

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

**COMPORTAMENTO DINÂMICO E MECÂNICO DO  
SOLO SOB NÍVEIS DIFERENCIADOS DE  
ESCARIFICAÇÃO E COMPACTAÇÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**David Peres da Rosa**

Santa Maria, RS, Brasil.  
2007

Rosa, David Peres da, 1981-

R788c

Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação / por David Peres da Rosa ; orientador Jose Miguel Reichert. – Santa Maria, 2007.  
112 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2007.

1. Engenharia agrícola 2. Escarificação 3. Compactação  
4. Solo 5. Cisalhamento 6. Compressibilidade 7.  
Desempenho 8. Implementos agrícolas 9. Esforços I.  
Reichert, José Miguel, orient. II. Título

CDU: 631.3

Ficha catalográfica elaborada por

Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160

Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

# **COMPORTAMENTO DINÂMICO E MECÂNICO DO SOLO SOB NÍVEIS DIFERENCIADOS DE ESCARIFICAÇÃO E COMPACTAÇÃO**

**por**

**David Peres da Rosa**

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: José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2007

**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

**COMPORTAMENTO DINÂMICO E MECÂNICO DO SOLO SOB NÍVEIS  
DIFERENCIADOS DE ESCARIFICAÇÃO E COMPACTAÇÃO**

elaborada por  
**David Peres da Rosa**

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

**Comissão Examinadora:**

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

**Antônio Lilles Tavares Machado, Dr. (UFPEl)**

**Carlos Ricardo Trein, PhD (UFRGS)**

Santa Maria, 16 de fevereiro de 2007

***“Morrer ignorante, sabendo que poderia ter sido sábio,  
isso sim é a verdadeira tragédia humana.”  
Shakespeare.***

Dedico este trabalho aos meus pais,  
Paulo Sedrez da Rosa e Ligia Peres da Rosa,  
que, embora não estando em presença corporal,  
estiveram em presença espiritual.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor José Miguel Reichert, pela transmissão de conhecimentos, dedicação de seu tempo, orientação e, principalmente por sua amizade.

A EMBRAPA Trigo que permitiu o uso de sua propriedade para realização deste trabalho. Em especial ao pesquisador Arcenio Sattler, pela grande cooperação e ajuda, e aos pesquisadores Rainoldo Alberto Kochhann e José Eloir Denardin, pela ajuda e disponibilização de seu tempo.

Ao professor Dalvan José Reinert, pela troca de conhecimentos passados durante este período e por sua amizade.

Ao Ercelino Martin Rorato Bevilaqua da secretaria do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, pela cooperação nos momentos precisos e por sua amizade.

Aos professores da Mecânica dos solos da Eng. Civil da UFSM, pelo uso dos equipamentos necessários para execução dos testes realizados.

Aos colegas que se tornaram grandes amigos, Daniel Massoco, Marcelo Madalosso, Danilo Frachini, Marcelino Knob, João Fernando Zamberlan, Paulo Costa, pelas trocas de informações, amizade e momentos de descontração.

Aos amigos do Laboratório de Física do Solo, pelos momentos de trabalho, amizade, Adão Leonel Melo, André A. Brandt, Douglas Rodrigo Kaiser, Eracilda Fontanela, Flávio Fontinelli, Leonir Uhde, Luis Eduardo A. S. Suzuki, e aos bolsistas do laboratório Maurício Kunz, Paulo Gubiani, Fabiano Braga por sua amizade e ajuda, e em especial, aos bolsistas e amigos que foram fundamentais para execução deste trabalho, Marcelo Ivan Mentges e Davi Perigoti.

Aos amigos, colegas e parentes, os de perto e os de longe, que sempre torceram por mim.

Ao meu irmão, por toda sua força e incentivo transmitidos mesmo de longe.

Em especial, a uma grande mulher, não em tamanho, mas em coração, a minha esposa Vanderleia Trevisan da Rosa, por toda sua cooperação em casa, por sua fidelidade na alegria e na tristeza me ajudando a processar as amostras em laboratório nos fins de semana, e que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, me apoiando e incentivando, transmitindo todo seu amor e carinho.

Finalizando, a CAPES, pela concessão da bolsa de estudos, sem a qual não seria possível realizar o trabalho, e à Universidade Federal de Santa Maria, por me acolher durante esse período importante para minha vida.

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola

Universidade Federal de Santa Maria.

### **COMPORTAMENTO DINÂMICO E MECÂNICO DO SOLO SOB NÍVEIS DIFERENCIADOS DE ESCARIFICAÇÃO E COMPACTAÇÃO**

Autor: David Peres da Rosa

Orientador: José Miguel Reichert

Santa Maria, 16 fevereiro de 2007

A compactação nos solos sob sistema de semeadura direta está causando sérios problemas que, são revertidos à planta e as máquinas agrícolas visualizada pela maior resistência oferecida ao trabalho de implementos de araste. Tem-se como solução o uso da escarificação, porém aspectos sobre o tempo de permanência dos efeitos dessa nas propriedades mecânicas do solo e sua relação com a demanda de esforços em mecanismos mobilizadores não são claramente conhecidos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da escarificação e da compactação nas propriedades mecânicas do solo sob semeadura direta, bem como o seu efeito na dinâmica dos esforços em mecanismos mobilizadores. Para tal realizaram-se dois estudos, um primeiro em solo de textura argilosa, onde se avaliou o efeito temporal da escarificação, do tráfego e suas influências na compressibilidade, cisalhamento do solo, área mobilizada e demanda de esforços solicitados ao sulcador de semeadora de semeadura direta do tipo facão; e um segundo em solo de textura franco arenosa, onde se verificou a influência da compactação na resistência à penetração, área mobilizada, empolamento, resistência específica operacional e demanda de esforços em haste escarificadora com ponteira estreita. No estudo 1, a escarificação teve influência direta na resistência ao cisalhamento, tensão de pré-consolidação, coeficiente de compressão e na demanda de esforços, sendo que seu efeito perdurou por mais de dois anos e, após 4 anos não se encontrou mais efeito. No estudo 2, a compactação elevou a resistência à penetração, esforço tração e a microporosidade, e gerou redução da macroporosidade e da área mobilizada. A resistência específica operacional foi maior em solo sob compactação induzida do que sem ela. Efeito da escarificação foi encontrado em profundidade superior a escarificada.

Palavra chave: Esforços, desempenho, cisalhamento, compressibilidade.



## **ABSTRACT**

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

### **SOIL DINAMIC AND MECHANIC COMPORTATION, UNDER DIFFERENT LEVELS OF CHISEL AND COMPACTION.**

Author: David Peres da Rosa

Advisor: José Miguel Reichert

Santa Maria, February 16, 2007

Soil compaction under no-tillage system has been causing serious problems to plant growth and to agriculture machines operation due to high soil resistance to tillage. Soil chiseling is a possible solution, however, some aspects regarding permanence in time, effects on soil mechanical properties and relation to draught required by mobilization mechanisms are not clearly known. In this context, the aim of this work was to evaluate the chiseling and compaction effects on soil mechanical properties under no tillage, as well as their effects on force dynamics on mobilization mechanisms. Two studies were carried out. The first was in a clay texture soil, where the temporal effect of chiseling, traffic and their influences in compressibility, shear of soil, mobilized area and draught required by the planter's shaft of no-tillage seeder, were evaluated. The second study was carried out in sandy loam soil, where the compaction influence on soil penetration resistance, mobilized area, volume, specific operational resistance and draught on a chisel plow, were evaluated. In the first study, chiseling had direct influence on shear resistance, pre-consolidation stress, compression coefficient and draught, and its effect lasted for more than 2 years, but less than 4 years. In the second study, soil compaction increased the penetration resistance, draught and microporosity, and decreased the macroporosity and the mobilized area. The specific operational resistance was higher in soils under induced compaction than without it. The chiseling effect was found in upper layer compared to the chiseled one.

Key word: Efforts, performance, shear, compressibility,

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da área plantada sob semeadura direta no Brasil entre os anos de 1993-2004 (FEBRAPD, 2006).....	23
Figura 2 – Figura discriminativa do Escarificador.....	28
Figura 3 – Tipos de hastes escarificadoras.....	29
Figura 4 – Características dimensionais da ponteira de um escarificador. ....	33
Figura 5 – Resistência ao cisalhamento de um bloco de solo (Mckyes, 1989). ....	36
Figura 6 – Comportamento de diferentes tipos de solo na coesão e tensão cisalhante (Ashburner & Sims, 1984).....	37
Figura 7 – Curva de compressão do solo quando não sofreu pressões (Dias Jr. & Pierce, 1996).....	40
Figura 8 – Curva de compressão do solo quando sofreu pressões (Dias Jr. & Pierce, 1996).....	40
Figura 9 – Parcela com delimitação de tráfego. ....	45
Figura 10 – Montagem do anel octogonal estendido ao sulcador. ....	52
Figura 11 – Montagem do anel octogonal estendido à haste escarificadora.....	52
Figura 12 – Dinâmicas das forças atuantes em ponteiros.....	54
Figura 13 – Perfilômetro desmontável.....	55
Figura 14 – Área mobilizada por ferramenta estreita. (Fonte: Serpa & Magalhães, 1997).....	56
Figura 15 – Distribuição dos esforços ..... horizontais pelo Box plot. ....	64 64
Figura 16 - Distribuição dos esforços ..... verticais pelo Box plot. ....	64 64
Figura 17 – Curvas normalizadas dos tratamentos em estudo. ....	76
Figura 18 – Relação da tensão de cisalhamento com a tensão normal nos tratamentos em estudo na camada de 0-0,10m e 0,10-0,20m(semeadura).....	85
Figura 19 - Comportamento do esforço horizontal nos tratamentos SD e CA.....	88
Figura 20 - Comportamento do esforço vertical nos tratamentos SD e CA.....	88
Figura 21 – Box plot do esforço horizontal no SD e CA. ....	89
Figura 22 – Box plot do esforço vertical no SD e CA. ....	90
Figura 23 - Perfil do solo perante escarificação, na semeadura direta (direita) e compactação adicional (esquerda), com uma régua em centímetros. ....	91

Figura 24 – Resistência à penetração do solo sob semeadura direta com e sem escarificação (SD E; SD S/E) e compactação adicional com e sem escarificação (CA E; CA S/E).....	96
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Seqüência cultural empregada no experimento do estudo 1. ....	45
Tabela 2	- Seqüência cultural empregada no experimento do estudo 2. ....	46
Tabela 3	- Composição granulométrica do solo no estudo 1.....	46
Tabela 4	- Composição granulométrica do solo no estudo 2.....	47
Tabela 5	- Descrição do trator usado no estudo 1.....	50
Tabela 6	- Descrição do trator usado no estudo 2.....	51
Tabela 7	- Esforço horizontal ( $F_H$ ), esforço vertical ( $F_V$ ) e esforço de tração ( $F_T$ )...	61
Tabela 8	- Área de solo mobilizado e resistência específica operacional nos tratamentos em estudo.....	62
Tabela 9	- Macroporosidade( $M_a$ ), microporosidade ( $M_i$ ), porosidade total ( $P_t$ ) e densidade do solo ( $D_s$ ) nas camadas do estudo 1. ....	67
Tabela 10	- Porosidade total (em %) na camada de 0-0,10m na interação na época da colheita.....	68
Tabela 11	- Densidade do solo (em $Mg\ m^{-3}$ ) na camada de 0,10-0,20m na interação na época da colheita. ....	68
Tabela 12	- Densidade do solo (em $Mg\ m^{-3}$ ) na camada de 0-0,10m na interação na época da colheita. ....	69
Tabela 13	- Coeficiente de compressão ( $C_c$ ) e tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) nas camadas em estudo na época da semeadura e colheita. ....	71
Tabela 14	- Tensão de pré-consolidação (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0-0,10m na semeadura. ....	72
Tabela 15	- Tensão de pré-consolidação (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na semeadura. ....	72
Tabela 16	- Tensão de pré-consolidação (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na colheita. ....	74
Tabela 17	- Cisalhamento do solo (em kPa) na camada 0-0,10m e 0,10-0,20m nos tratamentos em estudo.....	79
Tabela 18	- Tensão de cisalhamento (em kPa) na tensão normal de 50kPa na interação manejo x tráfego na camada 0-0,10m, na semeadura. ....	80

Tabela 19 - Tensão de cisalhamento (em kPa) na tensão normal de 200kPa na interação manejo x tráfego na camada 0 - 0,10m, na semeadura. ....	80
Tabela 20 - Tensão de cisalhamento (em kPa) na tensão normal de 100kPa na interação manejo x tráfego na camada 0,10-0,20m, na semeadura. ....	81
Tabela 21 – Coesão (C) e ângulo de atrito interno ( $\Phi$ ) do solo na semeadura. ....	82
Tabela 22 – Coesão (C) e ângulo de atrito interno ( $\Phi$ ) do solo na colheita.....	82
Tabela 23 – Coesão do solo (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0–0,10m na semeadura. ....	83
Tabela 24 - Coesão do solo (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na semeadura. ....	83
Tabela 25 - Ângulo de atrito interno (em °) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na semeadura. ....	84
Tabela 26 – Esforço horizontal ( $F_H$ ), vertical ( $F_V$ ) e tração ( $F_T$ ) e momento ( $M_O$ ) associados à haste escarificadora. ....	86
Tabela 27 - Dados médios de área mobilizada ( $A_m$ ), área de elevação ( $A_e$ ), empolamento (Emp) e profundidade de trabalho (P), nos tratamentos em estudo. ....	90
Tabela 28 – Densidade inicial (DSI), tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) e coeficiente de compressão (Cc) em solo sob semeadura direta e compactação adicional.....	92
Tabela 29 – Densidade inicial do solo (em $Mg\ m^{-3}$ ) na interação manejo x escarificação, na camada 0,20-0,25m. ....	93
Tabela 30 – Coeficiente de compressão do solo na interação manejo x escarificação, na camada 0,20-0,25m. ....	93
Tabela 31 - Dados médios de resistência à penetração (RP) e umidade ( $\theta$ ) do solo.....	95
Tabela 32 –Macroporosidade( $Ma$ ), microposidade (Mi), porosidade total (Pt) e densidade do solo (Ds) nas camadas 0,20-0,25m e 0,25-0,30m. ....	97
Tabela 33 - Macroporosidade (em %) na interação manejo x escarificação, na camada 0,20-0,25m (estudo 2). ....	98
Tabela 34 - Microporosidade (%) na interação manejo x escarificação, na camada 0,20-0,25m (estudo 2).....	98

## LISTA DE SÍMBOLOS

A – área de contato entre o pneu/solo ( $m^2$ );	$F_V$ – esforço vertical (kN);
$A_m$ – área mobilizada ( $m^2$ );	$F_T$ – esforço de tração (kN);
$A_e$ – área de elevação ( $m^2$ );	k – kilo;
b – largura do pneu (m);	L – peso sobre o pneu (kN);
c – coesão do solo (kPa);	kg – kilograma;
CA – Semeadura direta com compactação adicional;	$M_a$ – macroporosidade (%);
CA E – Semeadura direta com compactação adicional escarificado;	$M_i$ – microporosidade (%);
CA S/E – Semeadura direta com compactação adicional sem escarificação;	$M_o$ – momento (kN m);
CV – coeficiente de variação (%);	N – neltow;
cv – cavalos;	P – profundidade de trabalho;
$C_c$ – coeficiente de compressão;	Pa – pascal;
d – diâmetro do pneu (m);	pi – pressão de inflação do pneu (kPa);
DP – desvio padrão;	Pt – Porosidade total do solo;
$D_s$ – densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ );	Re – resistência específica operacional ( $kN\ m^{-2}$ );
DSI – densidade do solo inicial ( $Mg\ m^{-3}$ );	RP – resistência à penetração (kPa);
$D_T$ – diâmetro do pneu (cm);	s – distância lateral de ruptura (m);
E1 <sub>v</sub> – Solo escarificado no verão de 2001;	SD – sistema de semeadura direta;
E3 <sub>i</sub> – Solo escarificado no inverno de 2003;	SD E – sistema de semeadura direta escarificado.
E5 <sub>i</sub> – Solo escarificado no inverno de 2005;	SD S/E – sistema de semeadura direta sem escarificação;
Emp – empolamento (%);	W – watts;
$F_H$ – esforço horizontal (kN);	$w_p$ – largura do sulco (m);
$F_m$ – esforço tração médio (kN);	$\alpha$ – ângulo de ataque ( $^\circ$ );
	$\sigma_p$ – tensão de pré-consolidação (kPa);
	$\sigma_n$ – tensão normal (kPa);
	$\theta$ – umidade volumétrica do solo ( $m^3\ m^{-3}$ );
	$\tau$ – tensão de cisalhamento (kPa);
	$\Phi$ – ângulo de atrito interno do solo;

## LISTA DE APÊNDICE

APÊNDICE A - Área experimental do estudo 1.....	116
APÊNDICE B - Cilindros usados no estudo 1.....	116
APÊNDICE C - Semeadora utilizada no estudo 1.....	117
APÊNDICE D - Escarificador com rolo destorroador.....	117
APÊNDICE E - Montagem do perfilômetro.....	118
APÊNDICE F - Prensa uniaxial.....	118
APÊNDICE G - Mesa de cisalhamento direto.....	119
APÊNDICE H - Esforço horizontal nos tratamentos sem tráfego. ....	120
APÊNDICE I - Esforço horizontal nos tratamento com tráfego.....	120
APÊNDICE J - Esforço vertical nos tratamentos sem tráfego. ....	120
APÊNDICE K - Esforço vertical nos tratamento com tráfego. ....	120
APÊNDICE L - Curva de compressão nos tratamentos e camadas em estudo.....	121
APÊNDICE M - Parâmetros empíricos da equação, para superfícies de solo consolidadas (firmes) e não consolidadas (soltas).....	122
APÊNDICE N - Ângulo de atrito interno (em °) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na colheita. ....	122
APÊNDICE O - Coesão do solo (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na semeadura. ....	122

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>12</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>14</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>15</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>18</b>
<b>2. HIPÓTESES</b> .....	<b>20</b>
2.1. Estudo 1 .....	20
2.2. Estudo 2 .....	20
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>21</b>
3.1. Objetivo específico.....	21
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1. Compactação em sistema conservacionista de manejo do solo</b> .....	<b>22</b>
4.1.1. O processo de compactação em solo sob semeadura direta .....	22
4.1.2. Compactação no “Pé-de-arado” .....	26
4.1.3. Estratégias de redução do efeito da compactação .....	27
<b>4.2. Indicadores de compactação: dinâmica solo-máquina</b> .....	<b>31</b>
4.2.1. Efeito dinâmico .....	31
4.2.2. Efeito mecânico via cisalhamento .....	35
4.2.3. Efeito mecânico via compressibilidade .....	39
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>44</b>
5.1. Caracterização da área experimental.....	44
5.2. Solo.....	46
5.3. Tratamentos e delineamento experimental empregado.....	47
5.4. Especificações das máquinas utilizadas.....	49
5.5. Esforços solicitados a mecanismo rompedor de solo.....	51
5.6. Área mobilizada, área de elevação e empolamento do solo.....	54
5.7. Resistência específica operacional .....	56
5.8. Resistência mecânica do solo.....	57
5.9. Compressibilidade do solo .....	57
5.10. Cisalhamento do solo .....	58
5.11. Propriedades físicas do solo.....	59



<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>61</b>
<b>6.1. Estudo 1</b> .....	<b>61</b>
6.1.1. Efeito da escarificação nos esforços e área mobilizada por haste sulcadora de semeadora de semeadura direta e sua influência nas propriedades físicas .....	61
6.1.2. Efeito do manejo na compressibilidade do solo .....	69
6.1.3. Efeito do manejo no cisalhamento do solo.....	78
<b>6.2. Estudo 2</b> .....	<b>86</b>
6.2.1. Influência da compactação nos esforços e na mobilização do solo por escarificador.....	86
6.2.2. Efeito da compactação na compressibilidade, resistência à penetração e propriedades físicas .....	92
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	<b>100</b>
<b>7.1. Estudo 2</b> .....	<b>101</b>
<b>8. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>103</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>115</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

As ações do manejo do solo devem ser muito bem planejadas, pois seus efeitos são responsáveis pela sustentabilidade do sistema. A semeadura direta (SD) minimizou uma série de problemas ligados a processos erosivos, porém exigiu uma reconfiguração das semeadoras agrícolas, tornando-as robustas e com órgãos ativos capazes de romper camadas compactadas de solo. Outrossim, tudo isso e mais a necessidade do aumento da capacidade operacional de trabalho, imposta indiretamente pelo sistema de agronegócio, geraram uma elevação no tamanho e peso da frota dos tratores agrícolas, contribuindo para o aumento da compactação no solo.

Além da deterioração da estrutura do solo, a compactação em solos sob SD traz consigo uma desvantagem como aumento da força por área trabalhada. Isso gera conseqüências como aumento do consumo de combustível, redução da vida útil dos mecanismos ativos do trator e da semeadora e maior desgaste de mecanismos sulcadores. Sob óptica agrônômica, tal problema gera acréscimo da densidade do solo, redução da profundidade do sistema radicular, redução da infiltração da água no solo, aumento da temperatura e outros problemas que refletem na redução da produtividade da cultura.

A magnitude desse problema pode se estender a cerca de 13 milhões de hectares, que é a área cultivada com culturas anuais no Planalto Médio da região sul do país (IBGE, 2003), da qual 75% são manejadas na sob tal sistema (Derpsch & Benites; 2004). Nessa região demográfica, no período de semeadura das culturas de verão, os solos encontram-se grande parte do tempo com umidade acima do ponto de friabilidade, em virtude da alta precipitação que ocorre nesta época do ano, gerando propensão à degradação estrutural do solo, que, aliado ao trabalho moto-mecanizado, contribui ainda mais para a manifestação dos efeitos danosos da compactação.

Como técnica/solução surge a escarificação, que promove o rompimento dessas camadas compactadas ou adensadas, mantendo mais de 2/3 da cobertura vegetal intacta (Ortiz-Cañavate & Hernanz, 1989; Marques et al., 1995).

Conforme Machado et al. (2005), por não provocar a inversão do solo, a escarificação proporciona menor desagregação, sendo que os resíduos vegetais ficam depositados na superfície, facilitando assim o controle da erosão, melhorando a infiltração, retenção de água, estrutura e a porosidade do solo.

Todavia, aspectos sobre a duração do efeito da escarificação no solo, bem como o seu efeito na dinâmica do trabalho de sulcadores e a consequência da compactação do solo no despenho de escarificadores não são claramente conhecidos.

Distintas áreas do conhecimento científico, como a área da mecânica, física, química e biológica dos solos, têm buscado indicadores e/ou avaliadores do estado de condição do solo. Porém, sob o ponto de vista físico, acredita-se que a união das áreas da mecânica do solo com a da dinâmica da máquina é o melhor indicador de tal condição.

O confronto de dados referentes a parâmetros mecânicos do solo, como tensão de pré-consolidação, coeficiente de compressão, coesão e cisalhamento do solo, com os parâmetros ligados à máquina, como a dinâmica dos esforços atuantes na ferramenta de mobilização, área mobilizada e resistência específica operacional, podem oferecer melhor explicação de todo esse processo.

É sabido que produtores agrícolas freqüentemente enfrentam problemas, ora oriundos pelo sistema de agronegócio, ora devido às intempéries, os quais desencadeiam a desestabilização do homem rural, repercutindo na desestruturação da economia da cidade, é importante o estudo de técnicas de aperfeiçoamento do uso do solo e da mecanização agrícola, para gerar maximização dos lucros e da sustentabilidade ambiental.

Devido a esses fatores, realizaram-se dois estudos, estudo 1, com objetivo de analisar o efeito temporal da escarificação no solo de textura argilosa e de verificar sua influência no desempenho de mecanismo sulcador de semeadora de plantio direta do tipo facão; e estudo 2, para avaliar a influência da compactação na dinâmica de esforços em escarificador e verificar a presença de compactação no pé-de-arado em solo com textura franco arenosa.

## **2. HIPÓTESES**

### **2.1. Estudo 1**

Solo argiloso escarificado oferece menor demanda de esforços e maior área mobilizada por mecanismo sulcador do tipo facão, sendo que, com o aumento do período da realização da escarificação esses parâmetros sofrem inversão em seus valores.

O aumento no nível da compactação no solo tende a aumentar a tensão de pré-consolidação, reduzir o coeficiente de compressão e aumentar a tensão de cisalhamento, gerando uma condição adversa para o desenvolvimento da cultura.

A tensão de pré-consolidação, coeficiente de compressibilidade, resistência ao cisalhamento, juntamente com os dados de esforços, são bons indicadores do estado de compactação do solo.

Solo sob sistema de semeadura direta requer maior esforço por área trabalhada do que solo escarificado.

A 0,10m da lateral pneu, encontra-se influência direta do tráfego nas propriedades mecânica do solo, e na dinâmica da máquina.

O efeito residual da escarificação no solo perdura até dois anos.

### **2.2. Estudo 2**

A compactação induzida em solo de textura franco arenosa aumenta a tensão de pré-consolidação e o requerimento de esforços em haste escarificadora.

A compactação do solo gera redução da área mobilizada, área de elevação e da profundidade escarificada em solo de textura franco arenosa.

Abaixo da profundidade escarificada encontra-se uma zona compactada em solo de textura franco arenosa sob semeadura direta, originada pela geometria da ponteira de escarificador.

### **3. OBJETIVOS**

O objetivo geral deste estudo foi verificar a influência da compactação, escarificação e tráfego de máquinas e implementos agrícolas nas propriedades mecânicas do solo e na dinâmica da relação máquina-solo, bem como analisar o efeito tempo da escarificação no solo.

#### **3.1. Objetivo específico**

- Quantificar as componentes de forças verticais, horizontais e o momento associado ao mecanismo sulcador de semeadora de plantio direto do tipo facão;
- Analisar o desempenho de mecanismos sulcador do tipo facão em solo com níveis diferenciados de escarificação, através da mensuração da área mobilizada, área de elevação, empolamento do solo e resistência específica operacional;
- Caracterizar o efeito residual da escarificação no solo;
- Identificar a influência da compactação no desempenho de escarificadores, através dos dados de esforços, de perfilometria e de dados compressivos;
- Verificar a presença de compactação abaixo da profundidade de trabalho de escarificador, bem como identificar a que profundidade a compactação ocorre de maneira mais significativa;
- Verificar a viabilidade do uso de parâmetros compressivos (como pressão de pré-consolidação e coeficiente de compressão) e parâmetros cisalhantes (tensão de cisalhamento e coesão do solo) na caracterização do estado de compactação do solo;
- Avaliar em que sentido (horizontal ou vertical) a compactação do solo ocorre de maneira mais efetiva.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1. Compactação em sistema conservacionista de manejo do solo**

#### **4.1.1. O processo de compactação em solo sob semeadura direta**

Após vários anos sob sistema convencional, o sistema de semeadura direta (SD) surge no Brasil na década de 70, começando a ser empregado na região sul do País, sendo expandido para o cerrado na década de 80 (Borges Filho, 2001).

