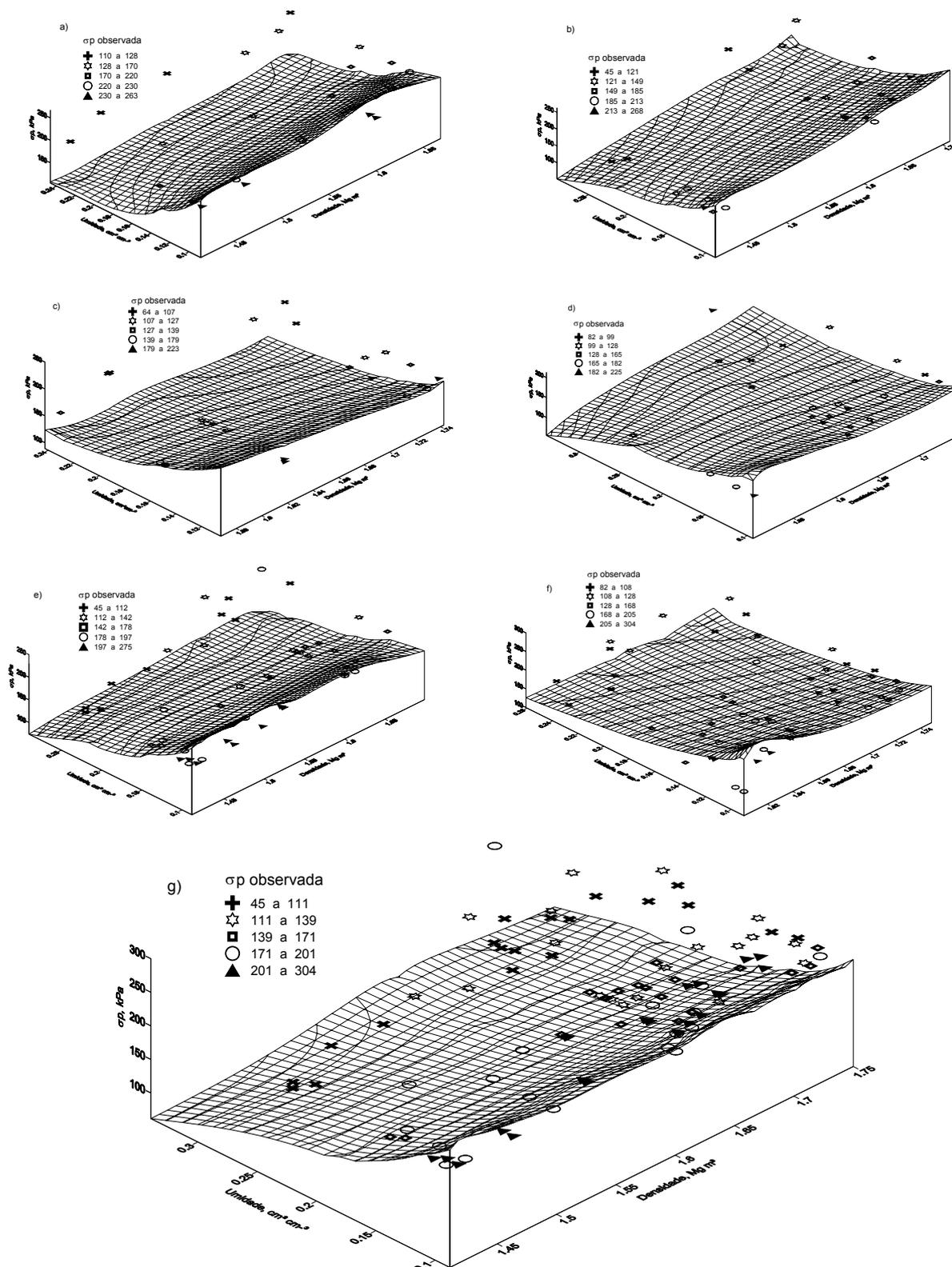


Figura 16 – Pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) estimada representada pela malha e  $\sigma_p$  observada representada pelos pontos em função da densidade e umidade do solo, para os tratamentos; a) ESC04 (escarificado em 2004); b) PC04 (preparo convencional 2004); c) ESC02 (escarificado em 2002); d) PD13 (plantio direto 13 anos); e) profundidade 0-2 cm; f) profundidade 10-12 cm; e f) todos os tratamentos.

### **3.5. Conclusões**

No sistema de plantio direto, obteve-se uma pressão pré-consolidação acima da pressão exercida pelo trator quando o solo está mais seco, sendo que nos demais tratamentos a pressão de pré-consolidação foi inferior, isso nos mostra que o solo no sistema de plantio direto está menos susceptível a uma compactação adicional, e ao contrário do plantio convencional e escarificado são muito mais susceptíveis a compactação adicional.

O revolvimento do solo não influenciou a tensão cisalhante, coesão e ângulo de atrito interno do solo.

A estimativa da resistência à penetração e da pressão de pré-consolidação do solo pode ser feita a partir da densidade e umidade do solo.