Inicialmente com uma evolução lenta, o SD encontrou restrições ao seu uso, devido à falta de conhecimento, por grande parte dos agricultores e pesquisadores, sobre seu impacto no solo e na produtividade da cultura. Aliado a isso, a falta de equipamentos para sua implantação, contribuía para tal restrição.

Posteriormente, a partir da década de oitenta, o sistema começou a se expandir, resultado do avanço da tecnologia nas máquinas agrícolas, progresso das pesquisas com herbicidas e outros fatores que contribuíram para ampliação do conhecimento de tal sistema. Sob o slogan de sistema conservacionista, o SD surge como uma das maiores tecnologias no meio científico na área da ciência agrária, pois reduziu notadamente os problemas erosivos provocados pelo sistema convencional.

Ao manter os restos vegetais das culturas anteriores sobre a superfície do solo, esse sistema proporciona vários benefícios tais como: maior retenção da umidade (Salton & Mielniczuk, 1995), possibilitando à cultura uma maior resistência a veranicos e a períodos de seca; redução da erosão do solo (Didoné et al. 2002), diminuindo a perda de solo e fertilizantes, que contribuem para sustentabilidade ambiental do sistema; aumento da matéria orgânica, que desencadeia melhorias na estrutura física, CTC (capacidade de troca de cátions), bem como aumento da capacidade de retenção da água no solo (Centurion & Demattê, 1985), sendo que a matéria orgânica atua na estabilização de agregados (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Paladini & Mielniczuk, 1991); estímulo à microfauna (induzida pela redução dos picos de variação térmica), o qual tem como função a produção de elementos que são responsáveis pela estabilização dos agregados (Henklain, 1997).

Contudo, após alguns anos sob esse sistema conservacionista, sob o ponto de vista físico e mecânico, o solo está apresentando problemas de compactação sub-superficial, os quais se agravam pelo não revolvimento do solo, restrito à linha de semeadura, atuando em profundidades superficiais (em torno de 0,13m); aumento no tamanho da frota de tratores e semeadoras, repercutindo no aumento da carga da máquina ao solo; umidade inadequada quando na implantação das culturas (Silva et al., 1984); e utilização inadequada da pressão de inflação dos pneus agrícolas (Richart et al., 2005; Tessier & Lague, 1991; Håkansson & Danfors, 1981).

No Brasil, a pressão imputada pelo sistema econômico desencadeou um aumento efetivo na capacidade operacional de trabalho, ou seja, aumento da capacidade de trabalho moto-mecanizado em menor espaço de tempo, necessitando para tal, um aumento no tamanho das máquinas, que por sua vez gerou um aumento da carga no solo e aliado a esses fatores, o uso inadequado de pneus que, muitas vezes estão calibrados com pressão de inflação imprópria, aumentam a carga transmitida pela máquina agrícola ao solo.

Face a grande difusão do sistema de semeadura direta, conforme se pode observar na figura abaixo (Figura 1), o qual em 10 anos apresentou uma expansão de 730%, toda essa problemática envolta nesse sistema pode estar potencialmente estendida por toda esta área de 21,863 milhões de ha.

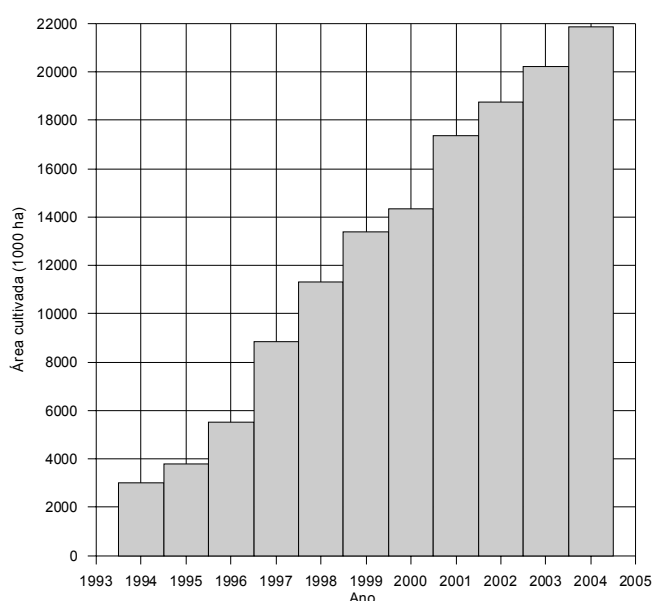


Figura 1 - Evolução da área plantada sob semeadura direta no Brasil entre os anos de 1993-2004 (FEBRAPD, 2006).

Toda ação de fonte antrópica pode ser grande potencializadora de compactação, se executada de forma errônea. Assim sendo, deve-se planejar toda ação sobre o solo, para minimizar esses riscos; para tanto, necessita-se saber como funciona o processo de compactação no solo.

Definida com uma redução de volume do solo, a compactação é originada por duas fontes principais, internas e externas. Como fonte interna ou fontes de origens naturais, Cohron (1971) cita as forças envolvidas nos processos de umedecimento, secagem e congelamento. Como fonte externa ou fontes de origens mecânicas, o mesmo autor menciona as fontes originadas por veículos agrícolas e implementos, sendo a fonte externa, a mais influente em tal processo.

Resumidamente, a compactação no solo é dependente de dois fatores principais: resistência mecânica do solo, influenciada por propriedades intrínsecas ao solo como textura e conteúdo de matéria orgânica (Larson et al., 1980; Hettiaratchi, 1987), estrutura (Horn & Lebert, 1994); conteúdo de água (Guérif, 1984) e exposição do solo ao tráfego. Como segundo fator, tem-se a dependência ao carregamento do veículo agrícola, sendo esse, correlacionado à grandeza da carga axial, dimensões e pressão do pneu, à velocidade e à interação solo-pneu (Koolen & Kuipers, 1983; Lebert et al., 1989). Aliado a isso, Reinert (1990) salienta a importância do conhecimento do histórico de tensão do solo, no desenvolvimento da compactação.

Porém o entendimento da compactação é complexo, pois envolve distintas áreas do conhecimento das ciências agrárias, como a área da física, química, biológica e mecânica do solo. Segundo Terzaghi & Peck (1948) este processo tem sido modelado desde meados de 1928.

Os problemas oriundos da compactação se manifestam no solo, que repercutirá no desempenho dos implementos agrícolas e na planta.

No solo compactado há redução da infiltração de água, com conseqüente aumento do escoamento superficial, podendo causar redução do teor de água do solo para desenvolvimento da planta (Trowse, 1971); redução da capacidade de aeração, ocasionado pela redução do espaço de vazios no solo; diminuição da permeabilidade, gerado pela redução dos macroporos e aumento da densidade, provocando impedimento mecânico que limita o crescimento do sistema radicular (Beltrame & Taylor, 1980).



Sob ponto de vista da planta, o efeito ocorre de forma indireta, podendo ser visualizado por características morfológicas da cultura, como as reduções na altura da planta e no diâmetro das raízes.

A ação de cargas externas no solo tende a formar camadas compactadas em formato laminar, ou seja, no sentido horizontal, com isso o sistema radicular demonstra dois comportamentos principais, expresso pelo menor comprimento, devido à alta resistência à ruptura oferecida pelo solo, limitando a propagação do sistema para camadas mais profundas e diâmetro reduzido, ou seja, raízes finas. Outro comportamento do sistema radicular dá-se na configuração concentrada no sentido horizontal, pois as raízes se desenvolvem nos planos de fraquezas horizontais conforme estudo de Barbieri et al. (1985) em Latossolo roxo.

A compactação, quando em nível restritivo, pode reduzir a produtividade da cultura, Suzuki (2005) encontrou influência direta da compactação na redução da produtividade do milho, sendo que estas culturas também apresentaram redução em sua altura e no comprimento radicular.

Outros autores, como Grable (1966), Unger & Kaspar (1994) e Alvarenga et al. (1996) e, concluíram que tais mudanças estão associadas à habilidade das raízes em penetrar nos solos compactados. Beutler et al. (2004), avaliando a influência da compactação na produtividade e altura do sistema radicular em arroz de sequeiro, encontrou redução na produtividade e restrição ao crescimento das raízes.

Sob o ponto de vista da máquina, a compactação gera efeito direto, podendo ser constatado pelo aumento da força de tração, visualizado pelo aumento da patinagem do trator, incidindo em desgaste nos mecanismos do trator, aumento no consumo de combustível, proporcionando redução da lucratividade de uma lavoura; redução da profundidade de semeadura; corte irregular da cobertura vegetal, ocasionado pela redução do desempenho do mecanismo sulcador (Klein, 1990).

Segundo Casão Junior et al. (1998), a compactação no solo tende a gerar aumento na demanda de tração da semeadora, sendo em muitos casos, o trator não possui reserva de torque suficiente para esse trabalho. Segundo o autor, esse aumento na tração, gera uma série de adaptações nas semeadoras para tais condições de solo.

Estudando a influência da compactação em solo com textura franco argilo arenosa no trabalho de ferramentas de mobilização (escarificador com disco acoplado) em caixa de solo, Sahu & Raheman (2006) encontraram aumento no

esforço de tração com aumento da compactação, chegando a diferenças de 1,50kN na profundidade de 0,10m, quando a condição de compactação do solo passou de 826kPa para 1219kPa.

#### 4.1.2. Compactação no “pé-de-arado”

Termo comumente empregado no meio científico, o “pé-de-arado” ou “pé-de-grade”, se refere à compactação na soleira dos implementos de mobilização. Dependendo de sua grandeza pode impedir o aprofundamento do sistema radicular e também diminuir a infiltração de água no solo.

Parâmetros ligados as características geométricas do implemento possuem influência direta na formação dessa compactação. Em implementos de mínima mobilização, tais como escarificadores, a geometria da ponteira é uma vem a ser uma das principais responsáveis no formato do corte, bem como na compactação abaixo da profundidade de trabalho. Cohron (1971), descrevendo as ações de ferramentas estreitas no solo, cita que este tipo de implemento pode gerar compactação localizada abaixo da linha escarificada. Gill & Vanden Berg (1967), citam que o ângulo de ataque (ângulo formado entre a ponteira ao solo) possui influência na grandeza da força vertical que atua sobre a ponteira, podendo contribuir para a variação dessas, afetando a profundidade de trabalho.

O pé-de-arado é facilmente encontrado em solos sob sistema convencional, no qual é utilizada uma série de implementos de revolvimento intensivo, como grades e arados, demandam uma maior tração. Aliados a isso, proporcionam a pulverização do solo rompendo os agregados, refletindo em menor capacidade de suporte, deixando o solo mais suscetível a formação de compactação na soleira desses implementos. Bertin et al. (2004) encontraram pé-de-arado em solo sob semeadura convencional, manifesto na redução da macroporosidade na camada de 0,075-0,15m, sendo 8,20% no sistema convencional contra 12,30% no sistema de semeadura direta com *Pennisetum americanum* (milheto)/milho.

Alvarenga et al. (2004) também encontraram formação do pé-de-grade em Latossolo Vermelho, devido ao uso de grade aradora, o qual demonstrou maior valor

de densidade do solo na camada entre 0,10-0,15m, visto que esse implemento atuou em profundidade em torno de 0,10m. O mesmo autor encontrou esse mesmo fenômeno no tratamento com arado de disco, porém na profundidade de 0,15m, pois esse implemento operou até essa profundidade.

No Brasil são poucos trabalhos que tentam abordar o estudo da presença de compactação abaixo da linha de trabalho, sendo pouco expressivo a nível mundial. Até o momento a grande maioria dos pesquisadores, como Godwin (1974, apud Mckyes, 1989), Mckyes (1989), Santos & Lanças (1993), Santos (1994), Desbiolles et al. (1997), Serpa & Magalhães (1997) detiveram-se em modelar o formato do volume de solo mobilizado ao longo do deslocamento da haste escarificadora, ou avaliar o desempenho de escarificadores.

#### **4.1.3. Estratégias de redução do efeito da compactação**

Sob a óptica do sistema conservacionista, o escarificador é um implemento que tem sido amplamente empregado em solos sob semeadura direta (SD), pois tal implemento consegue mobilizar o solo, mantendo mais de 2/3 da cobertura superficial intacta (Ortiz-Cañavate & Hernanz, 1989), obtendo mínima inversão da superfície natural.

Com uso de escarificadores em solo sob semeadura direta tem-se o chamado *cultivo reduzido* ou *cultivo mínimo*, nomenclatura comumente empregada por pesquisadores da área das ciências agrárias (Casão Junior et al. 1998; Abreu et al., 2004; Silva et al., 2004; Machado et al., 2005, Richart et al., 2005).

Utilizado para romper camadas compactadas ou adensadas, o escarificador, além de proporcionar mínima inversão superficial, diminui a pulverização do solo, resultando segundo Mazuchowski & Derpsch (1984), em menores riscos de erosão; ao manter a cobertura vegetal sob a superfície, há uma redução do impacto da gota da chuva, resultado da perda de energia mecânica (energia cinética + energia potencial) ao entrar em contato com tal cobertura, acarretando em redução da erosão hídrica (Derpsch, 1984) e eólica (Machado et al., 2005)

Tal processo consiste em mobilizações de até 0,30m de profundidade. Vale ressaltar a diferença entre escarificador e subsolador, o subsolador possui os

mesmos mecanismos do escarificador, porém são mais robustos, uma vez que este implemento atua a profundidades de até 0,60m. Na figura 2 estão ilustrados os constituintes do escarificador. Esse implemento é composto por uma estrutura porta ferramentas, tendo diferentes formatos, podendo ou não possuir rodas de controle de profundidade, possui hastas escarificadoras, podendo ser de três tipos: retas, curvas ou parabólicas (Figura 3); e em sua extremidade encontra-se a ponteira, podendo ser reta (antigamente chamadas de Cinzel) ou alada. A configuração dos subsoladores é a mesma, porém como já informado, diferem na robustez.

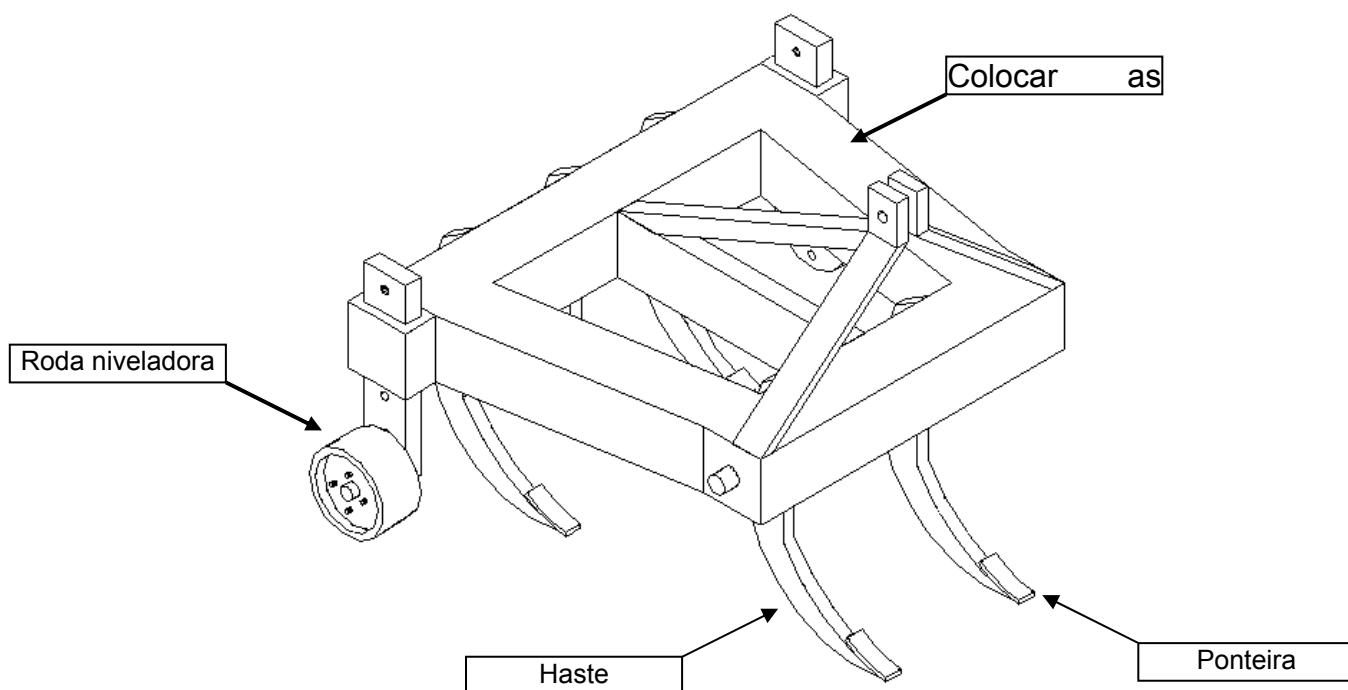


Figura 2 – Figura discriminativa do Escarificador.

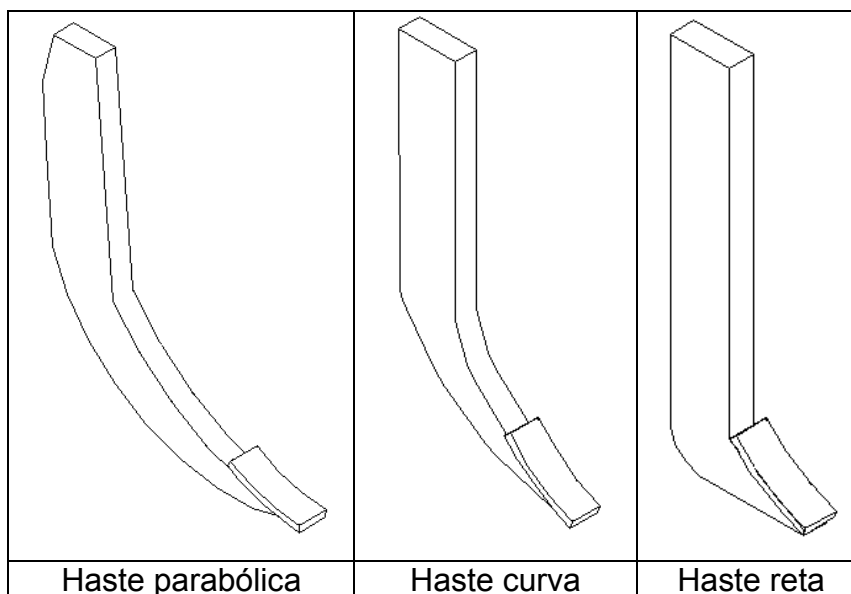


Figura 3 – Tipos de hastas escarificadoras.

Segundo Taylor & Beltrame (1980), o rompimento de camadas compactadas do solo traz benefícios imediatos expressos pela redução da densidade do solo, que diminui a resistência à penetração das raízes; e aumento no volume de macroporos, que melhora a aeração e a drenagem interna do solo, permitindo infiltração mais rápida da água, que por sua vez reduz o escoamento superficial e o tempo de encharcamento do solo.

Em relação à aração, a escarificação apresenta vantagens, expressas pela melhor condição estrutural do solo, resultado da mínima mobilização e manutenção da cobertura vegetal, que atua na capacidade de troca de cátions e na amenização da variação da temperatura do solo, que por sua vez repercutirá na atividade microbiológica; redução da erosão, ocasionado pela redução da pulverização do solo.

Adicionado ao anterior, Mazuchowski & Derpsch (1984) citam que ao manter a maior parte da cobertura vegetal, favorece a permeabilidade do solo à água e ao ar, eliminando plantas invasoras, permitindo uma semeadura adequada.

Comparando tipos de manejo do solo com textura franco arenosa, Abreu et al. (2004) encontraram menor resistência à penetração (penetrômetro) em solo escarificado do que solo sob semeadura direta, sendo o escarificador mais eficiente na ruptura da camada compactada, e estabelecimento de poros condutores de água, do que os solos sob "escarificação biológica" e semeadura direta.

Estudando a influência do tipo de manejo no sistema radicular da cultura do feijão, em solo franco arenoso, Reichert et al. (2003) encontraram no cultivo mínimo, concentração de raízes até 0,25m, no SD concentravam-se em 0,05-0,15m, já no sistema de preparo do solo convencional não houve restrição para o desenvolvimento radicular. Araújo et al. (2004) encontraram maior aeração e porosidade total na camada de 0-0,15m, em solo escarificado do que solo sob semeadura direta há mais de 13 anos.

Pesquisas com a cultura do milho mostraram aumento no rendimento quando executada a subsolagem para o rompimento de camadas compactadas, gerando redução da densidade do solo, conforme se observa nas conclusões obtidas por Abu-Hamdeh (2003), que trabalhou em solo franco argiloso submetidos a três condições de compactação (0, 8 e 19Mg por eixo).

Porém, com todas estas informações, há uma falta de informação sobre o tempo de duração da escarificação. Em relação ao efeito do tempo de escarificação no solo sob SD, Secco & Reinert (1997), concluíram que a permanência desse efeito no solo (Latosolo vermelho) chega até 10 meses após o preparo, proporcionando melhor porosidade total e maior rugosidade superficial. Contudo, Mahl et al. (2004) não encontraram mais efeito desse em Nitossolo vermelho depois de 18 meses, nos parâmetros de força de tração, potência na barra de tração, consumo de combustível e capacidade de campo efetiva. Semelhantemente, Silva et al. (1990) após 2 anos de avaliação do solo em experimento em pomares de laranja, encontraram condições muito próximas entre áreas com e sem subsolagem.

Outrossim, Botta et al. (2006), investigando a duração da ação do escarificador e subsolador no solo, relataram que esses implementos possuem um efeito de redução imediata dos problemas oriundos da compactação. Porém, após dois anos de realização da escarificação e da subsolagem, com intensidade de tráfego maior que  $95\text{Mg km ha}^{-1}$ , houve uma re-compactação na camada de 0,30-0,60m, sendo que a profundidade de trabalho foi de 0,45 e 0,28m, respectivamente pelo subsolador e escarificador. Esses autores concluíram que a frequência da ação desses implementos deve ser de dois anos.

Já Pierce et al. (1992), trabalhando em solo franco-arenoso, concluíram que o efeito da escarificação pode diminuir em solo sob SD, mas persiste, pois encontraram efeito residual da escarificação após dois anos. Em solos argilosos, Taylor & Beltrame (1980) concluíram que a subsolagem pode perdurar por até

quatro anos, mediante a observação de algumas condições ideais de operação, como o teor de água no solo, velocidade de deslocamento, profundidade de trabalho, número de hastes e a potência do trator.

Em 2003, Mahl et al. descrevem a ação do processo em duas etapas, no início, após quatro meses o solo oferece baixa resistência à penetração até a profundidade que atuou o escarificador (0,30m), sendo que após 18 meses esse fenômeno ocorre somente na camada superficial (0,05-0,10m), demonstrando que o efeito tende a durar em torno de um ano e meio. Constata-se um cenário conflitante a cerca do efeito temporal da escarificação.

A escarificação no solo pode ser expressa quantitativamente por tensões de ruptura, também chamadas de tensões cisalhantes, as quais se transmitem a um dado volume de solo, sendo proporcional à velocidade do conjunto trator-escarificador, porém até o momento não se sabe, se estas são transmitidas a profundidades superiores à profundidade escarificada.

O comportamento principal do solo perante tal processo é descrito por Cooper (1971) como: 1) rompimento de agregados e torrões do solo, devido à inserção da ferramenta de preparo ao solo; 2) compressão do solo, respectivo à força aplicada ao solo e sua resistência ao movimento do implemento; 3) cisalhamento em razão da tensão resultante de forças compressivas; 4) aceleração devido ao transporte do solo ao longo da ponteira, dependente do formato da ferramenta e do tipo de solo.

No Rio Grande do Sul em especial, o uso de escarificador pode possuir grande importância, visto que mais de 21 milhões de hectares foram manejados sob semeadura direta no ano de 2004 (FEBRAPD, 2006), podendo essa área estar sob o efeito danoso proporcionado pela compactação.

## **4.2. Indicadores de compactação: dinâmica solo-máquina**

### **4.2.1. Efeito dinâmico**

O objetivo principal do uso de implementos agrícola é desenvolver um bom cenário para o desenvolvimento de uma cultura, ou seja, propiciar uma condição

satisfatória para o crescimento do sistema radicular que repercutirá no aumento da produção. Porém, tudo isso deve ser planejado adequadamente, a fim de permitir uma boa interação entre os sistemas considerados, solo-planta-máquina-atmosfera.

A dinâmica da máquina-solo envolve conhecimentos mecânicos, vinculados à máquina agrícola, e conhecimentos de comportamento do solo. Esses conhecimentos devem ser analisados conjuntamente, visto que esses possuem interação contígua. Academicamente, é considerada parte de dinâmica de solos.

Segundo Machado (2001), a análise desta relação necessita de conhecimentos da resistência que o solo oferece à ação da ferramenta que visam sua mobilização; conhecimento das interações que ocorrem entre os diversos parâmetros físicos do solo e sua relação com o esforço de tração; e comportamento do solo frente a cargas compressivas.

Qualquer ferramenta de mobilização de solo está sujeita a três sistemas de forças: a força peso atuante no centro de gravidade do implemento, a força do solo atuante na ferramenta e a força que atua entre a ferramenta e o movimento principal do implemento (Gill & Vanden Berg, 1967). Segundo esses autores, essas forças são afetadas diretamente pelas condições de solo, formato e movimento da ferramenta.

Este sistema de força pode ser reduzido a uma força e um momento, facilitando dessa maneira sua mensuração, sendo mais preciso na determinação da resultante do processo (Vanden Berg, 1966 apud Machado, 1992).

O comportamento da ferramenta de mobilização pode ser descrito pela distribuição das forças atuantes na ponteira, ou seja, esforço de tração, esforço vertical e momento. Na figura 4 estão ilustrados os parâmetros que influenciam este sistema, os quais estão ligados a características dimensionais do equipamento, como ângulo de ataque ( $\alpha$ ) e largura da ferramenta (L), (Gill & Vanden Berg, 1967). A profundidade de trabalho, largura da ferramenta, a coesão do solo, ângulo de atrito interno do solo, o volume de solo de elevação e ângulo de adesão solo-ferramenta são outros parâmetros de influência nas forças atuantes na ponteira de ferramentas de mobilização (Payne, 1956).



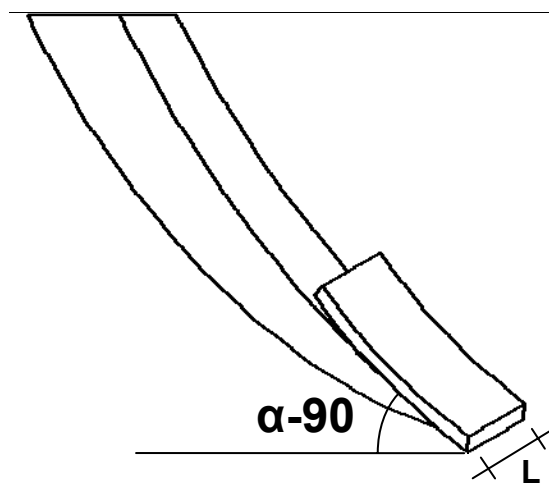


Figura 4 – Características dimensionais da ponteira de um escarificador.

Uma das condições do solo que afeta os esforços é o conteúdo de água, pois afeta a coesão, a adesão e o ângulo de atrito interno do solo (McKyes, 1985), parâmetros responsáveis por sua ruptura. Aliado a isto, Machado et al. (1996) comentam que na condição de alto teor de água na condição de plasticidade, o agregado em vez de romper ao longo do plano de fratura do solo, é comprimido, alterando sua forma, podendo resultar na compactação desse.

Avaliando desempenho de sulcadores de semeadora em Latossolo Roxo, Casão Jr. et al. (2000) encontraram aumento na área mobilizada quando o trabalho foi executado em condições de consistência plástica (umidade em torno de 37,70%) e abaixo da friabilidade do solo (32,00%), já em estado friável não encontraram tal efeito. Outros autores, como Santos & Lanças (1993), encontraram efeito similar com subsoladores.

Outro fator que possui influência na demanda de esforços em escarificadores e sulcadores é o tipo de solo, particularmente sua textura, pois um solo argiloso favorece ao agregado uma estrutura mais resistente, devido à área superficial específica, originando um aumento na força de ruptura desse, que reflete no aumento do esforço. Oliveira et al. (2000), trabalhando em dois solos, Podzólico Vermelho amarelo câmbico (textura com teor maior de areia) e Latossolo Vermelho amarelo (textura com teor maior de argila), encontraram maiores patinagem, consumo de combustível e maior demanda de potência em solo Podzólico atribuída a sua maior densidade.

Trabalhando com diferentes sulcadores, Collins & Fowler (1996) encontraram aumento nos esforços com o aumento do teor de argila, pois solo de argila pesada

proporcionou esforço médio de  $3179\text{N m}^{-1}$ , contra  $2692\text{N m}^{-1}$  do solo franco argiloso e  $2567\text{N m}^{-1}$  do solo franco arenoso.

Em escarificador com ponteira estreita atuando a uma velocidade de  $4,31\text{kmh}^{-1}$ , dotado de 7 hastes curvas espaçadas  $0,355\text{m}$ , a uma profundidade de  $0,35\text{m}$ , Santos (1994) encontrou força média de  $16,03\text{kN}$  em Latossolo vermelho escuro. Serpa & Magalhães (1997), trabalhando em solo com maior teor de argila, Latossolo roxo, encontraram  $25,54\text{kN}$  na velocidade de  $4,73\text{km h}^{-1}$  com 5 hastes. Em Latossolo vermelho distroférico típico ( $67,90\%$  de argila), Silveira et al. (2005) analisando a demanda de potência da semeadora adubadora (Imasa Plantum 8) com sulcador tipo facão, em Latossolo vermelho distroférico típico, depararam-se com valores de  $14,72\text{kN}$ , a uma velocidade em torno de  $5,28\text{km h}^{-1}$ , sendo  $4,26\text{kN}$  por linha. Em Argissolo, Cepik et al. (2005) encontraram menores, demonstrando  $1\text{kN}$  por linha em semeadora adubadora de 5 linhas com sulcador facão, atuando a  $5,60\text{km h}^{-1}$ .

Condizentes com esses pesquisadores, Al-Suhaibani & Al-Janobi (1997) encontraram redução nos esforços quando diminuiu o teor de argila e aumentou o de areia.

O manejo agrícola também possui influência nos esforços, uma vez que é responsável pelas alterações estruturais que ocorrem no solo. Furlani et al. (2004), avaliando a intervenção do sistema de preparo no comportamento dos esforços em semeadora adubadora de precisão dotada de sulcador tipo facão, em Nitossolo Vermelho distrófico latossólico, encontraram maior força de tração em solo escarificado, do que solo sob semeadura direta e preparo convencional.

Já Furlani et al. (2005) não encontraram diferença nos esforços de tração em solos sob sistemas de preparos utilizados, convencional, semeadura direta e cultivo mínimo em Latossolo vermelho escuro eutrófico. Similarmente, Mahl et al. (2004) também não encontraram diferença em Nitossolo sob semeadura direta e solo escarificado há 18 meses antes.

Estudando a influência de níveis de compactação no desempenho do sulcador, Souza et al. (2005) verificaram que a compactação diminuiu a profundidade de trabalho da haste sulcadora, sendo este fato, responsável pelo comportamento semelhante na demanda de força de tração entre os níveis estudados.

Verifica-se, portanto, a existência de divergência entre pesquisadores, pois toda essa divergência gira em torno do tempo residual da escarificação no solo. Sendo

que parâmetros de operação como profundidades de semeadura, velocidade de operação, possuem influência direta nos esforços.

Visto que o sistema de preparo convencional do solo foi praticamente eliminado em quase todo o território gaúcho, sendo substituído por técnicas conservacionistas, a correta avaliação dos esforços proporcionados pelos mecanismos rompedores de solo em semeadoras e em escarificadores pode possibilitar a identificação de um adequado sistema de uso.

#### **4.2.2. Efeito mecânico via cisalhamento**

O efeito prejudicial da compactação no solo, que, segundo Yavuzcan et al. (2002), aproximadamente 80% dessa é originada no primeiro tráfego do pneu do trator agrícola, é dependente da resistência interna do solo, ou seja, da resistência ao cisalhamento.

Qualquer ruptura no solo ocorre sob forma cisalhante. A tensão de cisalhamento teve sua primeira descrição na área da engenharia civil, no ano de 1914 por Otto Mohr (citado por Bueno & Vilar, 1980), que aplicou sua teoria de ruptura ao solo, baseada na existência de curvas envolventes no plano de ruptura. Após associada à pressuposição de Coulomb, de que a envoltória era uma reta, originou-se o critério de resistência de Mohr-Coulomb.

Na área agrícola, particularmente em solos, o cisalhamento não tem um comportamento facilmente descrito como em uma estrutura de metal (aço ou ferro), cuja interação mecânica é facilmente conhecida pelo comportamento de seus átomos. Ao contrário, o solo é composto por diversos minerais, que são influenciados por fatores de origem climática, antrópica e edáfica. Sendo assim, não se pode assumir um único valor para determinado solo.

Sua definição pode ser descrita vetorialmente, conforme Jaeger (1956 apud Gill & Vanden Berg, 1967). Vetorialmente, o conceito de cisalhamento é descrito pela ação de dois vetores, tensão normal e cisalhante (tensão tangencial) que atuam em todos os percursos do plano de ruptura.

Considerado por Baver et al. (1972), McCormack & Wilding (1979) e Machado (2001) o principal parâmetro dinâmico explicativo da interação solo-máquina, o

cisalhamento pode ser definido como a tensão oferecida pelo solo quanto há ruptura. Segundo Mckyes (1989), Coulomb foi o primeiro pesquisador a descrever a resistência ao cisalhamento, sendo sua metodologia utilizada até os dias de hoje, comumente conhecida com Lei de Coulomb. Coulomb descreveu a ação do cisalhamento por duas componentes principais, atrito e coesão. A coesão (entre partícula) é a parte que não depende da tensão normal (tensão perpendicular ao corpo), sendo medida diretamente na ruptura entre os dois corpos, ou seja, o valor da tensão de cisalhamento quando a tensão normal é nula. Já o atrito (inter partícula), é dependente da tensão normal, sendo proporcional a essa. Na figura 5 está demonstrada a atuação das tensões envolvidas quanto há ruptura por cisalhamento.

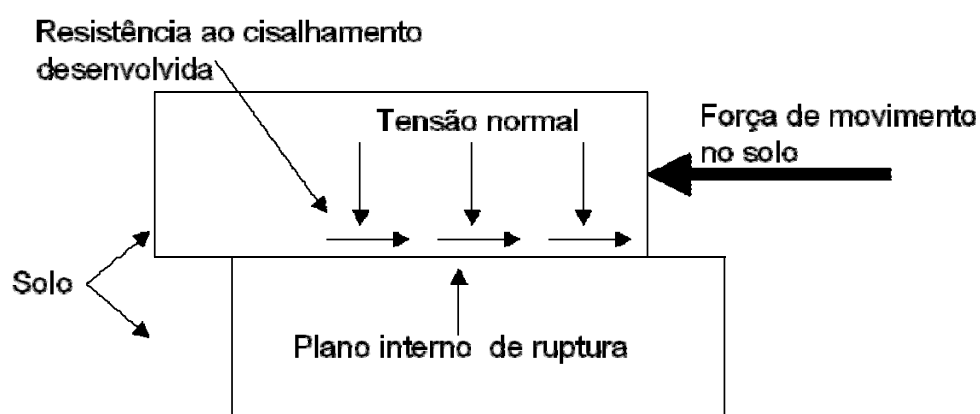


Figura 5 – Resistência ao cisalhamento de um bloco de solo (Mckyes, 1989).

Na figura 5 pode-se identificar a origem das tensões tangenciais no plano entre os corpos, o qual se opõe à força que está causando movimento no solo, sendo nomeadas como tensões cisalhantes.

A tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) está diretamente relacionada com os contatos existentes entre as partículas do solo, que dependem da origem do material e dos processos naturais de umedecimento e secagem, o qual vai atuar no afastamento ou não das partículas. Lambe & Whitman (1969) acrescentam a dependência da natureza química e física da superfície das partículas. Também mencionam que a resistência ao cisalhamento é proporcional à tensão normal, pois se há redução da força normal aplicada um agregado, a resistência ou número de contatos entre partículas reduzem, ocasionando à diminuição da  $\tau$ .

Relacionado aos processos naturais, McCormack & Wilding (1979) encontraram redução na resistência ao cisalhamento entre o mês de abril a outubro em todo o perfil do solo, devido ao processo de umedecimento e secagem do solo, reafirmando a dependência também verificada por Machado (2001).

Os parâmetros da resistência ao cisalhamento, isto é, coesão e ângulo de atrito interno do solo, são estimados pela equação de Coulomb, descrita abaixo equação 1:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \theta \quad (1)$$

Onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento,  $c$  é a coesão,  $\sigma_n$  tensão normal e  $\tan \theta$  é o coeficiente de atrito interno do solo, cujo arco tangente é o ângulo de atrito interno do solo.

A textura afeta diretamente a coesão do solo. Solo de textura franca (Figura 6) apresenta maior coesão e tem alto atrito interno, já solo arenoso em estado seco, não apresenta coesão, porém oferece maior atrito, e solo argiloso em estado plástico proporciona coesão, mas não oferece atrito (Ashburner & Sims, 1984).

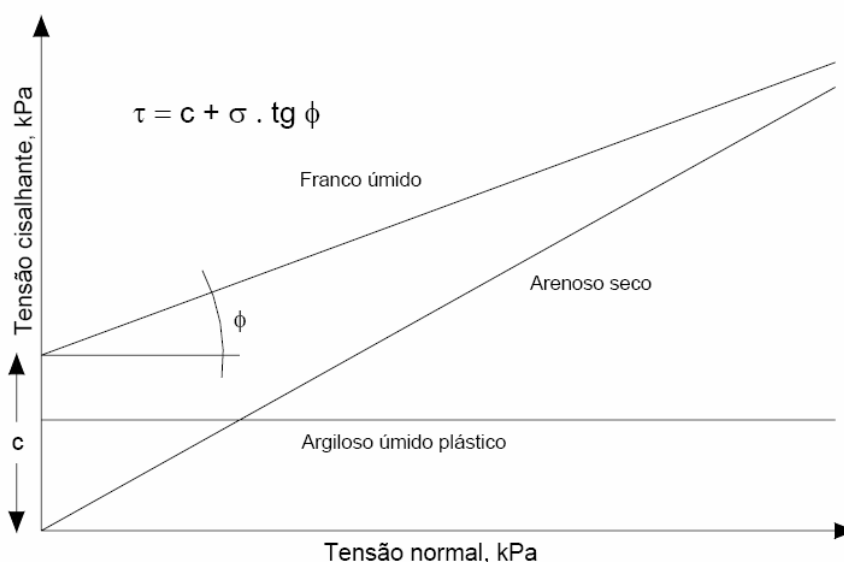


Figura 6 – Comportamento de diferentes tipos de solo na coesão e tensão cisalhante (Ashburner & Sims, 1984).

Investigando influência do uso e manejo em Latossolo vermelho distrófico, assim como os estados de consistência sobre o comportamento da estrutura de solos agrícolas, Silva et al. (2004) encontraram diferenças entre Cerradão (CE) sem

intervenção antrópica, semeadura direta (SD) com quatro anos de instalação, e preparo convencional (PC) cultivado há 15 anos com soja. O menor atrito interno do solo e maior coesão (antigamente chamada coesão aparente) oferecida pelo sistema de SD, especificamente nos teores de água de 0,16 e 0,27kg kg<sup>-1</sup> (trabalhando na faixa friável do solo). Esses dados levaram aos autores a concluir que o SD conferiu a maior possibilidade de preservação da sustentabilidade do solo em estudo. Yavuzcan et al. (2002) encontraram menor resistência ao cisalhamento em Cambissolo sob sistema convencional do que sob sistema reduzido.

Contraditório a esses, Brandt (2005) não encontrou diferença entre os sistemas de semeadura direta consolidada há 13 anos, preparo convencional com um ano, preparo convencional em 6 meses, escarificado há 3 anos, escarificado há 2 anos e escarificado há seis meses, em solo com textura franca arenosa, Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico.

Outro fator influenciante nos parâmetros cisalhantes é a matéria orgânica, conforme constatado por Braidá (2004). Trabalhando em Nitossolo Vermelho distrófico de textura argilosa e um Argissolo vermelho amarelo arênico de textura franco arenosa, encontrou em ambos, diminuição do ângulo de atrito interno com o aumento o teor de matéria orgânica do solo. A coesão, contudo não mostrou tal dependência, sendo influenciada apenas pela umidade, pois decresceu com o aumento dessa.

Além desses fatores explícitos, McCormack & Wilding (1979) listaram outros parâmetros por ordem de influência na resistência ao cisalhamento, sendo primeiramente o conteúdo de água e após a densidade e a quantidade e distribuição de argila do solo. Esses autores encontraram menor grau de influência da umidade no cisalhamento em solo franco do que argiloso. Concluíram também que o tipo de argilominerais e as forças existentes de atração e repulsão entre as partículas também possuem influência no cisalhamento.

Conforme expresso na equação 1, a tensão de cisalhamento é dependente da tensão normal aplicada ao solo, sendo essa atuante no aumento do contato entre as partículas do solo. Como descrito por vários autores (Nichols et al., 1955; Gill & Vanden Berg, 1967; Silva et al., 2004; Brandt, 2005; Richart et al., 2005; Suzuki, 2005), com o passar dos anos, cada vez mais tem-se um aumento da carga normal ao solo gerado pelo aumento do peso das máquinas agrícolas, que por sua vez atua na compactação do solo, proporcionando um aumento no contato entre as partículas

do solo, repercutindo no aumento da resistência, que implicará no acréscimo do esforço do trator ao tracionar algum tipo de implemento de mobilização.

Investigando a potência requerida de máquinas para o preparo do solo e implementação de cultura, em dois solos sendo um arenoso e outro argiloso, atuando na camada de solo até a 0,30m de profundidade, Marquéz Delgado (2001 apud Botta et al., 2006) encontrou um aumento na demanda de potência 15% em haste sulcadora no solo argiloso, concluindo que este fator é atribuído ao aumento da força de cisalhamento do solo. Concomitante, Botta (1997) encontraram valor similar em solo argiloso.

Quanto maior a coesão do solo, Nichols et al. (1958) afirmam que mais eficiente é a transmissão do efeito do subsolador nos planos de ruptura (planos cisalhantes).

#### **4.2.3. Efeito mecânico via compressibilidade**

O solo, como qualquer outro material na natureza, quando submetido a uma tensão, tende a deformar-se. Porém, o solo como meio trifásico, composto por fase líquida (solutos-água mais alguns componentes químicos), sólida (minerais que constituem o solo, originados pela decomposição da rocha matriz) e gasosa, conforme relatam Bueno & Vilar (1980), possui um comportamento único que depende de fatores já mencionados anteriormente.

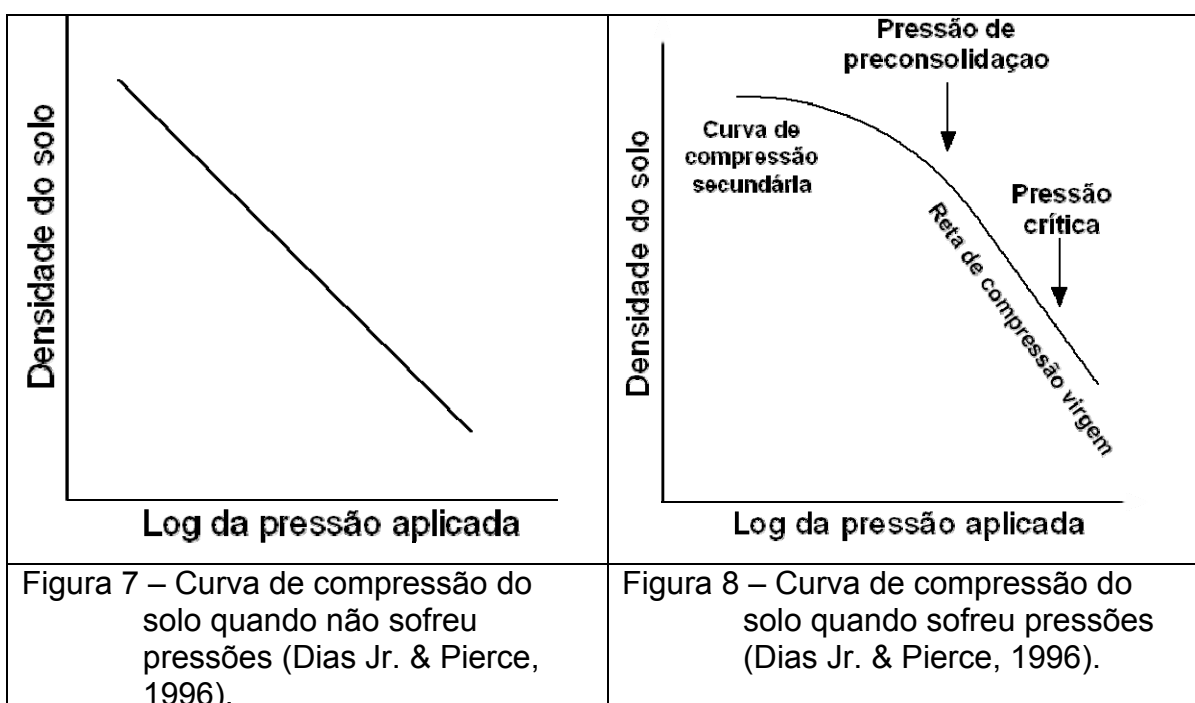
O solo possui um banco de memórias de tensões, conforme explicam Holtz & Kovacs (1981), onde está armazenado todo o histórico de tensões e processos naturais sofridos, estando preservados em sua estrutura.

No estudo da compressibilidade do solo, há possibilidade de análise desse histórico, sendo amplamente utilizada para determinar a capacidade de suporte, bem como delimitar as áreas de deformações plásticas e elásticas.

Mediante a curva de compressão, obtida no teste de compressibilidade, avalia-se a redução de volume do solo sob a ação de cargas externas, ou seja, simula-se o trabalho de uma máquina agrícola no solo.

Segundo Dias Jr. & Pierce (1996), a curva de compressão representa graficamente o logaritmo da pressão externa aplicada a um corpo de prova, com

algum parâmetro ligado a estrutura do solo, como por exemplo o índice de vazios ou densidade do solo. A curva de compressão pode apresentar dois comportamentos distintos: linear ou curvilíneo (não linear). O comportamento linear (Figura 7) é expresso quando o solo não recebeu aplicação de cargas ou ação do processo de secagem e umedecimento em seu histórico, sendo o curvilíneo expresso quando o solo já sofreu ação de processos naturais, secagem e umedecimento, ou processos externos, ação de tráfego, gerando alteração na estrutura do solo o qual expressará uma curva curvilínea (Figura 8).



No comportamento curvilíneo, identificam-se dois comportamentos, demonstrado inicialmente por uma curva, e após torna-se retilínea. A primeira etapa é representada pela condição elástica, ou seja, se cessar o carregamento, o solo pode retornar ao seu estado original (curva de compressão secundária), ou também se entende como a região onde o solo já experimentou cargas. A outra condição é chamada de plástica, se cessar a ação da carga, o solo não retorna a sua condição inicial; nesse estado o solo ainda não sofreu ação de carregamentos, sendo denominada reta de compressão virgem, ocorrendo compactação adicional (Holtz & Kovacs, 1981).



Obtêm-se dois parâmetros principais através da compressibilidade: a tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) e o coeficiente de compressão ( $C_c$ ). A tensão de pré-consolidação obtida pelo método idealizado por Casagrande (1936, apud Holtz & Kovacs, 1981), representa o valor máximo que se pode aplicar ao solo sem que esse sofra compactação adicional. O  $C_c$  refere-se ao processo de decréscimo de volume do solo, quando submetido à aplicação de uma pressão externa (Koolen, 1994).

Para melhor entender a compressibilidade, deve-se conhecer como funciona a ação dessa no solo. A compressão do solo se dá basicamente por quatro fatores: compressão das partículas sólidas; re-arranjo das partículas do solo; compressão de ar e água dentro dos poros; e trocas no conteúdo de líquido e gás no espaço poroso (Harris, 1971).

Segundo Horn et al. (1993), a dinâmica das forças envolvidas no tráfego ou no processo de ruptura, originam: o re-arranjo dos agregados e do sistema de poros inter-agregado, resultando no aumento da densidade, redução da aeração, e menor volume de solo explorado pelas raízes; e a deterioração do agregado devido ao cisalhamento dos mesmos.

O tráfego de máquinas é a maior fonte de compactação. Håkansson et al. (1988) descrevem que faz-se necessário uma reconfiguração da máquina para minimizar esse efeito danoso ao solo. Como principal controlador da compactação, tem-se a intensidade do tráfego e características da máquina, como: 1) carga por eixo que influi no valor de tensão normal aplicada ao solo; 2) tipo de pneu, que dependendo do tipo irá possuir uma maior ou menor transmissão da potência do motor ao solo, atuando na patinação desse; 3) pressão de inflação, que tem influência na área de contato do pneu, deve ser tal que garanta aderência do pneu ao solo e bem como, sua movimentação, sendo que em baixa pressão de inflação, este aumenta a pressão de contato solo-pneu, gerando aumento da compactação (Håkansson & Voorhees, 1998).

Como fonte de compactação, o manejo do solo influi nos parâmetros compressivos, conforme averiguado por Suzuki (2005). Investigando um Latossolo submetido a diferentes manejos (cultivo mínimo (CM) e semeadura direta), o autor concluiu que sistemas de manejo com revolvimento do solo recente apresentam maior deslocamento de suas curvas de compressão, proporcionando maior

suscetibilidade à compactação, sendo que solo sob SD, por apresentar maior acúmulo de tensões em seu histórico, ofereceu menor deformação.

Trabalhando em solo com textura franco arenosa, Brandt (2005) encontrou maior capacidade de suporte no SD, pois  $\sigma_p$  foi superior à pressão exercida pelo trator quando o solo estava mais seco, sendo que os sistemas, convencional (SC) e cultivo mínimo (CM), apresentaram  $\sigma_p$  inferior à pressão exercida pelo pneu, oferecendo maior susceptibilidade à compactação adicional.

Em Latossolo Vermelho, Oliveira et al. (2003) encontraram maior  $C_c$ , ou seja, maior suscetibilidade à deformação plástica em solo sob cerrado, do que SD e SC (arado de discos com incorporação dos restos culturais após colheita da cultura principal), sendo que esses dois sistemas não apresentaram diferença estatística nas profundidades estudadas (0-0,05m e 0,20-0,30m). Esses mesmos autores encontraram maior tensão de pré-consolidação em solo sob SD.

Semelhantemente, Kondo & Dias Jr. (1999a) relataram que as variações induzidas pelo manejo influenciaram o comportamento compressivo do solo, verificado pelas diferenças no coeficiente de compressão e tensão de pré-consolidação. Silva et al. (2002) observaram, em Argissolo vermelho distrófico típico sob SC, redução de até quatro vezes nos valores da tensão de pré-consolidação na faixa de densidade de 1,31-1,60Mg m<sup>-3</sup> do que SD, sendo que em Latossolo vermelho distrófico típico não houve tal efeito.

Outro fator que possui influência na compressibilidade do solo é a textura, uma vez que essa atua na capacidade de retenção de água e na coesão, os quais interferem na tensão de pré-consolidação. Kondo & Dias Jr. (1999b), analisando o efeito da textura na  $\sigma_p$ , através de um estudo em Latossolo roxo (0,658kg kg<sup>-1</sup> de argila), Latossolo vermelho escuro (0,469kg kg<sup>-1</sup>) e Latossolo vermelho amarelo (0,237kg kg<sup>-1</sup>), encontraram maior resistência ao tráfego em Latossolo roxo sob cultura anual em umidade inferior a 0,27kg kg<sup>-1</sup>, na camada de 0-0,30m.

Estudando a influência do teor de argila nos parâmetros compressivos, Imhoff et al. (2004) encontraram no  $C_c$  aumento linear quando o conteúdo de argila foi maior que 29,42%, sendo que a  $\sigma_p$  apresentou correlação positiva com a densidade do solo e conteúdo de argila, e correlação negativa com umidade do solo. Abu-Hamdeh & Reeder (2003) relataram que para um mesmo carregamento, a compactação é mais expressiva em solo argiloso do que em solo com textura grosseira.

Oliveira et al. (2003) salientam a grande importância do uso da tensão de pré-consolidação como avaliador da adoção do manejo do solo, uma vez que independentemente do sistema de uso ou manejo, tensão da água e profundidade do solo, a redução do volume total de poros nas pressões de pré-consolidação no geral, são menores que 10%, nível crítico ao crescimento e desenvolvimento de plantas.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1. Caracterização da área experimental**

Para o alcance dos objetivos propostos, foram realizados dois estudos em distintos solos e distintas regiões.

No estudo 1, as coletas das informações começaram no ano de 2005, sendo realizadas na semeadura da cultura de verão e após sua colheita, em uma área experimental da EMBRAPA Trigo em Passo Fundo/RS. A área está delimitada entre as coordenadas 28°10'00" de latitude sul, 52°22'00" de longitude, e altitude de aproximadamente 686m. É caracterizada pela ocorrência de precipitação pluvial mínima de 60mm mensais, distribuída ao longo de todos os meses do ano (Nimer, 1989), e o clima da região enquadra-se na classificação de Köppen, zonas Cfa e Cfb.

O experimento foi implantado pela EMBRAPA Trigo no ano de 2001 (Apêndice A) sob tráfego controlado, ou seja, o maquinário utilizado para as tarefas agrícolas trafega sempre no mesmo trajeto. Assim, as parcelas de 6,0-12,0m possuem regiões de alto tráfego e de mínimo tráfego (Figura 9); para tal têm sido utilizadas barras delimitadoras horizontais na frente do trator para guiá-lo de tal forma que a ponta desta fique margeando a parcela.

Neste croqui (Figura 9) verifica-se a localização das linhas de semeadura, a qual em pontilhado representa a linha de semeadura do milho e a linha contínua, a soja e as marcas dos pneus simbolizam a linha de trajeto a qual o trator segue.

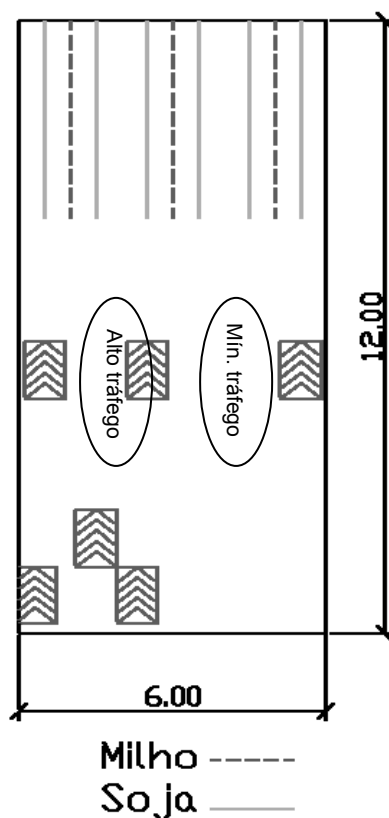


Figura 9 – Parcela com delimitação de tráfego.

O espaçamento entre linhas utilizado para as culturas de verão (soja) foi de 200mm e 500mm para cultura de inverno (milho). A rotação de culturas foi realizada conforme descrita na tabela a baixo (Tabela 1):

Tabela 1 - Seqüência cultural empregada no experimento do estudo 1.

Ano agrícola	Cultura	
	Inverno	Verão
2001/2002	Trigo	Soja
2002/2003	Ervilhaca	Milho
2003/2004	Aveia branca	Soja
2004/2005	Trigo	Soja
2005/2006	Nabo	Milho

No estudo 2, as coletas foram realizadas no ano de 2006, em área experimental do Departamento de Solos da UFSM, Santa Maria. A área está delimitada entre as coordenadas 29°41'00" de latitude, 53°48'00" longitude oeste, e

altitude de aproximadamente 95m. O clima da região enquadra-se como “Cfa” (Köppen), caracterizado por clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, e temperatura do mês mais frio variando entre -3°C a 18°C (Moreno, 1961).

A rotação de culturas foi realizada conforme descrita na Tabela 2.

Tabela 2 - Seqüência cultural empregada no experimento do estudo 2.

Ano agrícola	Cultura	
	Inverno	Verão
1999/2000	Trigo	Soja
2000/2001	Pousio	Pousio
2001/2002	Aveia	Soja
2002/2003	Aveia	Feijão
2003/2004	Aveia	Feijão
2004/2005	Trigo	Soja
2005/2006	Nabo	Soja

Neste estudo, as parcelas a campo mediam 7,0 x 6,0m.

## 5.2. Solo

O solo do estudo 1 é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (Embrapa, 1999) de textura argilosa, com as características granulométricas constantes na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição granulométrica do solo no estudo 1.

Características granulométricas	Camada 0-0,30m
Areia grossa (%)	8,29
Areia fina (%)	22,91
Argila (%)	45,31
Silte (%)	23,50
Densidade de partículas (Mg m <sup>-3</sup> )	2,58

O solo do estudo 2 é classificado com Argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico (Embrapa, 1999) de textura franco arenosa, com as características granulométricas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição granulométrica do solo no estudo 2.

<b>Características granulométricas</b>	<b>Camada 0-0,30m</b>
Areia grossa (%)	22,37
Areia fina (%)	39,03
Argila (%)	8,93
Silte (%)	29,70
Densidade de partículas ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	2,60

### 5.3. Tratamentos e delineamento experimental empregado

No estudo 1, o delineamento empregado foi bloco ao acaso distribuídos sob forma fatorial 4x2, possuindo quatro tipos de sistemas de manejo, com dois níveis de tráfego, totalizando oito tratamentos, com três repetições. Os tratamentos utilizados foram  $E1_V$  – Escarificado no ano de 2001 (verão);  $E1T_V$  – Escarificado no ano de 2001 com tráfego (verão);  $E3_i$  – Escarificado no ano de 2003 (inverno);  $E3T_i$  – Escarificado no ano de 2003 com tráfego (inverno);  $E5_i$  – Escarificado no ano de 2005 (inverno);  $E5T_i$  – Escarificado no ano de 2005 com tráfego (inverno), tendo como testemunha o SD – Semeadura direta há 13 anos e SDT – Semeadura direta há 13 anos com tráfego. estão listados no quadro 1.

Foram utilizados dois níveis de tráfego: nível 1, sujeito à propagação de tensões resultantes de duas linhas laterais de tráfego, estando aproximadamente a 0,10m da lateral do pneu traseiro; nível 2, sujeito apenas à tensão exercida pelos discos duplos da semeadora.

Os históricos do tráfego sob as unidades experimentais estão listados a seguir:

- E5T<sub>i</sub> - efeito da pressão lateral de 1 passada de trator na semeadura do milho;
- E5<sub>i</sub> - apenas adensamento natural (+ ou - 6 meses);
- E3T<sub>i</sub> - teve efeito da pressão lateral de 6 passadas de trator na semeadura das culturas de 2003 até 2005, e 4 passadas da colhedora na colheita mais a influência da tensão exercida pelos discos duplos da semeadora, e o adensamento natural do solo entre maio de 2003 a novembro de 2005;
- E3<sub>i</sub> - influência da tensão exercida pelos discos duplos da semeadora, em cada safra, e o adensamento natural do solo no período do maio de 2003 a novembro de 2005;
- E1T<sub>v</sub> - teve efeito da pressão lateral de: 9 passadas de trator por ocasião da semeadura das culturas (soja e ervilhaca em 2002, milho e aveia branca em 2003, soja e trigo em 2004, soja e nabo em 2005, milho em 2006) e 6 passadas da colhedora na colheita (soja em 2002, milho e aveia branca em 2003, soja e trigo em 2004, soja em 2005) mais, a influência da tensão exercida pelos discos duplos da semeadora, associado ao adensamento natural do solo de maio de 2001 a novembro de 2005;
- E1<sub>v</sub> - influência da tensão exercida pelos discos duplos da semeadora, em cada safra, associada ao adensamento natural do solo de maio de 2001 a novembro de 2005;
- SD - influência da tensão exercida pelos discos duplos da semeadora, em cada safra, associada ao adensamento natural do solo de maio de 2001 a novembro de 2005;
- SDT - efeito da pressão lateral de: 10 passadas de trator por ocasião da semeadura das culturas e 6 passadas da colhedora na colheita mais a influência da tensão exercida pelos discos duplos da semeadora, associado ao adensamento natural do solo de maio de 2001 a novembro de 2005;

OBS: A área encontrava-se com 8 anos sob SD, sendo a partir de maio de 2001 o tráfego passou a ser monitorado. As áreas em estudo não tiveram ação de outros implementos.

No estudo 2, o delineamento adotado foi bloco ao acaso, com os seguintes tratamentos: SD - Compactação presente (semeadura direta há 13 anos) e CA - Compactação adicional, executada com o tráfego de uma motoniveladora, pesando



aproximadamente 10Mg (pressão exercida ao solo de 315,20kPa), sendo executadas 4 passadas em 2001 e mais 4 passadas em 2002.

Em ambos os estudos, as análises estatísticas constaram de análise da variância e comparação de médias pelo teste de Tukey, executadas pelo software ESTAT (UNESP Jaboticabal), sendo que para análise dos dados de esforços realizou-se análise pelo teste t (Student) pelo SAS (1990). A escolha do teste t para esses dados deveu-se ao fato que houve variâncias populacionais diferentes, assim violando uma das pressuposições básicas requeridas para análise estatística, sendo assim, pelo teste t, leva-se em consideração a variância de cada tratamento.

As amostras do estudo um foram coletadas na entre linha do milho, sendo coletadas nas camadas 0-0,10m, 0,10-0,20m e 0,20-0,30m, com auxílio de um extrator e um martelo, conforme apêndice B. No estudo dois, as amostras foram coletadas na entre linha da soja, sendo coletadas ao longo do trajeto do escarificador, na camada abaixo escarificada (0,20-0,25m e 0,25-0,30m), e outra coleta paralela a essa, na camada onde não foi escarificada.

#### 5.4. Especificações das máquinas utilizadas

No estudo 1, para a realização das tarefas agrícolas (escarificação, pulverização e semeadura) fez-se uso de um trator MF275<sup>1</sup>, com as especificações listadas na tabela 5. A determinação da área de contato foi calculada com base na equação desenvolvida por O'Sullivan (1999).

$$A = s_1bd + s_2L + s_3 L/\pi \quad (2)$$

onde: A = área contato pneu-solo (m<sup>2</sup>); b = largura do pneu (m); d = diâmetro do pneu (m); L = peso sobre o pneu (kN); pi = pressão de inflação do pneu (kPa); s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub> e s<sub>3</sub> = ver apêndice M (adotou-se superfície solta).

---

<sup>1</sup> A identificação da marca e modelo não caracteriza endosso do autor ou das instituições envolvidas neste trabalho, sendo meramente descritivo.

A pressão foi calculada dividindo o peso do trator por eixo, pela área de contato, sendo que para tal calculou-se o peso por eixo com base na distribuição de 75% de peso para eixo traseiro, e 25% para o eixo dianteiro.

Tabela 5 - Descrição do trator usado no estudo 1.

<b>Descrição</b>	<b>Especificação</b>
Peso total (kg)	2665
Potência no motor, cv (kW)	65 (47,80)
Potência na TDP, cv (kW)	57 (42)
Pneu dianteiro (Goodyear <sup>1</sup> ), lastro sem água	7,50-16 (R1)
Pressão inflação do pneu dianteiro (kPa)	165,47
Pneu traseiro (Firestone <sup>1</sup> ), lastro com água	14,90-28 (R1)
Pressão inflação do pneu traseiro (kPa)	124,11
Pressão de contato pneu traseiro/solo (kPa/pneu)	90,87
Pressão de contato pneu dianteiro/solo (kPa/pneu)	119,32

A semeadura foi executada com auxílio de uma semeadora SHM 11/13 (Apêndice C), desenvolvida pela EMBRAPA Trigo, com 4 linhas espaçadas em 0,50m, sulcador tipo facão com ângulo de ataque de 20°, para sua adaptação na parcela. O dosador utilizado foi rotor acanalado helicoidal para sementes pequenas e densidades grandes e disco plano aveolado perfurado para sementes graúdas.

O escarificador empregado foi um Jumbo de 5 hastes parabólicas (Apêndice D) com ponteira estreita, espaçadas 0,34m, com rolo destorroador e disco de corte, marca JAN<sup>1</sup>, sendo 0,25m a profundidade de trabalho. Na colheita foi utilizada uma colhedora<sup>1</sup> MF3640, com plataforma de 3,90m, pneu dianteiro Goodyear<sup>1</sup>, 18-4-26 (R1), 10 lonas, radial, com pressão de 165,47kPa, sem água.

Todas as máquinas agrícolas utilizadas no estudo 1 são pertencentes a EMBRAPA trigo.

Para o estudo 2, fez-se uso de um trator MF<sup>2</sup> 275, pertencente ao Departamento de solos da UFSM, com as seguintes especificações (Tabela 6):

<sup>1</sup> A identificação da marca e modelo não caracteriza endosso do autor ou das instituições envolvidas neste trabalho, sendo meramente descritivo.

<sup>2</sup> A identificação da marca e modelo não caracteriza endosso do autor ou das instituições envolvidas neste trabalho, sendo meramente descritivo.

Tabela 6 - Descrição do trator usado no estudo 2.

<b>Descrição</b>	<b>Especificação</b>
Peso total (kg)	2665
Potência no motor, cv (kW)	65 (47,80)
Potência na TDP, cv (kW)	57 (42)
Pneu dianteiro (Goodyear <sup>1</sup> ), lastro sem água	7,50-16
Pressão inflação do pneu dianteiro (kPa)	165,47
Pneu traseiro (Pirelli <sup>1</sup> ), lastro com água	18,40-30
Pressão inflação do pneu traseiro (kPa)	55,16
Pressão do pneu dianteiro ao solo (kPa)	42,17
Pressão do pneu traseiro ao solo (kPa)	119,32

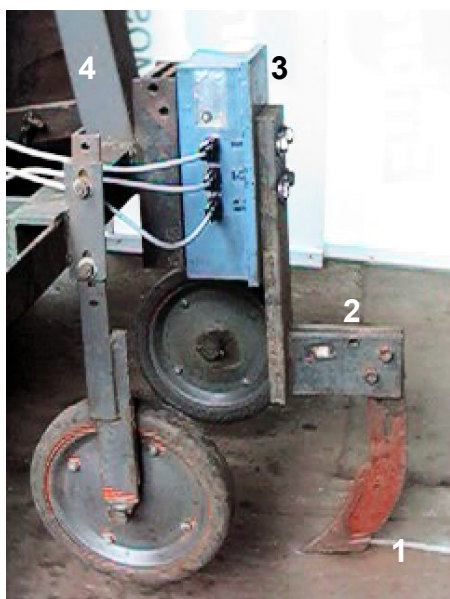
Foi utilizado um escarificador de arrasto pertencente ao Núcleo de Ensaio de Máquinas Agrícolas da UFSM (NEMA), com as seguintes especificações: estrutura porta ferramenta em formato trapezoidal, com rodas niveladoras de profundidade acopladas ao chassi; uma haste em curva (45°) com ponteira estreita, de 0,08m de largura e 20° de ângulo de ataque.

A motoniveladora utilizada para compactação da área era da marca Clarck-michigan<sup>1</sup> 75III, com massa total de 7,736Mg, com a concha repleta de pedra britada nº 1 para, aumentar a massa no eixo frontal do equipamento garantindo uma distribuição uniforme da massa total de 10Mg. Os pneus eram Pirelli, PN 14 G2/L2, 13.00-24 10PR, com 0,33m de largura e 1,05m de diâmetro. As garradeiras encontravam-se desgastadas pelo uso, evitando assim o cisalhamento superficial. O tráfego da parcela foi realizada de tal forma que, os pneus comprimissem áreas paralelas entre si sendo executadas passadas sobrepostas às anteriores de forma que toda área fosse igualmente trafegada. A pressão de inflação foi 202,46kPa gerando uma pressão de contato pneu/solo de 315,20kPa.

### **5.5. Esforços solicitados a mecanismo rompedor de solo**

Para avaliação da influência da escarificação e da compactação no desempenho do escarificador (Estudo 2) e sulcador (Estudo 1), coletaram-se dados de esforços horizontais, verticais e momento associado a esses mecanismos, através de um anel

octogonal estendido, acoplado entre o trator e o mecanismo em questão. No estudo 1 foi acoplado a uma estrutura tipo carrinho porta ferramentas o anel e o sulcador, conforme a figura 10. O sulcador tipo facão atuou a uma profundidade em torno de 0,13m e velocidade de  $3,2\text{km h}^{-1}$ , sendo que a umidade em que se encontrava o solo era de  $0,360\text{kg kg}^{-1}$ .



1 – sulcador; 2 – suporte de acoplamento; 3 – anel octogonal; 4 – estrutura porta ferramenta.



1 – haste escarificadora; 2 – suporte de acoplamento da haste; 3 – anel octogonal; 4 – estrutura porta ferramenta.

Figura 10 – Montagem do anel octogonal estendido ao sulcador.

Figura 11 – Montagem do anel octogonal estendido à haste escarificadora.

No estudo 2, o anel octogonal estendido foi instalado entre a haste escarificadora a barra porta ferramenta (Figura 11), através de uma estrutura de chapa de  $0,0127\text{m}$  em formato paralelepípedo vazado, para que a extremidade da ponteira ficasse no mesmo eixo do anel, evitando assim a sobreposição do sistema de forças atuantes na ponteira.

A profundidade de trabalho foi de  $0,15\text{m}$  no solo sob compactação adicional e  $0,23\text{m}$  no solo sob semeadura direta, sendo que a umidade em que se encontrava o solo era de  $0,295\text{kg kg}^{-1}$ .

O anel foi configurado para uma taxa de aquisição de 20 amostras/segundo em ambos os estudos.

O anel octogonal estendido (Figura 12) consiste de um bloco retangular de aço usinado de forma a obter dois anéis octogonais. Extensômetros elétricos são adicionados estrategicamente a estes anéis e interligados em três pontes de Wheatstone, transformando-os em sensores capazes de identificar componentes de forças vertical e horizontal, bem como o momento associado à ferramenta, ou seja, são dispostos de tal forma que ao deformar-se devido à aplicação de uma carga ao anel. A resultante final será a força horizontal, vertical ou momento dependendo de sua posição.

As especificações técnicas do anel são: material de aço 4340; tratamento térmico de têmpera e revenimento para 41,5RC; capacidade nominal: força vertical de 8kN, força horizontal de 20kN, momento de 13kN.m; resistência das pontes de 120ohm.

Após a montagem mecânica do anel, este é conectado ao módulo de aquisição de dados. Após a estabilização térmica dos circuitos, a operação passa a ser realizada através de um software de aquisição de dados.

Este módulo é totalmente controlado por um notebook, não necessitando de ajustes e calibrações. Este anel foi desenvolvido pelo Laboratório de Instrumentação e Eletrônica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

O esforço de tração ( $F_T$ ) foi determinado por cálculo vetorial, pois a partir da força horizontal ( $F_h$ ) e o ângulo formado pela ponteira e o solo ( $\alpha$ ), esforço de tração é determinado:

$$F_T = \frac{F_h}{\cos \alpha} \quad (3)$$

Onde:  $F_h$  = esforço horizontal (kN);  $\alpha$  = ângulo de ataque ( $^\circ$ )

Na figura 13 está demonstrada a dinâmica das forças envolvidas no trabalho de ponteiras.

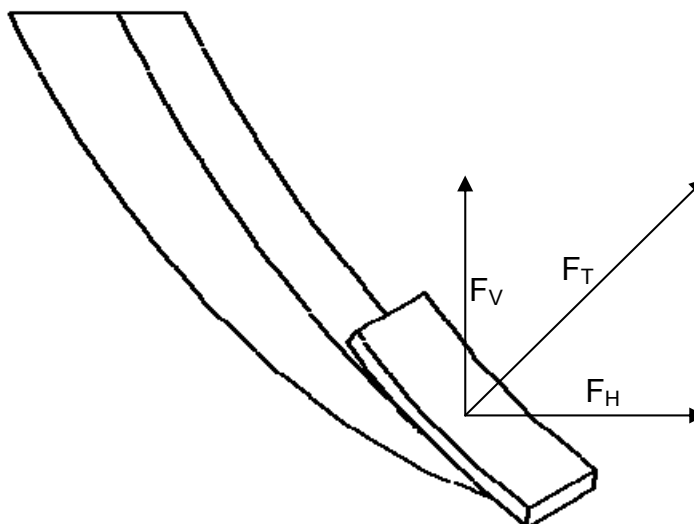


Figura 12 – Dinâmicas das forças atuantes em ponteiras.

### 5.6. Área mobilizada, área de elevação e empolamento do solo

Mediram-se a área mobilizada e a área de elevação. A partir desses, calculou-se o empolamento, como avaliador do desempenho do escarificador e do sulcador.

Para a mensuração desses dados, utilizaram-se duas metodologias, perfilômetro e regra do trapézio. No estudo 2, fez-se uso de um perfilômetro totalmente desmontável (Figura 13), constituído de 31 varetas de alumínio vazadas, com diâmetro de 0,015m e altura de 1,0m equidistantes 0,015m, com uma lona graduadas 0,05m, conforme a figura 13. Sua montagem pode ser verificada na ilustração do apêndice E.

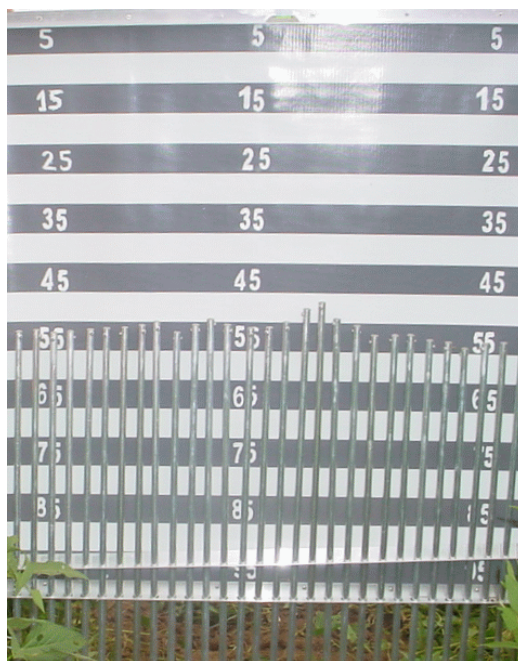


Figura 13 – Perfilômetro desmontável.

Para mensuração dos parâmetros, montou-se o perfilômetro antes do trabalho do escarificador, para obter o perfil natural, após para o perfil de elevação, e posteriormente retirou-se o solo em elevação para medir a área transversal (mobilizada), sendo tomadas três leituras por tratamento. Com uso de fotos digitais, transferiram-se as leituras para planilha eletrônica, sendo os cálculos efetuados através do software Autocad. Foram tomadas três leituras por parcela.

Para cálculo do empolamento do solo, cujo valor fornece a expansão volumétrica ocorrida na mobilização, utilizou-se fórmula:

$$Emp = \frac{A_e}{A_m} \times 100 \quad (4)$$

Onde: Emp = empolamento (%);  $A_e$  = área de elevação ( $m^2$ );  $A_m$  = área mobilizada ( $m^2$ );

No estudo 1 fez-se uso da metodologia do trapézio. Para tal, mediram-se perpendicularmente à linha escarificada (Figura 14) as profundidades até onde a haste escarificadora conseguiu mobilizar o solo, sendo retirado transversalmente todo o solo mobilizado. Em cada tratamento retirou-se a camada de solo invertida e efetuou-se a limpeza da área mobilizada, sendo tomadas três seções, adotando-se a

média do cálculo da área de solo mobilizada, pela equação (Equação 5) do método dos trapézios (Serpa & Magalhães, 1997).

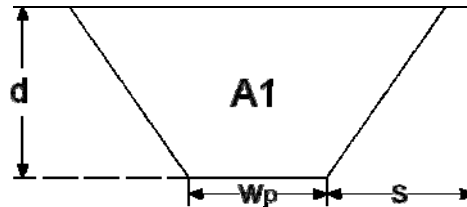


Figura 14 – Área mobilizada por ferramenta estreita. (Fonte: Serpa & Magalhães, 1997).

$$A_m = (s + w_p)d \quad (5)$$

Onde:  $s$  = distância lateral de ruptura (m);  $w_p$  = largura do sulco (m);  $d$  = profundidade do sulco (m).

### 5.7. Resistência específica operacional

Outro parâmetro avaliador da influência do manejo mecânico do solo e da compactação foi a resistência específica operacional (Equação 6). Essa fornece o requerimento de força por área mobilizada. Para obtenção desse dado, fez-se uso da metodologia descrita por Lanças (1987).

$$R_e = \frac{F_m}{A_m} \quad (6)$$

Onde:  $R_e$  = resistência específica operacional ( $\text{kN m}^{-2}$ );  $F_m$  = força de tração média (kN);  $A_m$  = área do solo mobilizada média ( $\text{m}^2$ ).



## 5.8. Resistência mecânica do solo

Para avaliação da compactação abaixo da profundidade de trabalho do escarificador, usaram-se dados de resistência à penetração até 0,40m, sendo coletados na linha escarificada e na linha sem escarificação. Para tal, utilizou-se um penetrômetro digital marca Remik CP20 Ultrasonic Cone Penetrometer<sup>1</sup>, com armazenamento eletrônico dos dados, ponta cônica com ângulo de penetração de 30°, regulado para aquisição de dados a cada 0,015m de profundidade. Foram realizadas três leituras ao longo da parcela, sendo realizadas leituras na área escarificada e na área sem escarificação, como testemunha. Essas leituras foram realizadas logo após a realização da escarificação.

## 5.9. Compressibilidade do solo

Como indicativo do grau de compactação dos solos em estudo, bem como a influência da escarificação no banco de tensões do solo, coletaram-se amostras para a verificação da compressibilidade do solo. Para tal, amostras de estrutura preservada foram coletadas em cilindro de aço inoxidável com 0,061m de diâmetro e 0,025m de altura (Apêndice B), sendo no estudo 1 extraídas nas camadas de 0-0,10m; 0,10-0,20m e 0,20-0,30m e no estudo 2, 0,20-0,25m e 0,25-0,30m. As amostras foram saturadas por capilaridade durante 24h, sendo posteriormente submetidas à sucção de 33kPa em câmara de pressão de Richards, para homogeneizá-las quanto ao potencial matricial e trabalhar com amostra em capacidade de campo.

Ato contínuo, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial seguindo a norma NBR-12007/90 (ABNT, 1990), onde cargas estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600kPa foram aplicadas à amostra de solo, porém o tempo de aplicação de cada carga foi alterado para cinco minutos, pois conforme Machado (2001), mais de 90% da compactação é alcançada neste

---

<sup>1</sup> A identificação da marca e modelo não caracteriza endosso do autor ou das instituições envolvidas neste trabalho, sendo meramente descritivo.

intervalo. Os parâmetros de densidade do solo inicial e final, índice de vazios, porosidade total, deformação relativa, umidade volumétrica e grau de saturação do solo antes e após cada aplicação de carga, pressão de pré-consolidação e o coeficiente de compressão foram determinados através do software Compress (Reinert et al., 2003), optando-se pelo método de Casagrande (1936 apud Holtz & Kovacs, 1981) com ajuste semi-automático (método 2).

Para execução do teste, fez-se uso de uma prensa uniaxial (Apêndice F) da marca Durham Geo-enterprises modelo S-450 Terraload<sup>1</sup>, pneumática com indicador digital da carga aplicada, sendo realizada a leitura em defletômetro, pertencente ao laboratório de física do solo do departamento de solo da UFSM.

As curvas de compressão foram plotadas, sendo normalizadas para eliminar o efeito da compactação inicial do solo, dividindo-se a densidade do solo ao final da aplicação de cada carga no teste de compressão pela densidade inicial ( $D_s/D_{si}$ ), fazendo assim que todas as curvas comecem da  $D_s 1,0 \text{Mg m}^{-3}$ .

## 5.10. Cisalhamento do solo

Para a determinação da coesão e ângulo de atrito interno do solo foram realizadas coletas em caixas metálicas de dimensão padronizada e apropriadas para posterior utilização na mesa de cisalhamento direto (Apêndice G), sendo coletadas três repetições por tratamento, nas camadas de 0-0,10m e 0,10-0,20m, apenas no estudo 1. Posteriormente, as amostras foram submetidas à sucção de 33kPa em câmara de pressão de Richards, para homogeneizá-las quanto ao potencial matricial.

As amostras foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto, no qual a amostra foi colocada em um caixa bipartida, onde foi aplicada uma força normal de 50, 100 e 200kPa, aumentando em seguida à força tangencial, provocando um deslocamento entre as partes da caixa, prosseguindo até sua ruptura. As tensões normais foram escolhida com base nas cargas dos tratores agrícolas, que se situam entre 50 e 300kPa (Lebert & Horn, 1991; Silva et al., 2000).

---

<sup>1</sup> A identificação da marca e modelo não caracteriza endosso do autor ou das instituições envolvidas neste trabalho, sendo meramente descritivo.

Após a execução dos testes, plotou-se os valores de tensão normal versus tensão cisalhamento, obtendo-se uma linha cuja inclinação representa o ângulo de atrito interno, e o ponto de intersecção dessa linha com eixo da ordenada definem a coesão do solo. Na figura 6 está exemplificada essa plotagem.

No campo coletaram-se as amostras em três trincheiras, sendo extraídas três caixas metálicas por camada, totalizando 9 caixas por camada na parcela.

A velocidade executada no teste foi  $0,33\text{mm min}^{-1}$ , sendo realizado em uma mesa de cisalhamento direto pertencente ao laboratório de mecânica do solo do curso de Eng. Civil da UFSM. A mesa de cisalhamento era manual, da Solotest<sup>1</sup> modelo ASTM D 3080, BS 1377, aparelho analógico para cisalhamento direto por acionamento manual, com esteira de rolamentos, 2 extensômetros analógicos e 01 anel dinamométrico com capacidade 4,9kN.

### **5.11. Propriedades físicas do solo**

Para a determinação da macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, foram realizadas coletas a campo com cilindros de aço inoxidável medindo 0,06m de diâmetro e 0,05m de altura, sendo que no estudo 1, foram tomadas coletas em três pontos aleatórios ao longo da parcela e no estudo 2, foram em 4 pontos aleatórios. Em cada ponto foi realiza uma coleta por camada (estudo 1: 0-0,10m, 0,10-0,20m, 0,20-0,30m; estudo 2: 0,20-0,25m e 0,25-0,30m).

Em laboratório, as amostras foram saturadas por capilaridade durante 24h, sendo posteriormente pesadas e levadas à mesa de tensão, onde foram submetidas à tensão de sucção de 6kPa, permanecendo nessa até que se estabeleceu o equilíbrio entre a água retida na amostra e a sucção aplicada. Após este, pesou-se novamente a amostra e encaminhadas para estufa a 105-110°C (EMBRAPA 1997).

---

<sup>1</sup> A identificação da marca e modelo não caracteriza endosso do autor ou das instituições envolvidas neste trabalho, sendo meramente descritivo.

A determinação da macro, micro, porosidade total e densidade do solo foram calculadas com base nas equações:

$$Ma = \frac{(P_1 - P_2)}{V_c} \times 100 \quad (7)$$

$$M_i = \frac{(P_2 - m_{ss})}{V_a} \times 100 \quad (8)$$

$$Ds = \frac{m_{ss}}{V_c} \quad (9)$$

Onde: Ma = macroporosidade (%); Mi = microporosidade (%); Ds = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );  $m_{ss}$  = massa de solo seco (Mg);  $V_c$  = volume do cilindro ( $\text{m}^3$ ); P1 = massa de solo úmido (Mg); P2 = massa de solo a 6kPa.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Estudo 1

#### 6.1.1. Efeito da escarificação nos esforços e área mobilizada por haste sulcadora de semeadora de semeadura direta e sua influência nas propriedades físicas

Na tabela 7 encontram-se os dados médios de esforço horizontal, vertical e tração exigidos pela haste sulcadora, nos tratamentos em estudo.

Tabela 7 - Esforço horizontal ( $F_H$ ), esforço vertical ( $F_V$ ) e esforço de tração ( $F_T$ ).

Trat.*	SD		E1 <sub>v</sub>		E3 <sub>i</sub>		E5 <sub>i</sub>	
	$F_H$ (kN)							
T1	1,92	Aa	2,08	Aa	1,89	Aa	1,17	Ab
T2	1,96	Aa	2,16	Aa	1,96	Aa	1,31	Ab
$F_T$ (kN)								
T1	2,04	Aa	2,21	Aa	2,01	Aa	1,25	Ab
T2	2,09	Aa	2,30	Aa	2,09	Aa	1,39	Ab
$F_V$ (kN)								
T1	0,16	Aa	0,19	Aa	0,14	Aa	0,09	Aa
T2	0,14	Aa	0,21	Aa	0,18	Aa	0,09	Aa

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Trat – tratamentos; SD - semeadura direta; E1<sub>v</sub> - escarificado em 2001; E3<sub>i</sub> - escarificado em 2003; E5<sub>i</sub> - escarificado em 2005; T1 – sem tráfego; T2 – com tráfego.

Investigando os dados médios de esforço de tração, verifica-se que o E5<sub>i</sub> diferiu dos demais. O E3<sub>i</sub> apresentou a maior média de  $F_H$  e conseqüentemente, as maiores de  $F_T$ .

Embora não apresentando diferença na adicionar o efeito do tráfego, observa-se que as médias dos tratamentos sofreram um pequeno incremento, sendo que o E5<sub>i</sub> apresentou o maior incremento, de 1,04kN a 1,31kN. O solo escarificado

recentemente (E5<sub>i</sub>) apresentou a menor demanda de esforço de tração, sendo que essa demanda aumentou com o aumento do período de realização da escarificação, e solo escarificado há quatro anos demonstrou a maior demanda de esforço horizontal.

O esforço vertical (F<sub>v</sub>) foi bem inferior ao esforço de tração (F<sub>T</sub>), pois esse atingiu 0,21kN, contra 2,16kN do F<sub>H</sub>, e novamente o E5<sub>i</sub> apresentou os menores valores. Com aumento do período da realização da escarificação, houve aumento da demanda de esforços verticais, sendo que solo sob semeadura direta (SD) e solo escarificado a mais de 4 anos (E1<sub>v</sub>) apresentaram comportamento similar.

O efeito residual da escarificação há quatro anos não foi mais evidenciado na demanda de esforço de tração e vertical, sendo encontrado piores condições no solo, direcionando à conclusão da manutenção da periodicidade de escarificação de 3 anos. Furlani et al. (2005) também não encontraram diferença no esforço de tração entre sistemas de preparo direto e solo escarificado, em Latossolo Vermelho escuro.

Os dados de F<sub>T</sub> para o SD foram superiores aos encontrados por Bordignon et al. (2005) de 1,08kN, atuando em mesma profundidade e mesmo tipo de solo a 6,0km h<sup>-1</sup>, com teor de água de 0,06kg kg<sup>-1</sup>.

A estrutura do solo não gerou movimento rotacional na ferramenta, constado pelos dados de momento associado ao mecanismo sulcador, que se manteve constante em 3,11kN m.

Na tabela 8 estão dispostos os dados de área de solo mobilizado e resistência específica operacional dos tratamentos.

Tabela 8 – Área de solo mobilizado e resistência específica operacional nos tratamentos em estudo.

Tratamento*	A <sub>m</sub>	Re
	(m <sup>2</sup> )	(kN m <sup>-2</sup> )
	Méd	Méd
SD	0,0095	209,58
E1 <sub>v</sub>	0,0086	247,96
E3 <sub>i</sub>	0,0094	205,61
E5 <sub>i</sub>	0,0126	88,05
SDT	0,0089	235,20
E1T <sub>v</sub>	0,0072	319,36
E3T <sub>i</sub>	0,0106	196,71
E5T <sub>i</sub>	0,0092	151,31

\*Am – área de solo mobilizado, Re – resistência específica operacional, Méd – média, Trat. – tratamentos.

A área mobilizada não demonstrou variação quantitativa entre os tratamentos, exceto no E3 que, na adição do tráfego, aumentou a área mobilizada, sendo que os demais tiveram redução dessa na adição do tráfego, concordante com as conclusões de Araújo et al. (1998), os quais observaram que a compactação do solo gera redução da área mobilizada. Tal fenômeno explica-se pelo movimento do solo quando na mobilização e pela ação da compactação que, origina a formação de lâminas compactadas de solo. Autores como Payne (1956), Godwin & Spoor (1977) e Mckyes (1989) descreveram o movimento do solo, perante a ação de ferramentas verticais estreitas, como sendo ascendente no solo; sendo assim, o solo estando compactado no sentido laminar (lâminas de diferentes densidades), quando ocorre a mobilização do solo pelo sulcador, esse trabalha com um grande bloco maciço, reduzindo a transmissão de tensões de ruptura e assim, gerando redução da área mobilizada.

Aliado ao fato da maior demanda de tração no solo escarificado há quatro anos ( $E1_v$ ), esse demandou o maior esforço de tração por área trabalhada, expresso pelos dados de resistência específica operacional, que propiciará um aumento na demanda de potência do trator. Tal fato pode desencadear um sério problema conforme Casão Junior et al. (1998), pois em muitos desses casos, que o solo sob ação da compactação proporciona tal incremento de esforço, o trator não possui reserva de torque suficiente para tal trabalho, assim aumentando a patinação do trator e o consumo de combustível, gerando aumento da compactação do solo.

Solo escarificado há 6 meses independente do tráfego apresentou menor resistência específica, pois sua estrutura está mais enfraquecida com a mobilização, gerando assim redução da energia consumida pelo sulcador com um incremento da área mobilizada.

Nas figura 16 e 17 estão ilustrados sob forma de box plot, o comportamento dos esforços horizontais e verticais, nos tratamentos de semeadura direta com e sem tráfego (SD e SDT), escarificado em 2001 com e sem tráfego ( $E1_v$  e  $E1T_v$ ), escarificado em 2003 com e sem tráfego ( $E3_i$  e  $E3T_i$ ) e escarificado em 2005 ( $E5_i$  e  $E5T_i$ ). Nos apêndices H, I, J e K encontram-se as figuras que expressam o comportamento dos esforços horizontais e verticais do sulcador em área com e sem tráfego nos tratamentos em estudo, sendo optado em realizar a discussão desses

dados a partir do box plot, por ser mais visível o comportamento desses nos tratamentos em estudo.

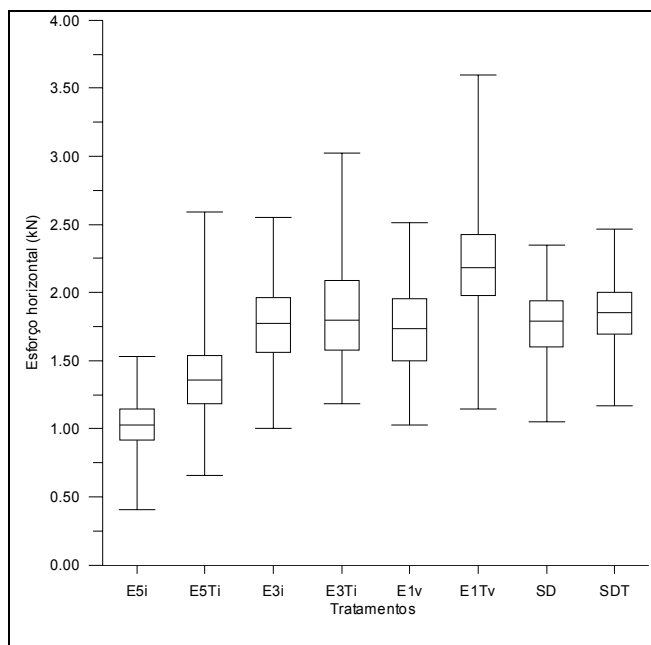


Figura 15 – Distribuição dos esforços horizontais pelo Box plot.

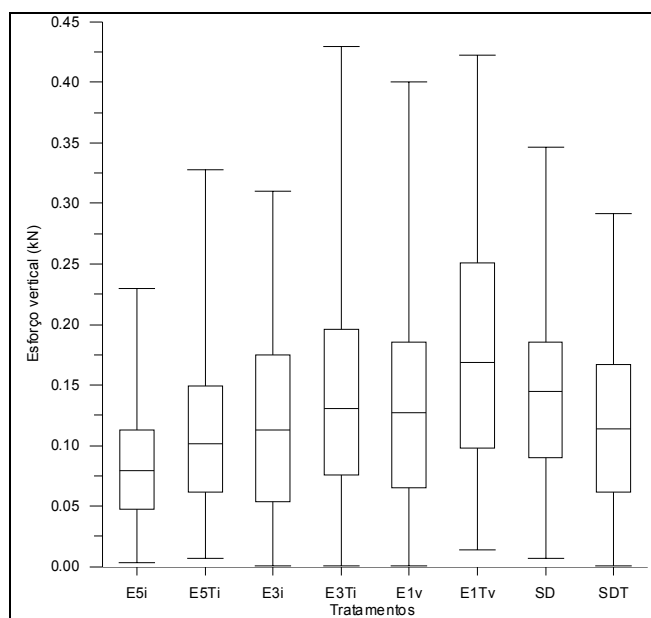


Figura 16 - Distribuição dos esforços verticais pelo Box plot.



Ao adicionar efeito do tráfego nota-se que o comportamento foi similar ao sem tráfego, ou seja, o  $F_H$  cresceu com o aumento no período da realização da escarificação, pois o  $E5T_i$  apresentou os dados variando de 1,15-1,47kN,  $E3T_i$  foi de 1,73-2,15kN,  $E1T_v$  variou de 1,96-2,32kN e SDT foi 1,80-2,12kN. Novamente, o  $E1v$  apresentou os maiores valores de  $F_H$ .

Constata-se que o tráfego ocasionou um pequeno deslocamento da média, e demonstrou maior variação entre o quartil superior para o quartil inferior. Isso corrobora que o tráfego lateral propicia uma variação estrutural maior no solo, que por sua vez atua na resistência do solo que, influencia a demanda de esforços. Segundo Abu-Handeh & Reeder (2003), a propagação da tensão no solo quanto há passagem de um pneu agrícola, com pressão de contato de 69kPa, ocorre pela formação de bulbos com resistência volumétrica diferentes, ocasionando uma estrutura diferenciada, proporcionando assim tal variação nos esforços.

Nota-se que os tratamentos com tráfego apresentaram esforços horizontais ( $F_H$ ) maiores, variando de 0,70-3,50kN, contra 0,40-2,50kN do tráfego mínimo. Com o aumento do tempo de realização da escarificação, houve um aumento nos esforços horizontais e verticais (Figura 16 e 17), sendo que o  $E1v$  ofereceu o maior esforço horizontal. Porém, ressalta-se a importância do tempo que se deu a escarificação, pois os demais tratamentos apresentaram menor esforço do que o SD. Já Furlani et al. (2004) encontraram comportamento oposto em Nitossolo, que exigiu maior demanda de tração em solo escarificado recentemente do que sob SD.

O SD apresentou comportamento similar ao  $E3_i$ , e demonstrou a menor variação entre o quartil superior ao inferior, apontando para duas hipóteses: (i) maior qualidade estrutural com homogeneidade em seus agregados ou (ii) estado de compactação elevado, o qual confere ao solo uma condição massiva devido à ruptura dos agregados (Larson et al., 1980).

O efeito da escarificação é notável na redução dos esforços horizontais no tratamento  $E5_i$ , onde se concentrou entre 0,94-1,15kN, já o  $E3_i$ ,  $E1_v$  e o SD concentraram-se em 1,63-1,94kN, 1,77-2,21kN e 1,69-2,05kN. Contrariamente ao fato da escarificação perdurar mais de dois anos, Mahl et al. (2004) não encontraram diferença em Nitossolo sob semeadura direta e solo escarificado há 18 meses. Bombardelli et al. (1995) encontraram menor esforço de tração em escarificador trabalhando em solo sob cultivo mínimo do que semeadura direta, concordante com o comportamento do  $E5_i$  deste trabalho.

Os esforços verticais apresentaram alta variação entre o quartil superior ao inferior, demonstrando que o efeito da compactação ocorre de maneira mais expressiva neste sentido, porém a geometria do mecanismo sulcador favorece a uma contribuição maior do  $F_H$ .

O  $F_V$ , assim como  $F_H$ , aumentou com o incremento no tempo de execução de escarificação, na seguinte ordem:  $E5_i$  (0,03-0,11kN) <  $E3_i$  (0,05-0,15kN) < SD (0,13-0,23kN) <  $E1_v$  (0,08-0,26kN). Novamente o  $E1_v$  apresentou os maiores esforços, comprovando o retorno ao seu estado natural.

Nas tabelas 9, 10, 11 e 12, encontram-se os dados de macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo nas camadas em estudo, na época da semeadura de verão e na colheita.

Na tabela 9, verifica-se que na camada superficial, solo escarificado há 4 anos demonstra a menor macroporosidade (8,40%) e microporosidade (37,45%) e maior densidade ( $1,44\text{Mg m}^{-3}$ ) entre os tratamentos, demonstrando seu elevado estado de consolidação, o que pode explicar a alta demanda de esforços. Tal fato, segundo Oliveira et al. (2003), é resultado da interferência do homem através da ação da máquina agrícola, que alteram tais propriedades físicas do solo.

Ação da escarificação pode ser observada no solo escarificado recentemente ( $E5_i$ ), que além de apresentar o menor esforço de tração (Tabela 7), apresentou a menor microporosidade (33,18%) e densidade do solo ( $1,20\text{Mg m}^{-3}$ ) e a maior macro (17,81%) na camada superficial (Tabela 9), lhe conferindo uma estrutura sob menor influência do tráfego, ou seja, sem efeito da compactação.

Tabela 9 – Macroporosidade(Ma), microposidade (Mi), porosidade total (Pt) e densidade do solo (Ds) nas camadas do estudo 1.

Manejo(M)	Camada 0- 0,10m*				Camada 0,10-0,20m				Camada 0,20-0,30m			
	Ma	Mi	Pt	Ds	Ma	Mi	Pt	Ds	Ma	Mi	Pt	Ds
	(%)				(Mg m <sup>-3</sup> )				(%)			
<b>SEMEADURA</b>												
SD	10,05	37,28	47,33	1,41	9,01	36,47	45,48	1,41	12,35	38,48	50,83	1,29
E1 <sub>v</sub>	8,40	37,45	45,85	1,44	9,19	37,44	46,63	1,43	9,27	38,03	47,30	1,36
E3 <sub>i</sub>	12,77	35,78	48,54	1,34	9,25	36,48	45,73	1,45	9,00	37,52	46,52	1,42
E5 <sub>i</sub>	17,81	33,18	52,62	1,20	12,30	34,99	47,30	1,34	10,29	38,24	48,44	1,32
<b>Tráfego (T)</b>												
Sem	12,80	36,42	49,22	1,35	9,81	36,67	46,49	1,41	10,48	38,02	48,46	1,36
Com	11,72	35,42	47,95	1,35	10,06	36,02	46,08	1,41	9,96	38,12	48,08	1,34
<b>Teste F</b>												
<b>M</b>	**	*	**	**	NS	NS	**	NS	NS	NS	**	*
<b>T</b>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
<b>M x T</b>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS
<b>DP</b>	2,94	2,15	2,36	0,08	2,35	1,51	1,85	0,08	2,25	0,86	2,40	0,07
<b>CV (%)</b>	24,03	5,98	4,86	5,95	23,60	4,15	3,99	5,60	22,04	2,27	4,97	5,02
<b>COLHEITA</b>												
SD	7,70	35,28	42,98	1,41	9,04	36,07	45,11	1,34	11,37	38,03	49,41	1,25
E1 <sub>v</sub>	6,95	35,51	42,46	1,45	7,96	36,38	44,33	1,39	7,90	37,60	45,92	1,33
E3 <sub>i</sub>	14,89	34,67	49,56	1,25	12,17	34,78	46,94	1,34	14,53	36,49	49,71	1,30
E5 <sub>i</sub>	16,30	35,13	51,43	1,21	13,22	34,64	47,87	1,28	11,37	35,18	45,49	1,24
<b>Tráfego (T)</b>												
Sem	11,78	35,49	46,63	1,33	10,58	35,50	46,08	1,34	10,96	37,27	47,34	1,28
Com	11,13	34,80	46,58	1,33	10,61	35,43	46,04	1,34	10,66	36,38	47,92	1,28
<b>Teste F</b>												
<b>M</b>	**	NS	**	**	*	NS	*	*	**	*	**	*
<b>T</b>	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
<b>M x T</b>	NS	NS	*	*	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS
<b>DP</b>	2,80	1,44	2,36	0,06	2,90	1,20	2,06	0,05	2,39	1,43	1,98	0,05
<b>CV (%)</b>	24,34	4,09	5,07	4,17	27,33	3,38	4,46	3,98	22,12	3,87	4,15	4,12

\*Médias seguidas da mesma letra, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% (\*) ou 1% (\*\*) de probabilidade. SD - semeadura direta; E1<sub>v</sub> - escarificado em 2001; E3<sub>i</sub> - escarificado em 2003; E5<sub>i</sub> - escarificado em 2005; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; NS – não significativo; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

Segundo Reichert et al. (2003), a porosidade total e a densidade do solo, podem ser bons indicadores da condição estrutural do solo, sendo assim, solo escarificado há dois anos apresenta boas condições estruturais para o desenvolvimento de uma cultura, conforme observa-se na tabela 10 e 11, pois esse, ofereceu a menor densidade na linha de tráfego, e a maior porosidade total.

Tabela 10- Porosidade total (em %) na camada de 0-0,10m na interação na época da colheita.

Tráfego	Manejo*			
	SD	E1 <sub>v</sub>	E3 <sub>i</sub>	E5 <sub>i</sub>
Sem tráfego	43,34 Ab	46,55 Bb	53,00 Aa	43,63 Ab
Com tráfego	41,58 Ab	52,57 Aa	49,86 Aa	42,32 Ab

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 11- Densidade do solo (em Mg m<sup>-3</sup>) na camada de 0,10-0,20m na interação na época da colheita.

Tráfego	Manejo*			
	SD	E1 <sub>v</sub>	E3 <sub>i</sub>	E5 <sub>i</sub>
Sem tráfego	1,32 Aab	1,39 Aa	1,40 Aa	1,25 Ab
Com tráfego	1,37 Aa	1,39 Aa	1,29 Ba	1,31 Aa

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O tráfego lateral não teve influência nos parâmetros físicos (Tabela 9), sendo manejo o principal responsável pelas alterações encontradas nas camadas analisadas.

Na camada intermediária (Tabela 9), os tratamentos não diferiram em relação à macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, porém observa-se que o E5<sub>i</sub> apresentou à maior macroporosidade e a menor densidade na semeadura, demonstrando sua baixa capacidade de suporte, por estar no período de reestruturação de sua estrutura, reforçando a importância que se deve evitar o tráfego nesta área.

Na época da colheita, mudou o cenário, onde o manejo demonstrou influência na macroporosidade, na porosidade total e na densidade do solo, sendo o E3<sub>i</sub> e E5<sub>i</sub> os tratamentos que oferecem maior macro, 12,17% e 13,22% respectivamente, e os demais apresentaram 9,04% para o SD; 7,96% para o E1<sub>v</sub>, sendo que esse diferiu do E5<sub>i</sub> e não diferiu dos demais. Os dados de macroporosidade reafirmam que solo escarificado há quatro anos (E1<sub>v</sub>) retornou ao seu estado natural e encontra-se em condições piores, sendo que o E1<sub>v</sub> e o SD apresentaram condições insatisfatórias de macroporosidade para o desenvolvimento da planta, que segundo Forsythe (1967) é de 10%.

A interação manejo x tráfego, teve influência apenas na densidade do solo, onde (Tabela 12) o tráfego lateral, aumentou a densidade do SD e E5<sub>i</sub>. Na linha sem ação de tráfego, o E5<sub>i</sub> não diferiu do SD, porém diferiu dos demais. Na linha de tráfego não houve diferença entre os tratamentos.

Tabela 12- Densidade do solo (em Mg m<sup>-3</sup>) na camada de 0-0,10m na interação na época da colheita.

Tráfego	Manejo*			
	SD	E1 <sub>v</sub>	E3 <sub>i</sub>	E5 <sub>i</sub>
Sem tráfego	1,42 Aa	1,43 Aa	1,32 Aa	1,17 Ab
Com tráfego	1,40 Aa	1,48 Aa	1,17 Bb	1,25 Ab

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Solo escarificado há mais de quatro anos, demonstrou o maior requerimento de força por área trabalhada, o qual, segundo Håkansson (2005), gera aumento do consumo de combustível e do custo da lavoura.

### 6.1.2. Efeito do manejo na compressibilidade do solo

Na tabela 13 encontram-se os dados do coeficiente de compressão (Cc) e tensão de pré-consolidação nas camadas 0-0,10m, 0,10-0,20m e 0,20-0,30m, nas épocas de semeadura e colheita.

O coeficiente de compressão ( $C_c$ ) na camada superficial decresce com o aumento do período da realização da escarificação, sendo que o  $E5_i$  apresentou o maior coeficiente de compressão. Isso confirma a conclusão obtida na demanda de esforços, que é o tratamento mais suscetível à compactação. Todavia, esse solo está em uma fase de re-organização de sua estrutura, e formação de seu banco de tensões, o qual, conforme explicam Dias Jr. & Pierce (1996), é o banco onde se encontram o histórico de tensões sofridas pelo solo. Sendo assim, esses dados demonstram a importância de evitar o tráfego com a carga igual à tensão de pré-consolidação em solo revolvido recentemente.

O tráfego lateral não teve influência nos parâmetros compressivos em ambas as épocas, pois não apresentou diferença, sendo o manejo a variável de maior influência. Abu-Hamdeh & Reeder (2003), investigando a propagação do bulbo de tensões gerados por uma pressão de contato pneu/solo de 69kPa, em solo argiloso (tensão similar a encontrada neste estudo), encontraram que na camada de 0-0,10m pode chegar a uma distância lateral de até 0,12m, na camada de 0,10-0,27m de até 0,19m, sendo que nessa camada a tensão é menor que a anterior e concluíram que a maior tensão está localizada na camada superficial. Porém, a propagação neste estudo não gerou influência na tensão de pré-consolidação e no coeficiente de compressão.

Tabela 13- Coeficiente de compressão ( $C_c$ ) e tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) nas camadas em estudo na época da semeadura e colheita.

Camada (m)*	0-0,10		0,10-0,20		0,20- 0,30	
	$C_c$	$\sigma_p$ (kPa)	$C_c$	$\sigma_p$ (kPa)	$C_c$	$\sigma_p$ (kPa)
<b>Manejo (M)</b>	<b>Semeadura</b>					
SD	0,20 b	76,92 a	0,24 a	92,00 a	0,27 a	81,65 ab
E1 <sub>v</sub>	0,22 b	81,87 a	0,18 b	92,68 a	0,22 a	95,17 a
E3 <sub>i</sub>	0,26 b	69,77 a	0,19 b	77,30 a	0,23 a	90,24 ab
E5 <sub>i</sub>	0,37 a	61,07 a	0,20 ab	89,55 a	0,24 a	71,36 b
<b>Tráfego (T)</b>						
Sem	0,260 a	74,38 a	0,21 a	93,46 a	0,25 a	82,44 a
Com	0,260 a	70,43 a	0,20 a	82,81 a	0,24 a	86,77 a
<b>M</b>	**	NS	**	NS	NS	*
<b>T</b>	NS	NS	NS	NS	NS	NS
<b>M x T</b>	NS	*	NS	**	NS	NS
<b>DP</b>	0,05	14,91	0,25	12,80	0,47	11,90
<b>CV (%)</b>	17,19	20,60	12,10	14,50	19,60	14,10
<b>Manejo (M)</b>	<b>Colheita</b>					
SD	0,20 b	71,42 a	0,24 b	69,88 a	0,28 ab	60,85 a
E1 <sub>v</sub>	0,20 b	64,85 a	0,23 b	49,37 ab	0,24 b	58,57 a
E3 <sub>i</sub>	0,35 a	51,51 a	0,21 b	59,54 ab	0,29 ab	49,55 a
E5 <sub>i</sub>	0,34 a	59,65 a	0,34 a	34,68 b	0,32 a	50,53 a
<b>Tráfego (t)</b>						
Sem Tráfego	0,27 a	61,23 a	0,26 a	47,53 a	0,30 a	56,23 a
Com tráfego	0,27 a	62,48 a	0,25 a	59,20 a	0,27 a	53,51 a
<b>M</b>	**	NS	**	*	**	NS
<b>T</b>	NS	NS	NS	NS	NS	NS
<b>M x T</b>	NS	NS	NS	*	NS	NS
<b>DP</b>	0,04	19,42	0,04	16,40	0,05	14,65
<b>CV (%)</b>	15,39	31,39	15,81	30,70	16,30	26,70

\*Médias seguidas da mesma letra, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% (\*) ou 1% (\*\*) de probabilidade.

SD - semeadura direta; E1<sub>v</sub> - escarificado em 2001; E3<sub>i</sub> - escarificado em 2003; E5<sub>i</sub> - escarificado em 2005; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; NS – não significativo.

A tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) apresentou diferença apenas na interação, sendo o E5<sub>i</sub> o único tratamento a demonstrar tal diferença, conforme exposto na tabela 14, onde o tráfego aumentou a  $\sigma_p$  de 38,33kPa para 83,80kPa. Pode-se verificar que realmente não houve influência do tráfego para os demais tratamentos, pois não apresentou diferença dentro do tratamento.

Tabela 14– Tensão de pré-consolidação (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0-0,10m na semeadura.

Tráfego	Manejo*			
	SD	E1 <sub>v</sub>	E3 <sub>i</sub>	E5 <sub>i</sub>
Sem tráfego	78,77 Aa	88,17 Aa	76,47 Aa	38,33 Bb
Com tráfego	75,07 Aa	75,57 Aa	63,07 Aa	83,80 Aa

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na camada intermediária, na época da semeadura os tratamentos apresentaram diferença na interação manejo x tráfego na  $\sigma_p$  (Tabela 13), onde na linha sem ação de tráfego (Tabela 15) o E3<sub>i</sub> não diferiu do E1<sub>v</sub>, mas diferiu dos demais e na linha de ação do tráfego o E5<sub>i</sub> não diferiu do SD, porém diferiu dos demais. Exceto pelo E5<sub>i</sub>, a tensão de pré-consolidação (Tabela 15) cresceu com o aumento do período da realização da escarificação, sendo 98,75kPa para o SD, 88,10kPa o E1<sub>v</sub> e 65,93kPa para o E3<sub>i</sub>, conduzindo para a conclusão que solo sob semeadura direta e escarificado há quatro anos encontram-se em estado maior de compactação.

Tabela 15- Tensão de pré-consolidação (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na semeadura.

Tráfego	Manejo*			
	SD	E1 <sub>v</sub>	E3 <sub>i</sub>	E5 <sub>i</sub>
Sem tráfego	98,75 Aab	88,10 Abc	65,93 Bc	121,05 Aab
Com tráfego	85,27 Aab	99,27 Aa	88,67 Aa	58,05 Bb

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

O SD e E1<sub>v</sub> apontam para um comportamento similar na camada 0,10-0,20m, demonstrando os maiores valores de tensão de pré-consolidação em ambas as épocas em estudo, sendo que ao longo das camadas, o solo sob semeadura direta



apresentou nessa, uma camada compactada (Tabela 13), evidenciada pelos maiores valores de tensão de pré-consolidação.

Concordante com a presença de compactação na camada de 0,10-0,20m, Assis & Lanças (2005) encontraram os maiores valores de tensão de pré-consolidação nessa camada (0,10-0,15m), em solo sob semeadura direta há 1, 4, 5 e 12 anos. Segundo Larson et al. (1980), isso pode ser explicado pelo aumento do contato entre agregados quando na aplicação de carga externa, que chega até um patamar que rompe o agregado, conferindo ao solo uma estrutura massiva e aumentando sua resistência a suporte.

Esse fato comprova que o efeito da escarificação em quatro anos não é mais encontrado e que a condição em que se encontra o solo é diferente do solo sem escarificação, avivando para condições piores. Tudo isso demonstra a importância da periodicidade da escarificação, que a partir deste estudo apontam a um intervalo de 3-4 anos.

Dias Junior (1994) relata uma vantagem nos altos valores de tensão de pré-consolidação em solo sob semeadura direta, pois isso lhe atribui capacidade de suporte em níveis de pressões mais elevados, resultando em vantagem em sua trafegabilidade. Porém, isso também pode ser resultado do elevado grau de compactação do solo, por possuir uma estrutura densa, lhe atribuindo uma capacidade maior de suportar pressões mais elevadas, no entanto, sob o ponto de vista da planta, tal condição pode ser restritiva para o seu desenvolvimento.

Na camada sub-superficial (Tabela 13), não houve efeito significativo do manejo, tráfego e na interação manejo x tráfego no coeficiente de compressão. Na tensão de pré-consolidação só houve efeito do manejo, onde solo escarificado há mais de quatro anos ofereceu a maior  $\sigma_p$  (95,17kPa) seguido pelo E3<sub>i</sub> (90,24kPa), sendo que o E5<sub>i</sub> diferiu do E1<sub>v</sub> e não diferiu dos demais. Isso pode levar à conclusão que a escarificação realizada há mais de dois anos não possui mais efeito descompactador na camada abaixo escarificada, sendo que a condição em que se encontra o solo é diferente da condição anterior. Essa conclusão é congênere à obtida por Botta et al. (2006), os quais identificaram que, após dois anos da realização da escarificação e subsolagem, com um tráfego acumulado nesse tempo de 95Mg km ha<sup>-1</sup>, não encontrava-se mais tal efeito descompactador na camada abaixo escarificada e subsolada.

Novamente, o  $E1_v$  demonstrou maiores valores de  $\sigma_p$ , reafirmando a conclusão, obtida na camada anterior, da manutenção da periodicidade da escarificação.

Embora não apresentando diferença significativa, o coeficiente de compressão do SD foi o maior entre os tratamentos.

Na época da colheita na camada superficial (Tabela 13), efeito significativo foi encontrado apenas no manejo no coeficiente de compressão ( $C_c$ ), onde  $E3_i$  não diferiu do  $E5_i$ , mas diferiram dos demais. Novamente, o  $E5_i$  demonstrou alto valor de  $C_c$ , sendo que o SD e  $E1_v$  apresentaram os mesmos valores. O  $E3_i$  apresentou um aumento significativo do  $C_c$ , de 0,26 a 0,35 e aliado a isso manifestou a menor  $\sigma_p$ , demonstrando baixo nível de compactação, ou seja, dois anos após a realização da escarificação ainda encontra-se efeito no solo.

Na camada intermediária, encontrou-se efeito do manejo e da interação manejo x tráfego (Tabela 13), onde o  $E5_i$  (Tabela 16) demonstrou a menor tensão de pré-consolidação 22,15kPa, diferindo do  $E3_i$  que apresentou a maior, 67,03kPa lhe conferindo a maior capacidade de suporte entre os tratamentos. A ação do tráfego foi observada no SD, que apresentou diferença entre ação com tráfego e sem, onde a  $\sigma_p$  aumentou de 45,90kPa para 93,87kPa; no entanto, embora o  $E5_i$  não apresentasse diferença entre os níveis de tráfego, os valores da  $\sigma_p$  foram bem distintos pois o valor dobrou com adição do tráfego lateral de 22,15kPa para 47,20kPa.

Tabela 16- Tensão de pré-consolidação (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na colheita.

Tráfego	Manejo*			
	SD	$E1_v$	$E3_i$	$E5_i$
Sem tráfego	45,90 Bab	55,03 Aab	67,03 Aa	22,15 Ab
Com tráfego	93,87 Aa	43,70 Ab	52,05 Ab	47,20 Ab

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na camada sub-superficial (Tabela 13), embora os tratamentos não apresentassem diferença clara na tensão de pré-consolidação, o  $E3_i$  demonstrou o

menor valor, sendo os demais apontando para um possível aumento do nível de compactação.

No apêndice L encontram-se as curvas de compressão dos solos coletados na época da semeadura de culturas de verão, não sendo apresentadas as curvas referentes à época da colheita por seguirem o mesmo comportamento.

Na figura 17 estão ilustradas as curvas de compressão normalizadas dos tratamentos nas camadas de 0-0,10m (camada superficial), 0,10-0,20m (camada intermediária) e 0,20-0,30m (camada sub-superficial).

Ao reduzir o efeito da compactação inicial pela normalização das curvas, na camada superficial indiferente ao nível de tráfego, o E5<sub>i</sub> apontou grande deflexão na reta de compressão virgem, que implicará em maior suscetibilidade à deformação. Tal fato atribuiu-se à baixa densidade inicial que possibilita elevadas deformações. Os demais tratamentos apresentaram deflexões similares, porém ao adicionar o efeito do tráfego, o SDT passou a demonstrar a menor inclinação, acompanhado do E1T<sub>v</sub>, E3T<sub>i</sub> e E5T<sub>i</sub> na camada superficial. Os altos valores de densidade inicial do SDT (Apêndice L) resultante da maior densidade do agregado do solo, em comparação aos demais, pode ser o motivo de tal comportamento.

Na camada intermediária (0,10-0,20m), independente do nível de tráfego, o SD apresenta as maiores densidades (Ds), seguido pelo E3<sub>i</sub>, E5<sub>i</sub> e E1<sub>v</sub> (Figura 17). Observa-se a ação do revolvimento nessa camada no tratamento E5<sub>i</sub>, pois apresentou as menores densidades e também a menor coesão (Tabela 20), que lhe atribuirá baixa capacidade de suporte.

A alta deflexão na curva de compressão no SD em conjunto com os altos valores de  $\sigma_p$  e ângulo de atrito interno (Tabela 20) demonstram presença de compactação nessa camada.

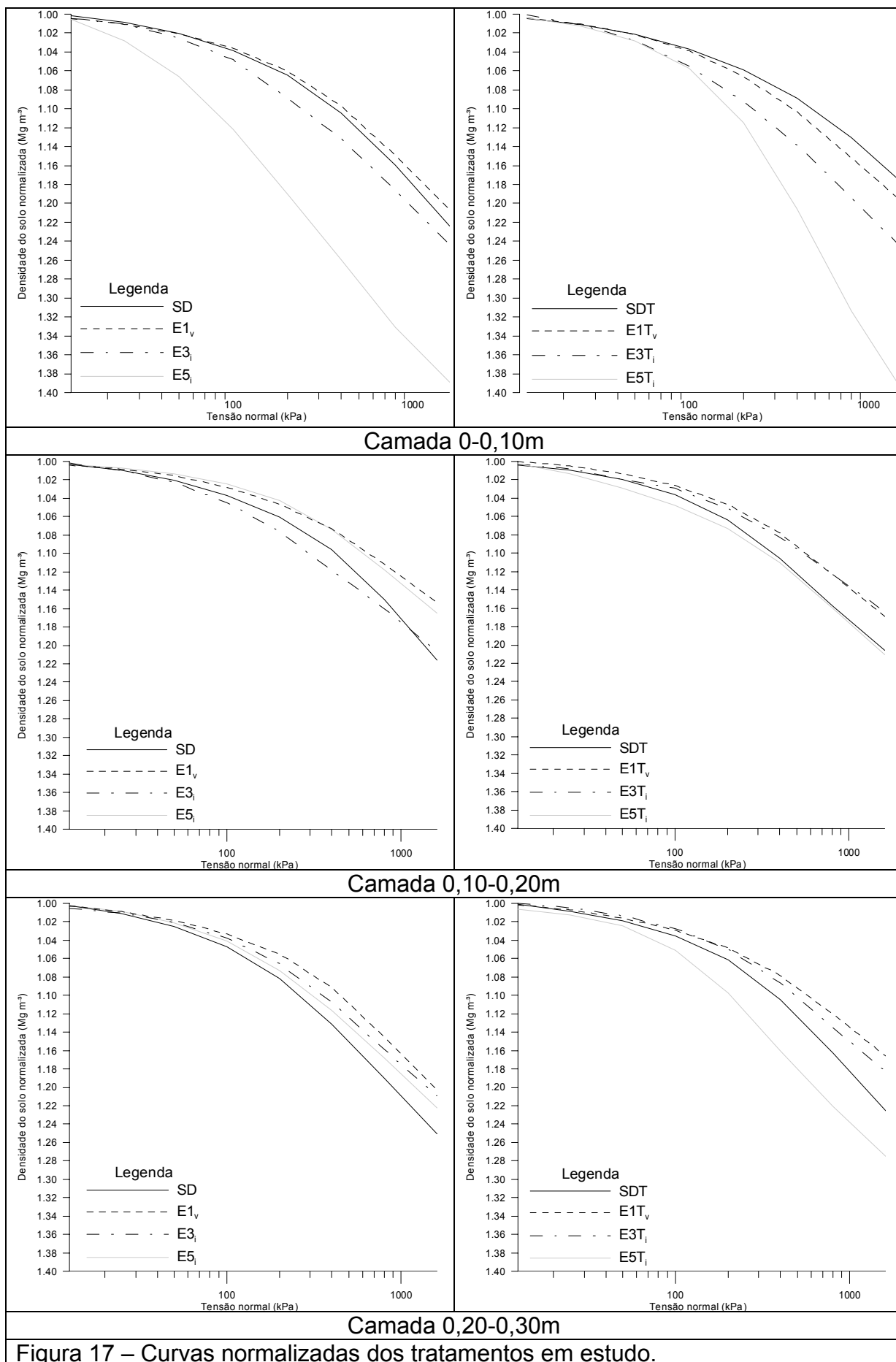


Figura 17 – Curvas normalizadas dos tratamentos em estudo.

Na camada sub-superficial, o solo escarificado há dois ( $E3_i$ ) e há quatro ( $E1_v$ ) anos apresentou comportamento similar, expressando os menores valores de densidade, sendo que este comportamento também aconteceu na camada intermediária com tráfego. Isso pode ser explicado pela profundidade de escarificação, o qual foi de 0,25m, demonstrando que nesta camada ainda encontra-se efeito da escarificação.

Analisando as camadas em estudo, nota-se que, a partir do 0,20m, o SD aponta para as maiores densidades do solo, demonstrando que ação do tráfego acumulado ao longo do período de uso desse sistema, em conjunto da falta de revolvimento direcionam para o agravamento do efeito da compactação no solo, ou seja, todas as vantagens proporcionadas por esse sistema, como: ação do sistema radicular na rotação de culturas, o efeito da matéria orgânica na estabilização de agregados (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Paladini & Mielniczuk, 1991), a ação da microfauna na produção de elementos que também são responsáveis pela estabilização dos agregados (Henklain, 1997) e a ação de estabilização do poro executada pela coifa da raiz, não são capazes de evitar tal agravamento da compactação no solo.

Analisando-se a densidade do solo sob semeadura direta na curva de compressão do apêndice L na camada 0,10-0,20m e 0,20-0,30m, verifica-se que a densidade do solo foi menor entre os tratamentos, porém as conclusões obtidas acima expressam presença de compactação nesse tratamento. Uma possível explicação pode estar na mineralogia do solo, com aumento na agregação e conseqüentemente aumento na resistência intra-agregado e concomitante a isso, a disposição do poro provavelmente deve ser na vertical que aumenta mais sua resistência a cargas expressando densidades menores. Dias Jr. & Pierce (1996) relatam que a compactação do solo permanece em forma de um aumento da densidade do agregado lhe atribuindo tal resistência. Chaney et al. (1985), trabalhando em solo sob sistema de semeadura direta, concluíram que, após alguns anos de cultivo, o solo adquire uma estrutura caracterizada por apresentar agregados mais densos e resistentes, que estão mais próximos entre si.

Os dados evidenciam comportamentos diferentes entre os tratamentos, demonstrando que o tempo possui influência direta nos parâmetros compressivos, estando congênere a Assis & Lanças, (2005). Esses concluíram, através de uma pesquisa de avaliação do tempo de adoção do sistema semeadura direta, que o

tempo alterou o comportamento compressivo dos solos ao longo do perfil do solo, através de mudanças na tensão de pré-consolidação, sendo que a camada de 0-0,05m mostrou-se mais suscetível à compactação que camadas mais profundas, igualmente à situação encontrada neste trabalho.

### **6.1.3. Efeito do manejo no cisalhamento do solo**

Na tabela 17 estão dispostos os dados de tensão de cisalhamento nas camadas de 0-0,10m e 0,10-0,20m na semeadura e na colheita, com suas respectivas análises estatísticas.

Na camada superficial em época de semeadura, na tensão normal de 50kPa, o  $E_{1v}$  diferiu dos demais, sendo que a tensão de cisalhamento cresceu com aumento do tempo da realização da escarificação, seguindo o comportamento dos dados de tensão de pré-consolidação e esforço horizontal. Nessa tensão, tanto o manejo como o tráfego e a interação desses, apresentaram diferença a 1% de significância.

Na tabela 18 encontram-se os dados da interação manejo x tráfego, submetidos ao teste de comparação entre médias nessa camada. Verifica-se que o tráfego só não influenciou o  $E_{3i}$ , pois não apresentou diferença. Outro fato é que, nos tratamentos sem revolvimento e com revolvimento há mais de 4 anos, a tensão de cisalhamento reduziu com adição do tráfego, sendo tal evento ocorrido ao inverso nos tratamentos com escarificação há dois anos e há seis meses. Uma possível explicação disso pode ser a baixa coesão do solo sob SD (Tabela 21), que proporciona redução da tensão de cisalhamento.

Tabela 17– Cisalhamento do solo (em kPa) na camada 0-0,10m e 0,10-0,20m nos tratamentos em estudo.

	Camada 0-0,10m			Camada 0,10-0,20m		
	Tensão normal (kPa)					
	50	100	200	50	100	200
Tensão de cisalhamento (kPa)*						
Manejo (M)			Semeadura			
SD	47,83 b	83,09 ab	136,72 ab	45,59 a	87,52 ab	146,75 ab
E1 <sub>v</sub>	53,90 a	91,52 a	146,75 ab	47,82 a	96,80 a	156,52 a
E3 <sub>i</sub>	45,73 b	80,80 ab	131,46 b	52,30 a	98,90 a	137,12 b
E5 <sub>i</sub>	43,80 b	72,25 b	134,56 ab	48,83 a	78,29 b	152,18 a
Tráfego (T)						
Sem	49,78 a	83,23 a	133,40 b	47,93 A	92,46 a	148,82 a
Com	45,85 b	80,60 a	141,35 a	49,34 A	88,29 a	147,47 a
Teste F						
<b>M</b>	**	**	*	NS	**	**
<b>T</b>	**	NS	*	NS	NS	NS
<b>M x T</b>	**	NS	**	NS	*	NS
<b>DP</b>	3,19	7,07	8,12	6,64	7,39	7,15
<b>CV (%)</b>	6,67	8,63	5,91	13,65	8,18	4,83
Manejo (M)			Colheita			
SD	49,52 a	101,02 a	164,39 a	56,05 a	95,04 a	149,95 a
E1 <sub>v</sub>	50,64 a	99,66 a	159,59 a	57,58 a	94,99 a	146,78 ab
E3 <sub>i</sub>	46,00 a	84,05 b	139,44 b	59,45 a	97,27 a	159,39 a
E5 <sub>i</sub>	48,83 a	93,79 ab	125,06 b	54,38 a	88,32 a	131,06 b
Tráfego (T)						
Sem tráfego	46,64 a	96,86 a	148,32 a	58,52 a	97,36 a	148,57 a
Com tráfego	50,86 a	92,40 a	145,93 a	55,20 a	90,44 b	145,03 a
Teste F						
<b>M</b>	NS	**	**	NS	NS	**
<b>T</b>	NS	NS	NS	NS	*	NS
<b>M x T</b>	NS	NS	*	NS	NS	NS
<b>DP</b>	7,86	7,30	9,21	6,96	6,14	9,56
<b>CV (%)</b>	16,13	7,72	6,26	12,23	6,54	6,51

\*Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% (\*) ou 1% (\*\*) de probabilidade.

SD - semeadura direta; E1<sub>v</sub> - escarificado em 2001; E3<sub>i</sub> - escarificado em 2003; E5<sub>i</sub> - escarificado em 2005; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; NS – não significativo.

Tabela 18- Tensão de cisalhamento (em kPa) na tensão normal de 50kPa na interação manejo x tráfego na camada 0-0,10m, na semeadura.

Tráfego	Manejo*			
	SD	E1 <sub>v</sub>	E3 <sub>i</sub>	E5 <sub>i</sub>
Sem tráfego	58,33 Aa	58,28 Aa	43,44 Ab	39,06 Bb
Com tráfego	37,30 Bb	49,52 Ba	48,03 Aa	48,54 Aa

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

Na tensão normal de 100kPa (Tabela 17), que excedeu a tensão de pré-consolidação em todos os tratamentos, na camada superficial na época de semeadura, o E5<sub>i</sub> diferiu do E1<sub>v</sub> que não diferiu dos demais. O tráfego e a interação não tiveram influência na tensão de cisalhamento.

Na tensão normal de 200kPa (Tabela 17), no qual se encontra na zona de deformações plásticas para os tratamentos em estudo, o manejo, o tráfego e a interação apresentaram diferença na tensão de cisalhamento, onde o E3<sub>i</sub> foi o tratamento que ofereceu a menor resistência, pois proporcionou a menor tensão de cisalhamento (Tabela 19) não diferindo do E5<sub>i</sub> mas diferindo dos demais. Isso pode elevá-lo a uma vantagem perante os demais, pois, ao ser submetido ao tráfego de máquinas maiores em operações de mobilização, oferecerá menor demanda de potência, pela maior facilidade perante aos demais ao romper-se. Na linha de tráfego, o E1<sub>v</sub> apresentou o maior valor, diferindo do E5<sub>i</sub> e do SD.

Tabela 19- Tensão de cisalhamento (em kPa) na tensão normal de 200kPa na interação manejo x tráfego na camada 0-0,10m, na semeadura.

Tráfego	Manejo*			
	SD	E1 <sub>v</sub>	E3 <sub>i</sub>	E5 <sub>i</sub>
Sem tráfego	141,52 Aa	139,49 Ba	117,40 Bb	135,18 Aab
Com tráfego	131,92 Ab	154,01 Aa	145,52 Aab	133,94 Ab

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Solo escarificado há dois anos apresentou maior tensão de cisalhamento quando submetido a 50 e a 100kPa de tensão normal na camada 0,10-0,20m,



seguido pelo  $E1_v$ , SD e  $E5_i$ . Isto se explica por sua alta densidade (Tabela 9). Segundo estudos de Chancellor (1971), o ângulo de atrito interno aumenta com o incremento da densidade, repercutindo no aumento da tensão de cisalhamento e da coesão. Aliado a isso, Mitchell (1976 apud Oliveira et al., 2003) afirma que as forças de atrito e coesivas atuam com maior acuidade em solo que já sofreram alterações estruturais.

Nesta camada (0,10-0,20m) o tráfego só influenciou o solo escarificado há dois anos e há seis meses (Tabela 20), sendo que o  $E5_i$  apresentou a menor tensão cisalhante indiferente ao nível de tráfego, demonstrando ação da escarificação.

Tabela 20- Tensão de cisalhamento (em kPa) na tensão normal de 100kPa na interação manejo x tráfego na camada 0,10-0,20m, na semeadura.

Tráfego	Manejo*			
	SD	$E1_v$	$E3_i$	$E5_i$
Sem tráfego	92,00 Aa	102,35 Aa	90,42 Ba	85,06 Aa
Com tráfego	83,04 Abc	91,25 Aab	107,37 Aa	71,51 Bc

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Referente à época da colheita (Tabela 17), os comportamentos são similares, porém nota-se que o solo escarificado há seis meses aumentou a resistência ao cisalhamento, demonstrando ação do tempo em sua reestruturação.

Na tabela 21 encontram-se os dados de coesão do solo e ângulo de atrito interno, na semeadura e na tabela 22 os dados referente a época da colheita. Na camada superficial, tanto o manejo, o tráfego e a interação tiveram efeito a 1% de nível de significância pelo teste de Tukey, seguindo o mesmo comportamento crescente de acordo que se aumenta o período da realização da escarificação, exceto pelo SD que apresentou valor similar ao  $E3_i$ . O  $E1_v$  apresentou a maior coesão que lhe confere os altos valores de tensão de cisalhamento resultando em elevada tensão de pré-consolidação, devido à alta resistência do solo.

Tabela 21– Coesão (C) e ângulo de atrito interno ( $\Phi$ ) do solo na semeadura.

Época	Semeadura*			
	Camada (m) 0-0,10		0,10-0,20	
Manejo (M)	C (kPa)		$\Phi$ (°)	
SD	32,82 a	24,93 b	42,29 a	45,94 a
E1 <sub>v</sub>	41,04 a	31,39 b	43,36 a	46,94 a
E3 <sub>i</sub>	31,86 a	51,83 a	40,96 a	40,00 b
E5 <sub>i</sub>	19,78 b	20,20 b	43,53 a	47,37 a
<b>Tráfego (T)</b>				
Sem tráfego	38,59 a	30,84 a	40,50 b	45,41 a
Com tráfego	24,16 b	33,33 a	44,58 a	44,72 a
<b>Teste F</b>				
<b>M</b>	**	**	NS	**
<b>T</b>	**	NS	**	NS
<b>M x T</b>	**	**	**	NS
<b>DP</b>	6,92	6,94	1,62	1,91
<b>CV (%)</b>	22,06	21,64	3,80	4,25

\*Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% (\*) ou 1% (\*\*). SD - semeadura direta; E1<sub>v</sub> - escarificado em 2001; E3<sub>i</sub> - escarificado em 2003; E5<sub>i</sub> - escarificado em 2005; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; NS – não significativo.

Tabela 22– Coesão (C) e ângulo de atrito interno ( $\Phi$ ) do solo na colheita.

Época	Colheita*			
	Camada (m) 0-0,10		0,10-0,20	
Manejo (M)	C (kPa)		$\Phi$ (°)	
SD	48,08 a	51,54 a	49,35 a	43,75 ab
E1 <sub>v</sub>	27,85 b	44,70 a	47,80 a	42,22 b
E3 <sub>i</sub>	32,25 ab	49,48 a	36,60 a	45,49 a
E5 <sub>i</sub>	40,09 ab	44,34 a	35,60 a	37,82 c
<b>Tráfego (T)</b>				
Sem tráfego	36,53 a	51,43 a	42,70 a	42,41 a
Com tráfego	37,60 a	43,60 b	43,52 a	42,22 a
<b>Teste F</b>				
<b>M</b>	*	NS	*	**
<b>T</b>	NS	*	NS	NS
<b>M x T</b>	NS	**	NS	**
<b>DP</b>	11,63	7,48	7,88	1,80
<b>CV (%)</b>	31,39	15,74	18,25	4,27

\*Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% (\*) ou 1% (\*\*). SD - semeadura direta; E1<sub>v</sub> - escarificado em 2001; E3<sub>i</sub> - escarificado em 2003; E5<sub>i</sub> - escarificado em 2005; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; NS – não significativo.

Contrastando os dados de coesão entre a semeadura (Tabela 21) e a colheita (Tabela 22), observa-se que houve um ligeiro adensamento do solo, pois os valores no geral aumentaram.

Na tabela 23 estão dispostos os dados de coesão do solo na camada de 0-0,10m na época da semeadura.

Embora não apresentando diferença na coesão (Tabela 23), o  $E1_v$  apresentou a maior entre os tratamentos, indiferente do nível de tráfego, explicando a maior demanda de esforço horizontal e vertical (Figura 15) e a maior tensão de pré-consolidação.

Tabela 23– Coesão do solo (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0-0,10m na semeadura.

Tráfego	Manejo*			
	SD	$E1_v$	$E3_i$	$E5_i$
Sem tráfego	49,55 Aa	51,50 Aa	38,52 Aa	14,78 Ab
Com tráfego	16,08 Ba	30,58 Ba	25,20 Ba	24,78 Aa

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na tabela 24 encontram-se os dados de coesão na interação manejo x tráfego, sendo que na tabela 25 estão dispostos os dados de ângulo de atrito dessa interação.

Tabela 24- Coesão do solo (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na semeadura.

Tráfego	Manejo*			
	SD	$E1_v$	$E3_i$	$E5_i$
Sem tráfego	24,20 Ab	29,78 Aab	41,07 Ba	28,33 Aab
Com tráfego	25,67 Abc	33,00 Ab	62,60 Aa	12,07 Bc

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O alto valor de resistência ao cisalhamento nesta camada para o  $E3T_i$  é explicado pela sua alta coesão, o qual confere tal comportamento.

Tabela 25- Ângulo de atrito interno (em °) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na semeadura.

Tráfego	Manejo*			
	SD	E1 <sub>v</sub>	E3 <sub>i</sub>	E5 <sub>i</sub>
Sem tráfego	40,73 Bb	39,95 Bc	36,57 Bc	44,71 Aa
Com tráfego	43,85 Aab	46,76 Aa	45,34 Aab	42,36 Ab

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

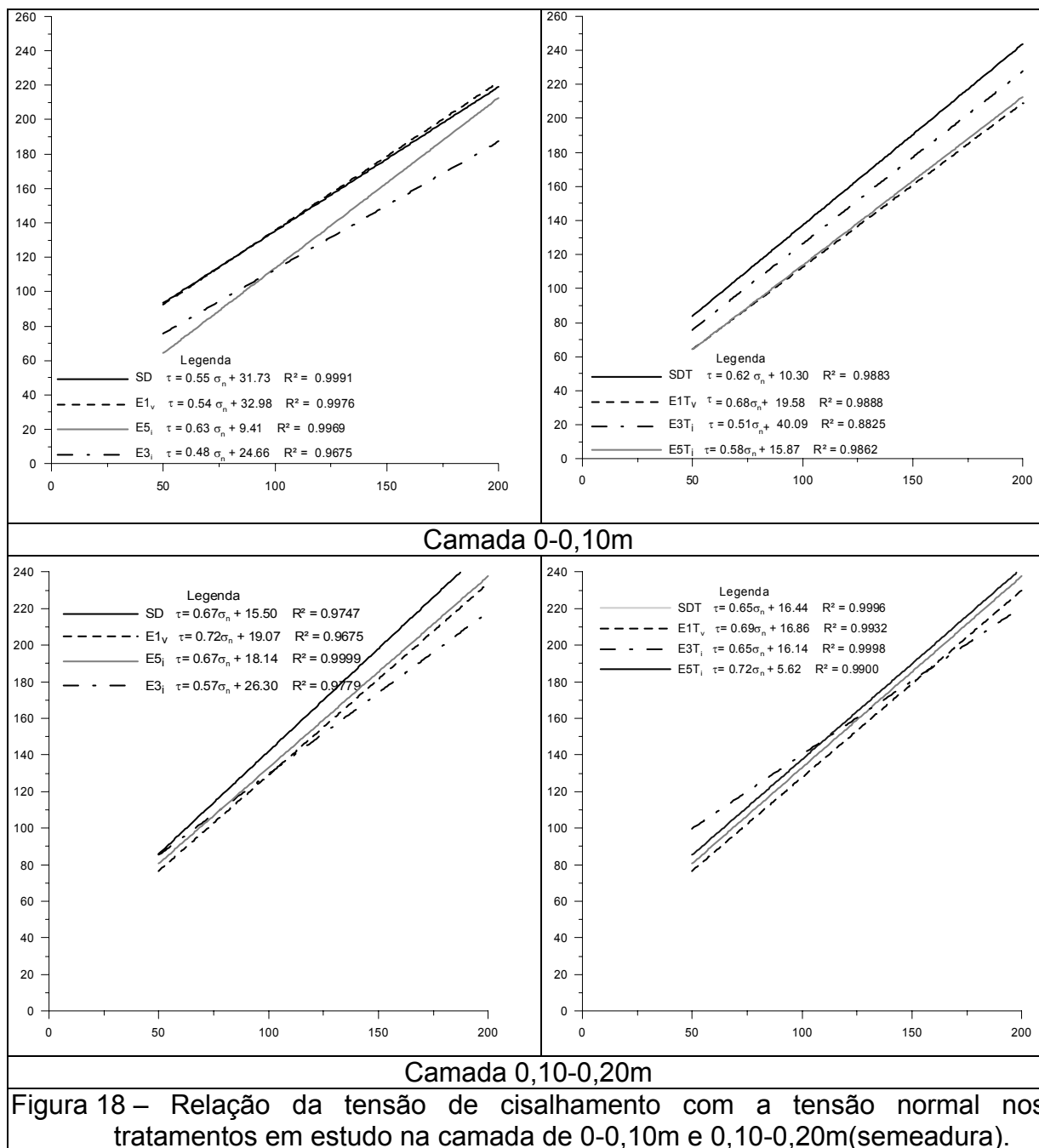
Os dados da interação manejo x solo referentes à época da colheita encontram-se nos apêndices N e O.

Na figura 18 ilustra-se a relação da tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) com a tensão normal ( $\sigma_n$ ), na semeadura direta com e sem tráfego (SD e SDT), escarificado em 2001 com e sem tráfego (E1<sub>v</sub> e E1T<sub>v</sub>), escarificado em 2003 (E3<sub>i</sub> e E3T<sub>i</sub>) e escarificado em 2005 (E5<sub>i</sub> e E5T<sub>i</sub>), nas camadas de 0-0,10m (camada superficial) e 0,10-0,20m (camada intermediária).

Na camada superficial, o SD e E1<sub>v</sub> apresentaram comportamento similar, mostrando as tensões de cisalhamentos mais elevadas, seguidos pelo E3<sub>i</sub> e E5<sub>i</sub>. Adicionando o efeito do tráfego, o SD continua apresentando os maiores valores, porém o E1<sub>v</sub> e o E5<sub>i</sub> apresentaram os menores, enquanto o E3<sub>i</sub> ficou no intermédio do SD com E1<sub>v</sub>. Esses dados comprovam que o solo sob semeadura direta há 13 anos encontra-se sob elevada condição de compactidade, pois apresentou elevadas tensões de cisalhamento e tensão de pré-consolidação e uma demanda maior de esforços.

Como já mencionado, a compactação no solo sob semeadura direta, permanece na forma de um aumento da densidade do agregado atribuindo ao solo tal resistência (Dias Jr. & Pierce, 1996).

Segundo Braidá (2004), as resistências ao cisalhamento dos agregados individuais são sempre maiores que os da massa do solo, assim aumentando a resistência interna do solo, porém quando este ponto é alcançado os agregados são rompidos, proporcionando compactação do solo.



Klein (1990) afirma que a compactação do solo pode reduzir a eficiência dos mecanismos sulcadores, acompanhado pelo embuchamento da máquina, pois os órgãos ativos da semeadora tende a subir, afetando assim descida uniforme da semente gerando tal embuchamento. Além disso, Araújo et al. (1998) relatam que a compactação gera redução da área mobilizada. Segundo Casão Junior et al. (1998), essa compactação tende a gerar aumento na tração do conjunto trator-semeadora, desencadeando uma série de desvantagens à máquina, como elevado consumo de potência e redução da eficiência de trabalho.

Na camada intermediária (0,10-0,20m), na linha sem ação de tráfego, o SD continua denotando para as maiores tensões de cisalhamentos, porém os demais apresentaram comportamentos similares.

No geral, o manejo foi à variável de maior influência, desta forma comprova-se que ação do manejo no solo atua nesses parâmetros. Esta constatação é contraditória à conclusão de Brandt (2005), o qual não encontrou diferença entre os sistemas de semeadura direta consolidada há 13 anos, preparo convencional em 2003, preparo convencional em 2004, escarificado em 2001, escarificado em 2002 e escarificado em 2004, em solo com textura franca arenosa, Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico.

Ao longo das camadas de solo, indiferentemente da época de coleta, o solo sob sistema de semeadura direta apresenta elevado grau de compactação, sendo que as conclusões obtidas nos outros parâmetros, sejam compressivos ou esforços solicitados a haste sulcadora tipo facão, apontam para o mesmo comportamento.

Com o passar dos anos, a escarificação perde sua eficácia no solo, sendo que após quatro anos, o solo encontra-se em condições piores do que antes da escarificação. Dois anos após a realização da escarificação, é observável ainda efeito residual no solo, porém, em camadas superiores à camada escarificada, não se encontra mais efeito.

## **6.2. Estudo 2**

### **6.2.1. Influência da compactação nos esforços e na mobilização do solo por escarificador.**

Na tabela 26 estão dispostos os dados de esforço horizontal ( $F_H$ ), vertical ( $F_V$ ), tração ( $F_T$ ) e momento ( $M_O$ ) associados à haste escarificadora na semeadura direta (SD) e na compactação adicional (CA).

Tabela 26– Esforço horizontal ( $F_H$ ), vertical ( $F_V$ ) e tração ( $F_T$ ) e momento ( $M_O$ ) associados à haste escarificadora.

Trat*	F <sub>H</sub> (kN)			F <sub>V</sub> (kN)			F <sub>T</sub> (kN)			M <sub>O</sub> (kN m)
	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Méd
SD	17,20	20,49	18,57 b	0,00	1,95	1,24 b	18,31	21,80	19,76 b	0,02 a
CA	19,24	23,16	22,08 a	1,64	2,57	2,21 a	20,48	24,65	23,50 a	0,02 a

\*Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente pelo teste de t (Student) a 5% de probabilidade.

Trat. – tratamento, Máx – valor máximo, Mín – valor mínimo; Méd – média.

Observa-se que os dados apresentaram diferença entre os tratamentos (Tabela 26), exceto o momento, demonstrando que o solo não gera movimento rotacional na ferramenta. A compactação adicional (CA) gerou um aumento de 15,90% no esforço horizontal e conseqüentemente, no esforço de tração, sendo que a maior contribuição da compactação adicional foi no esforço vertical, onde proporcionou um incremento de 43,80%. Tal fato demonstra que ação do carregamento é mais expressiva neste sentido.

O solo sob compactação adicional apresentou os maiores valores, sejam mínimos, máximos ou médios, sendo que os valores encontrados para o SD condizem com os valores encontrados na bibliografia, como Machado et al. (1996) que encontraram F<sub>T</sub> de 22,11kN para haste escarificadora de ponteira estreita, operando em Planossolo a 3,60km h<sup>-1</sup>, com umidade gravimétrica de 12%.

Nas figuras abaixo (Figura 19 e 20), encontra-se ilustrado o comportamento dos esforços horizontais e verticais, atuantes na ponteira do escarificador ao longo do trajeto percorrido.

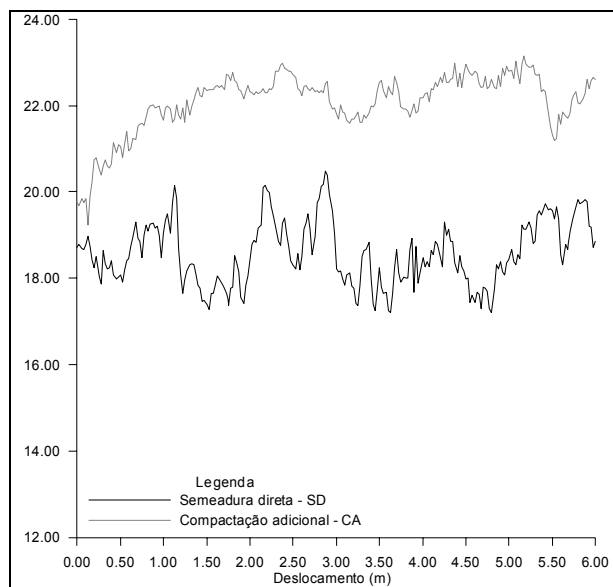


Figura 19 - Comportamento do esforço horizontal nos tratamentos SD e CA.

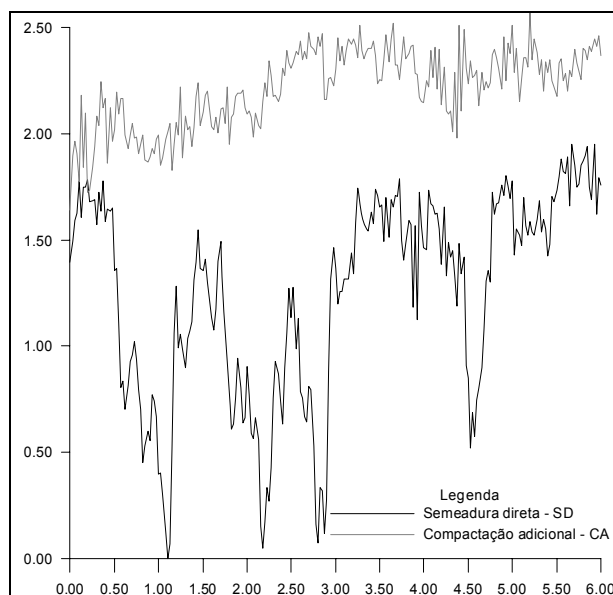


Figura 20 - Comportamento do esforço vertical nos tratamentos SD e CA.

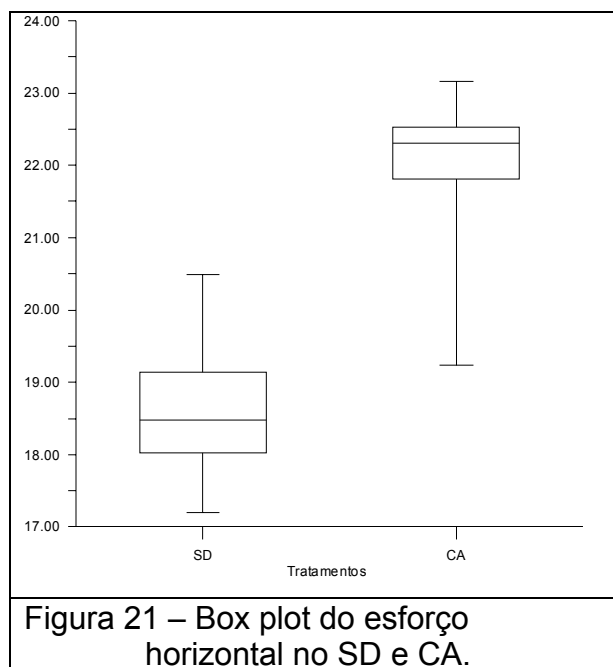
Verifica-se que a compactação adicional (CA) proporcionou aumento na demanda de esforços horizontais ( $F_H$ ) e assim para os verticais ( $F_V$ ). O  $F_H$  variou de 19,24-23,16kN para o tratamento compactação adicional e o sementeira direta

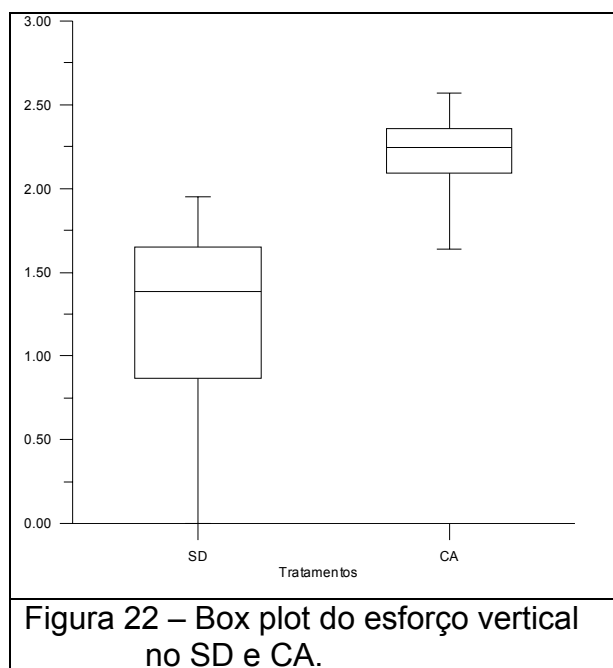


variou de 17,20-20,49kN. Em relação ao  $F_v$ , a variação foi 1,64-2,57kN para o CA e 0-1,95kN para o SD.

Analisando-se o comportamento dos dados via box plot (Figura 21 e 22), nota-se a grande diferença entre os tratamentos, onde o CA apresentou uma grande variação entre o quartil superior ao inferior nos esforços horizontais, isso se deve provavelmente ao efeito heterogêneo da compactação no solo nessa direção, uma vez que a compactação tende a gerar lâminas horizontais compactadas, assim proporcionando camadas com níveis diferenciados de compactação, que resultaram em tal heterogeneidade. O SD apresentou uma grande concentração de dados em torno da média, demonstrando ação desse sistema em sua estrutura, apontando para uma condição de menor heterogeneidade.

No box plot referente ao esforço vertical (Figura 22), observa-se o grande estado de compactação do solo sob compactação adicional, pois os dados apresentaram variação bem menor entre o quartil superior ao inferior, direcionando à conclusão que a compactação forma uma estrutura massiva do solo, oferecendo maior resistência.





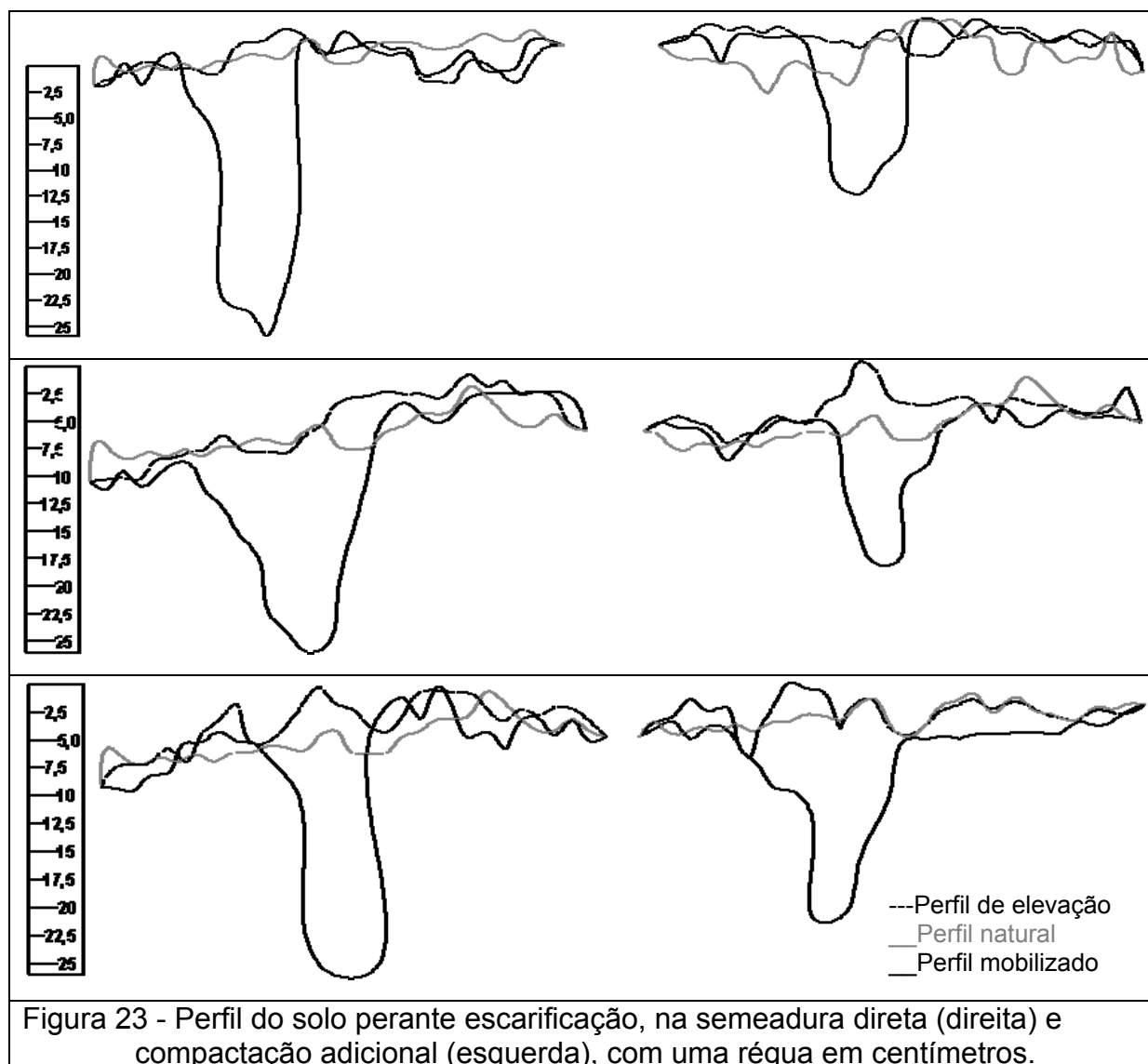
Na tabela 27 estão dispostos os dados de área mobilizada, área de elevação, empolamento e profundidade escarificada nos tratamentos CA e SD. A semeadura direta apresentou maior área mobilizada ( $0,0176\text{m}^2$ ) que o tratamento com compactação adicional ( $0,0068\text{m}^2$ ), apresentando diferença, porém não apresentaram diferença na área de elevação. Essa verificação reafirma a boa estrutura apresentada pelo SD, pois apresentou maior revolvimento e menor demanda de esforços.

Tabela 27- Dados médios de área mobilizada ( $A_m$ ), área de elevação ( $A_e$ ), empolamento (Emp) e profundidade de trabalho (P), nos tratamentos em estudo.

Tratamento*	$A_m$ ( $\text{m}^2$ )	$A_e$ ( $\text{m}^2$ )	Emp (%)	P (m)
SD	0,0177 a	0,0011 a	0,072	0,2252 a
CA	0,0069 b	0,0014 a	0,208	0,1486 b

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na figura 24 estão ilustrados os perfis mobilizados pelo escarificador, o qual se pode verificar grande influência do CA na redução da área de solo mobilizada e na profundidade de trabalho, comparando-o com o SD.



Koolen & Kuipers (1983) descreveram o movimento do solo perante a ação de ferramentas estreitas e largas, ocorrendo pela formação de vários blocos que se formam ao longo do movimento da ponteira. Assim sendo, esses dados demonstram que a compactação gera formação de um grande bloco maciço o qual reduz a transmissão de tensões de ruptura no solo, gerando redução da área mobilizada ao haver movimento do solo pela haste, pois esse bloco rompe-se como um todo próximo à ponteira, sendo deslocado para cima; ao encontrar as outras lâminas de solo compactadas reduz ainda mais a área mobilizada, desencadeando aumento

dos esforços conforme observados nos dados apresentados anteriormente (Tabela 26).

### 6.2.2. Efeito da compactação na compressibilidade, resistência à penetração e propriedades físicas

Os dados que expressam o comportamento compressivo do solo encontram-se nas tabelas 28, 29 e 30.

Tabela 28– Densidade inicial (DSI), tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) e coeficiente de compressão (Cc) em solo sob semeadura direta e compactação adicional.

Tratamento*	DSI		Cc	DSI		Cc
	(Mg m <sup>-3</sup> )	$\sigma_p$ (kPa)		(Mg m <sup>-3</sup> )	$\sigma_p$ (kPa)	
Camada 0,20 - 0,25m			Camada 0,25 - 0,30m			
<b>Tratamento (T)</b>						
SD	1,72 b	45,60 a	0,11 a	1,71 b	46,90 a	0,12 a
CA	1,90 a	41,93 a	0,07 b	1,81 a	40,03 a	0,07 b
<b>Escarificação (E)</b>						
Com	1,80 a	43,72 a	0,11 a	1,74 a	41,03 a	0,11 a
Sem	1,82 a	43,81 a	0,08 b	1,78 a	45,90 a	0,09 b
<b>Teste F</b>						
T	**	NS	**	**	NS	**
E	NS	NS	**	NS	NS	*
T X E	**	NS	*	NS	NS	NS
DP	0,04	16,45	0,13	0,05	10,23	0,01
CV	2,48	37,59	13,96	2,94	23,53	14,23

\*Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% (\*) ou 1% (\*\*).

SD - semeadura direta; CA – compactação adicional; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; NS – não significativo.

Tabela 29– Densidade inicial do solo (em  $\text{Mg m}^{-3}$ ) na interação manejo x escarificação, na camada 0,20-0,25m.

Escarificação	Tratamento*	
	SD	CA
Com	1,77 Ab	1,86 Ba
Sem	1,66 Bb	1,94 Aa

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

SD - semeadura direta; CA – compactação adicional.

Tabela 30– Coeficiente de compressão do solo na interação manejo x escarificação, na camada 0,20-0,25m.

Escarificação	Tratamento*	
	SD	CA
Com	0,09 Ba	0,07 Ab
Sem	0,13 Aa	0,08 Ab

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente a nível de 5% pelo teste de Tukey.

SD - semeadura direta; CA – compactação adicional.

Na camada de 0,20-0,25m, a compactação adicional elevou a densidade do solo (DSI) de  $1,72\text{Mg m}^{-3}$  para  $1,90\text{Mg m}^{-3}$ , sendo que a escarificação não apresentou influência nesse parâmetro, porém a interação dessa com tratamento apresentaram diferença ao nível de 1% de significância do teste de Tukey. Na tabela 29, verifica-se a grande influência da compactação na densidade do solo inicial, sendo que o SD diferiu do CA com e sem a ação do escarificador.

Em ambas as camadas, a tensão de pré-consolidação não sofreu modificação com adição da compactação, podendo ser atribuído ao fato que solo sob semeadura direta encontra-se em elevado nível de compactação. Outro fato é que a soleira do escarificador não alterou a tensão de pré-consolidação, comprovando que a geometria usada na ponteira não gera compactação abaixo da profundidade de trabalho. Silva et al. (2003) encontraram influência da soleira do arado de discos e da grade aradora na tensão de pré-consolidação, em Latossolo no Cerrado, onde esses implementos ocasionaram aumento dessa, demonstrando que só esses tipos de implementos geram tal compactação.

Em relação ao coeficiente de compressão na camada 0,20-0,25m, observa-se que a adição da compactação e da escarificação gerou diferença entre os tratamentos, onde (Tabela 30) o solo sob compactação adicional apresentou menor valor de  $C_c$  de 0,07 contra 0,09 da semeadura direta com escarificação e 0,08 contra 0,13 da semeadura direta sem escarificação, reafirmando que esse solo encontra-se em elevado grau de compactação. Com a adição da escarificação, diferenças foram obtidas apenas na semeadura direta.

Na camada de 0,25-0,30m (Tabela 28), a DSI apresentou diferença apenas em relação ao tratamento, onde a compactação adicional proporcionou um incremento de  $1,71 \text{ Mg m}^{-3}$  para  $1,81 \text{ Mg m}^{-3}$ , demonstrando que a ação da compactação consegue alcançar profundidades de até 0,30m. Esses altos valores de densidade do solo podem restringir o desenvolvimento do sistema radicular, conforme Reichert et al. (2003), que propuseram um valor de densidade crítica para solo franco arenoso situando entre  $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$  e  $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ .

O  $C_c$  não foi influenciado pela interação manejo x escarificação, diferença foi observada apenas na adição da escarificação no SD, onde o solo escarificado proporcionou maior  $C_c$ , demonstrando que a ação do escarificador gera efeito para profundidades superiores à profundidade de trabalho, proporcionando condições melhores. Segundo Oliveira et al. (2003), quanto maior o  $C_c$ , maior a suscetibilidade à compactação do solo. Sendo assim, a ponteira escarificadora conseguiu transmitir seu efeito para a camada posterior, proporcionando uma estrutura em condições melhores.

Na tabela 31, estão os dados médios de resistência à penetração (RP) e umidade volumétrica ( $\theta$ ) nos tratamentos compactação adicional sem e com escarificação (CA SE; CA E) e semeadura direta sem e com escarificação (SD SE; SD E).

Tabela 31- Dados médios de resistência à penetração (RP) e umidade ( $\theta$ ) do solo.

Tratamento*	RP		$\theta$ (kg kg <sup>-1</sup> )
	(MPa)		
Compactação adicional sem escarificação	2,946	a	0,2576a
Compactação adicional com escarificação	2,524	ab	0,3145a
Semeadura direta sem escarificação	1,987	ab	0,2948a
Semeadura direta com escarificação	1,148	b	0,3129a

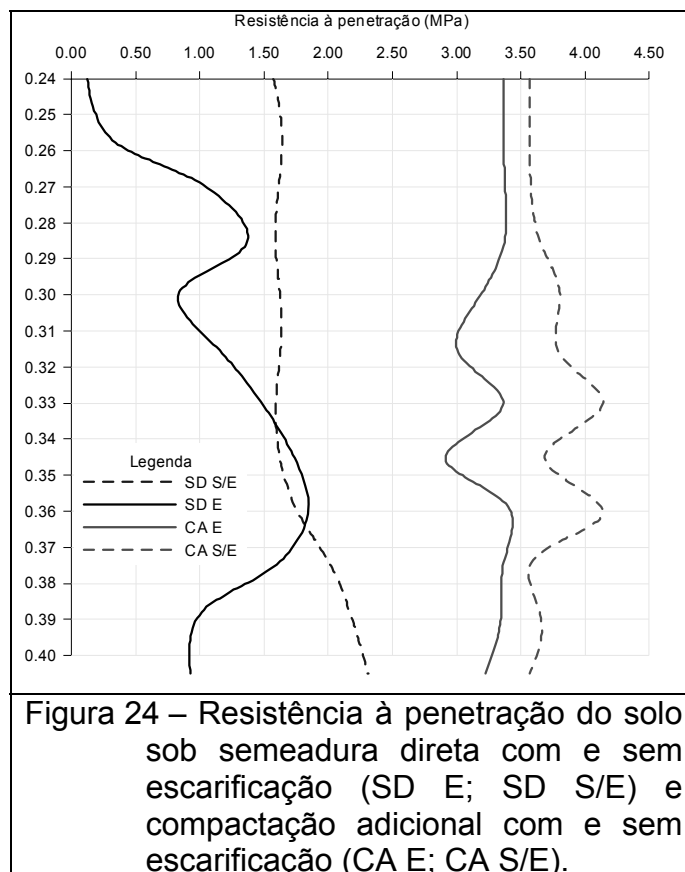
\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. SD - semeadura direta; CA – compactação adicional.

Verifica-se que as maiores médias foram apresentadas pela compactação adicional, a qual gerou um aumento de 33% no tratamento sem escarificação; quando se adicionou a escarificação, esse aumento foi de 54%. Conforme verificado acima, a escarificação reduziu a resistência à penetração, sendo que o CA SE diferiu do SD E, não diferindo dos demais.

Solo com compactação adicional, indiferentemente da escarificação, ofereceu resistência maior que 2MPa, considerada crítica à penetração das raízes por Taylor et al. (1966).

Os valores encontrados no SD SE são similares aos encontrados por Pereira et al. (2002) em Latossolo Roxo, demonstrando que solos sob semeadura direta encontram-se em nível elevado de compactidade.

Na figura 24 está ilustrada a resistência do solo à penetração na camada de 0,25-0,40m (abaixo da profundidade escarificada).



Observa-se que os tratamentos com compactação adicional, sejam com ou sem escarificação, apresentaram maior resistência à penetração (RP). Outro fato também constatado foi que os tratamentos que sofreram escarificação apresentaram menores valores de resistência à penetração. Relacionando isso com o fato de que a compactação adicional originou aumento da RP, percebe-se que a escarificação gera uma série de tensões de ruptura, as quais são transmitidas para profundidades superiores à escarificada, comprovando que a haste não gera compactação abaixo da profundidade de trabalho, contrariando as conclusões obtidas por Cohron (1971). Combinado a isso o CA apresentou a menor macroporosidade, independente da escarificação (Tabela 32) confirmando seu elevado nível de compactação.

A adição da escarificação no solo proporcionou melhores condições no solo para o estabelecimento de planta, visualizada pelo maior coeficiente de compressibilidade, menor densidade e menor resistência a penetração.

Na tabela 32 encontram-se os dados de macroporosidade, microporosidade, porosidade e densidade do solo na camada 0,20-0,25m e 0,25-0,30m.



Tabela 32—Macroporosidade(Ma), microposidade (Mi), porosidade total (Pt) e densidade do solo (Ds) nas camadas 0,20-0,25m e 0,25-0,30m.

Manejo* (M)	Camada 0,20-0,25m				Camada 0,25-0,30m			
	Ma	Mi (%)	Pt	Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	Ma	Mi (%)	Pt	Ds (Mg m <sup>-3</sup> )
SD	10,16 a	34,97 a	45,13 a	1,72 b	10,96 a	35,03 a	46,11 a	1,71 b
CA	7,35 b	34,78 a	42,12 b	1,85 a	6,61 b	35,62 a	42,24 b	1,82 a
<b>Escarificação (E)</b>								
Com	10,47 a	35,01 a	45,49 a	1,74 b	10,24 a	35,01 a	45,36 a	1,74 b
Sem	7,03 b	34,74 a	41,76 b	1,83 a	7,34 b	35,64 a	42,98 b	1,80 a
<b>Teste F</b>								
<b>M</b>	**	NS	**	**	**	NS	**	**
<b>E</b>	**	NS	**	**	**	NS	**	*
<b>M x E</b>	**	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
<b>DP</b>	1,32	0,48	1,56	0,04	1,42	0,80	1,28	0,05
<b>CV (%)</b>	15,11	1,36	3,58	2,09	16,18	2,27	2,90	2,66

\*Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% (\*) ou 1% (\*\*) de probabilidade.

SD – semeadura direta; CA - Compactação adicional; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

Na camada 0,20-0,25m, observa-se que o manejo, a escarificação e a sua interação tiveram influência na macroporosidade, onde (Tabela 33) solo sob semeadura direta, apresentou a maior macro independentemente da escarificação, sendo que na linha escarificada, o SD diferiu do CA, porém na linha sem escarificação não apresentaram diferença. Tal fato demonstra que solo sob semeadura direta encontra-se sob influência do processo de compactação, visto que os valores apresentados são inferiores a 10%, considerado insuficiente para o desenvolvimento radicular segundo Forsythe (1967).

Observa-se que com adição da escarificação, o solo aumentou a macroporosidade (Tabela 33) e reduziu a densidade (Tabela 32), sendo tal fato mais expressivo no SD, confirmando a conclusão obtida nos dados de área mobilizada, que o solo sob compactação adicional, oferece menor transmissão de tensões de ruptura em sua estrutura.

Tabela 33- Macroporosidade (em %) na interação manejo x escarificação, na camada 0,20-0,25m (estudo 2).

Escarificação	Manejo*	
	SD	CA
Com	13,11 Aa	7,84 Ab
Sem	7,21 Ba	6,85 Aa

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

Referente à microporosidade (Tabela 32), influência foi encontrada apenas na interação manejo x escarificação, onde (Tabela 34) o SD diferiu do CA com e sem escarificação. Embora apresentando diferença, nota-se que a variação das mesmas, foi muito pequena.

Tabela 34- Microporosidade (%) na interação manejo x escarificação, na camada 0,20-0,25m (estudo 2).

Escarificação	Manejo*	
	SD	CA
Com	34,37 Bb	35,66 Aa
Sem	35,57 Aa	33,91 Bb

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

A porosidade total (Tabela 32) na camada de 0,20-0,25m foi maior no SD, sendo que esse diferiu do CA. Tal fato é atribuído à macroporosidade, que foi maior no SD, proporcionando aumento na porosidade, pois a microporosidade foi similar entre os tratamentos.

Na camada 0,25-0,30m (Tabela 32) continua o mesmo comportamento, solo sob compactação adicional, apresentou a maior densidade do solo e menores porosidade total e macroporosidade, confirmando que ação da compactação consegue chegar a profundidade de até 0,30m. Nesta camada não houve efeito da interação manejo x escarificação.

A compactação não gerou aumento da microporosidade, que conforme Trowse (1971) é um dos fatores desenvolvidos neste processo, levando a conclusão que solo sob semeadura direta há 13 anos encontra-se sob influência da compactação, direcionando para o uso de escarificador para reverter tal condição.

Outro fator observado nesses dados, é que o escarificador realmente possui influência em camadas superiores a escarificada, pois conseguiu alterar os parâmetros de macroporosidade, porosidade e densidade do solo, proporcionando melhores condições, confirmando a inexistência de compactação nessa camada.

## 7. CONCLUSÕES

### Estudo 1

HIPÓTESE 1 - Solo argiloso escarificado oferece menor demanda de esforços e maior área mobilizada por mecanismo sulcador do tipo facão, sendo que, com o aumento do período da realização da escarificação esses parâmetros sofrem inversão em seus valores.

CONCLUSÃO 1 – A hipótese um foi contemplada em parte, pois a escarificação realizada há menos de um ano exige menores demandas de esforços seja tração como vertical, maior área mobilizada e com aumento do período da realização da escarificação esses parâmetros sofreram inversão em seus valores. Porém, solo escarificado há mais de quatro anos requer maior demanda de esforços e apresenta menor área mobilizada do que solo escarificado a 2 e 4 anos e solo sob semeadura direta há 13 anos.

HIPÓTESE 2 - O aumento no nível da compactação no solo tende a aumentar a tensão de pré-consolidação, reduzir o coeficiente de compressão e aumentar a tensão de cisalhamento, gerando uma condição adversa para o desenvolvimento da cultura.

CONCLUSÃO 2 – A segunda hipótese foi contemplada, pois com o aumento do período da realização da escarificação, houve aumento do processo de compactação, expresso pela maior tensão de pré-consolidação, menor coeficiente de compressão e aumento da tensão de cisalhamento. Em solo arenoso, com adição da compactação adicional, não houve aumento da pressão de pré-consolidação, pois o solo sob semeadura direta há mais de 13 anos encontra-se com elevado grau de compacidade.

HIPÓTESE 3 - A tensão de pré-consolidação, coeficiente de compressibilidade, resistência ao cisalhamento, juntamente com os dados de esforços, são bons indicadores do estado de compactação do solo.

CONCLUSÃO 3 – Hipótese contemplada, pois de acordo que aumentava o efeito da compactação no solo, a tensão de pré-consolidação, resistência ao cisalhamento e a demanda de esforço de tração e vertical aumentavam e reduzia o coeficiente de compressão, indicando o nível de compactação em que se encontravam os tratamentos em estudo.

HIPÓTESE 4 - Solo sob sistema de semeadura direta requer maior esforço por área trabalhada do que solo escarificado.

CONCLUSÃO 4 – Hipótese contemplada em parte, pois solo escarificado há mais de quatro anos requer maior esforço por área trabalhada, demonstrando condições piores que solo sem revolvimento. Já solos escarificado há menos de dois anos contemplam essa hipótese.

HIPÓTESE 5 - A 0,10m da lateral pneu, encontra-se influência direta do tráfego nas propriedades mecânica do solo e na dinâmica da máquina.

CONCLUSÃO 5 – Hipótese contemplada em parte, pois no geral o tráfego lateral não influenciou as propriedades mecânicas do solo, mas sim a interação do tráfego com manejo. Na dinâmica máquina-solo, o tráfego influenciou os esforços horizontais e verticais, gerando aumento desses.

HIPÓTESE 6 - O efeito residual da escarificação no solo perdura até dois anos.

CONCLUSÃO 6 - Hipótese não contemplada, pois a escarificação perdura mais de dois anos no solo na camada escarificada, sendo que na camada abaixo não se encontra mais tal efeito.

## **7.1. Estudo 2**

HIPÓTESE 1 - A compactação induzida em solo de textura franco arenosa, aumenta a tensão de pré-consolidação e o requerimento de esforços em haste escarificadora.

CONCLUSÃO 1 – Hipótese contemplada em parte, pois a compactação gera aumento de 15,90% no esforço horizontal e conseqüentemente no esforço de

tração, sendo que a maior contribuição da se no esforço vertical, onde proporciona um incremento de 43,80%. Porém, não houve aumento na tensão de pré-consolidação, pois solo arenoso sob semeadura direta há mais de 13 anos encontra-se em alto grau de compactidade.

HIPÓTESE 2 - A compactação do solo gera redução da área mobilizada, área de elevação e da profundidade escarificada em solo de textura franco arenosa.

CONCLUSÃO 2 – Hipótese contemplada, a compactação induzida gerou redução de 38% da área mobilizada por haste escarificadora, sendo que essa não teve influência na área de elevação. A profundidade escarificada foi menor na compactação induzida, sendo que essa gerou redução de 65%.

HIPÓTESE 3 - Abaixo da profundidade escarificada encontra-se uma zona compactada em solo de textura franco arenosa sob semeadura direta, originada pela geometria da ponteira de escarificador.

CONCLUSÃO 3 - Hipótese não contemplada, pois solo escarificado encontra-se com menor resistência à penetração do que solo sem tal ação e maior percentual de macroporos.

## 8. REFERÊNCIAS

ABU-HAMDEH, N. H. Compaction and subsoiling effects on corn growth and soil bulk density. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, p.1213–1219, 2003.

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.

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 519-531, 2004.

AL-SUHAIBANI, S. A.; AL-JANOBI, A. Draught requirements of tillage implements operating on sandy loam soil. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 66, p.177–182, 1997.

ALVARENGA, R. C. et al. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 319-326, 1996.

ALVARENGA, R. C. et al. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho modificados pelo manejo do solo em cultivos de milho e feijoeiro irrigados. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 1 CD-ROM.

ARAÚJO, A. G. et al. Identificação das restrições para expansão do plantio direto na região da represa de Itaipu. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE PLANTIO DIRETO NA PEQUENA PROPRIEDADE, 1998, Pato Branco. **Trabalhos apresentados**. Pato Branco: IAPAR, 1998. 18p.

ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; COSTA, A. C. S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 495-504, 2004.

ASHBURNER, L. E.; SIMS, B. G. **Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza**. San José: IICA, 1984. 476p.

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

ASSIS, R. L. de; LANÇAS, K. P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 507-514, 2005.

BARBIERI, J. L.; POLI, D. M.; DONZELLE, J. L. **Os Latossolos Roxos e a cana-de-açúcar**. São Paulo: Coopercucar, 1985. (Boletim Técnico, n. 32).

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. New York: 4<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons, 1972. 498p.

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

BERTIN, E. G. et al. Plantas de cobertura em pré-safra à cultura do milho em plantio direto. Efeito na densidade e sistema poroso do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 1 CD-ROM.

BEUTLER, A. N. et al. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 575-580, 2004.

BOMBARDELLI, M.; SILVA, S. de L.; PEREIRA, J. O. Demanda energética em sistemas de preparo reduzido do solo e semeadura direta. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28., 1995, Pelotas/RS. **Anais...** Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 1995. 1 CD-ROM.

BORDIGNON, J. et al. Demanda de tração em linha de semeadura em função de diferentes profundidades de atuação da haste e velocidades de operação, em semeadura direta. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Anais...** Canoas: Pontifícia Universidade Católica, 2005. 1 CD-ROM.

BOTTA, G. **Combination of weight and wheel size in order to limit soil compaction**. 1997. 97F. Thesis (doctorate in Magister Scientiae) - University La Plata, Argentina, 1997.



BOTTA, G. F. et al. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. **Soil & Tillage Research**, disponível on-line. 2006.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 126f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BRANDT, A. A. **Propriedades mecânicas de solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais**. 2005. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

BUENO, B. de S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. Viçosa: UFV, 1980. 131p.

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

CASÃO Jr., R. et al. Avaliação do desempenho da semeadora-adubadora Magnum 2850 PD no basalto Paranaense. Londrina: IAPAR, 1998. p. 1-47. (**Circular Instituto Agrônomo do Paraná**: n.105).

CASÃO Jr., R.; ARAÚJO, A. G.; RALISCH, R. Desempenho da semeadora-adubadora Magnum 2850 PD no basalto paranaense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 523-532, 2000.

CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, p. 263-266, 1985.

CEPIK, C. et al. Demanda de tração em haste sulcadora de adubo em função de coberturas de inverno e profundidades de atuação da haste, em semeadura direta de feijão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Anais...** Canoas: Pontifícia Universidade Católica, 2005. 1 CD-ROM.

CHANCELLOR, W. J. Effects of compaction on soil strength. In: BARNES, K. K. et al. **Compaction of agricultural soils**. Michigan: ASAE, 1971. cap. 5, p. 190-213.

CHANEY, K.; HOGDSON, D. R.; BRAIM, M. A. The effects of direct drilling, shallow cultivation and ploughing on some soil physical properties in a long-term experiment on spring barley. **Journal of Agricultural Science**, v. 104, p. 125-133, 1985.

COHRON, G. T. Force's causing soil compaction. In: BARNES, K. K. et al. **Compaction of agricultural soils**. ASAE, Michigan, 1971, cap. 4, p. 106-124.

COLLINS, B. A.; FOWLER, D. B. Effect of soil characteristics, seeding depth, operating speed, and opener design on draft force during direct seeding. **Soil & Tillage Research**, v. 39, p. 199-211, 1996.

COOPER, A. W. Effects of tillage on soil compaction. In: BARNES, K. K. et al. **Compaction of agricultural soils**. Michigan: ASAE, 1971. cap. 7, p. 315-366.

DERPSCH, R. Importância da cobertura do solo e do preparo conservacionista. In: Simpósio de manejo do solo e Plantio Direto no Sul do Brasil. SIMPÓSIO DE CONSERVAÇÃO DO SOLO NO PLANALTO, 3, 1984, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: SBCS, 1984. 1 CD-ROM.

DERPSCH, R.; BENITES, J. R. **Agricultura Conservacionista no Mundo**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 1 CD-ROM.

DESBIOLLES; J. M. A. et al. A Novel approach to the prediction of tillage tool draught using a standard tine. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 66, p. 295-309, 1997.

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

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

DIDONÉ, A. Jr. et al. Efeito da chuva natural sobre perdas de água e solo em sistemas de produção sob plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: SBCS, 2002. 1 CD-ROM.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: 2. ed. rev. atual. EMBRAPA, 1997. 212 p.

\_\_\_\_\_. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA, 1999. 412 p.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRAPDP. **Evolução da área com plantio direto no Brasil – dados estatísticos**. Disponível em: <<http://www.agri.com.br/febrapdp/pd>>. Acesso em: 21 de out. 2006.

BORGES FILHO, E. L. **O desenvolvimento do plantio direto no Brasil. A conjunção de interesses entre agricultores, indústrias e o estado**. 2001. 141f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento econômico) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

FORSYTHE, W. M. Las propiedades físicas los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. **Fitotecnia Latino Americana**, v. 4, p. 165-176, 1967.

FURLANI, C. E. A. et al. Desempenho operacional de uma semeadora - adubadora de precisão, em função do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno. **Engenharia Agrícola**, v. 24, p. 388-395, 2004.

FURLANI, C. E. A.; LOPES, A.; SILVA, R. P. da. Avaliação de semeadora - adubadora de precisão trabalhando em três sistemas de preparo do solo. **Engenharia Agrícola**. v. 25, p. 458-464, 2005.

GILL, W. R.; VANDEN BERG, G. E. **Soil dynamics in tillage and traction**. Washington: Agricultural Research Service United States Department of Agriculture, 1967. 511p.

GODWIN, R. J.; SPOOR, G. Soil failure with narrow tines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 22, p. 213-228, 1977.

GUÉRIF, J. The influence of water-content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 29, p. 367-374. 1984.

GRABLE, A. R. Soil aeration and plant growth. **Advances in Agronomy**, v. 18, p. 57-106, 1966.

HÅKANSSON, I.; DANFORS, B. Effect of heavy traffic on soil conditions and crop growth. In: PROCEEDINGS OF THE SEVENTH CONFERENCE ON THE ISTVS, Calgary, Canada. **Anais...** Canada, 1981. p. 239–253.

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

HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R. et al. **Methods for assessment of soil degradation**. Lewis Publishers, Boca Raton, 1998. p.167-179.

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

HARRIS, W. L. The soil compaction process. In: BARNES, K. K. et al. **Compaction of agricultural soils**. ASAE, Michigan, 1971. cap. 2, p. 9-46.

HENKLAIN, J. C. Efeito do preparo sobre as características do solo. In: PEIXOTO, R. T. G.; AHRENS, D. C.; SAMAHA, M. J. **Plantio direto o caminho para uma agricultura sustentável**. Ponta Grossa: IAPAR, 1997. p. 206-221.

HETTIARATCHI, D. R. P. A critical state soil mechanics model for agricultural soils. **Soil Tillage & Research**, v. 56, p. 117-129, 1987.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981.733 p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; van OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 45-69.

HORN, R. et al. Physical properties related by soil structure. **Soil & Tillage Research**, v. 30, p. 187-216, 1993.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento sistemático de produção agrícola. Setembro de 2003**. disponível no site: [http://ww2.ibge.gov.br/pub/Producao\\_Agricola/Levantamento\\_Sistematico\\_da\\_Producao\\_Agricola\\_%5bmensal%5d/](http://ww2.ibge.gov.br/pub/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_%5bmensal%5d/). Acesso em: maio 2006.

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**, v. 68, p. 17–24, 2004.

KASISIRA, L. L.; du PLESSIS, H.L.M. Energy optimization for subsoilers in tandem in a sandy clay loam soil. **Soil & Tillage Research**, disponível on-line. 2005.

KONDO, M. K.; DIAS Jr., M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 497-506, 1999a.

KONDO, M. K.; DIAS Jr., M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 211-218, 1999b.

KOOLEN, A. J.; KUIPERS, H. **Agricultural soil mechanics**. Berlin: Springer- Verlag. 1983. 241P.

KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 45-69.

KLEIN, V. A. **Desenvolvimento de haste para escarificação em área sob sistema plantio direto**. 1990, 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 1990.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics, SI version**. Series in soil engineering. 553p, 1969.

LANÇAS, K. P. **Subsolador: desempenho em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e número de hastes**. 1987, 112f. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo, Botucatu, 1987.

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

LEBERT, M., BURGER N.; HORN, R. A. Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. In: LARSON, W. E. et al. **Mechanics and related process in structured agricultural soils**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989. p. 73-80.

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

MACHADO, A. L. T. **Influência do formato da borda de corte no desempenho das ponteiros escarificadoras**. 1992. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1992.

MACHADO, R. L. T. et al. Avaliação do desempenho de escarificador em Planossolo. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.2, 151-154, 1996.

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

MACHADO, A. L. T. et al. **Máquinas de preparo do solo, semeadura, adubação e tratamentos culturais**. Pelotas: 2ed. Editora e Gráfica Universitária-UFPel. 2005. 253p.

MAHL, D. et al. Avaliação da escarificação em área de plantio direto através da resistência do solo à penetração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SBCS, 2003. 1 CD-ROM.

MAHL, D. et al. Demanda energética e eficiência da distribuição de sementes de milho sob variação de velocidade e condição de solo. **Engenharia Agrícola**, v.24, p.150-157, 2004.

MARQUES, J. P.; LEVIEN, R.; BENEZ, S. H. Desempenho operacional de um escarificador, em solo sob vegetação espontânea diferentemente manejada. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Universidade Federal de Pelotas. 1995. 1 CD-ROM.

MAZUCHOWSKI, J. Z.; DERPSCH, R. **Guia de preparo do solo para culturas anuais mecanizadas**. Curitiba: Associação de Crédito e Extensão Rural do Estado do Paraná, 1984. 68p.

McCORMACK, D. E.; WILDING, L. P. Soil properties influencing strength of Cranfield and Geeburg soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 43, p. 167-73, 1979.

McKYES, E. **Soil cutting and tillage**. Amsterdam: Elsevier, 1985. 217p.

McKYES, E. **Agricultural engineering soil mechanics**. Amsterdam: Elsevier. 1989. 264p.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonizações, Secção de Geografia, 1961. 46p.

NICHOLS, M. L.; REED, I. F.; REAVES, C. A. Soil reaction to plowshare design. **Agricultural Engineering**, v. 39, p. 336-339, 1958.

NICHOLS, M. L.; COPPER, A. W.; REAVES, C. A. Design and use of machinery to loosen compact soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 19, p.128-130. 1955.

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

OLIVEIRA, M. L. de. et al. Desempenho de uma semeadora - adubadora para plantio direto, em dois solos com diferentes tipos e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1455-1463, 2000.

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

ORTIZ-CAÑAVATE, J.; HERNANS, J. L. **Técnica de la mecanización agraria**. 3º ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1989. 641p.

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

PALADINI, F.L.S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 135-140, 1991.

PAYNE, P. C. J. The relationship between the mechanical properties of soil and performance of simple cultivation implements. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 1, p. 23-50, 1956.

PEREIRA, J. O. et al. Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, p. 171-174, 2002.

PIERCE, F. J.; FORTIN, M. C.; STATON, M. J. Immediate and residual effects of zone tillage in rotation with no-tillage on soil physical properties and corn performance. **Soil & Tillage Research**, v. 30, p.149-165. 1992.

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

REINERT, D. J. **Soil structural form and stability induce by tillage in a Typic Hapludalf**. 1990. 129f. Thesis (Doctorate) - Michigan State University, East Lansing, 1990.

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, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD-ROM.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, v. 26, p. 321-344, 2005.

SAHU, R. K.; RAHEMAN, H. An approach for draft prediction of combination tillage implements in sandy clay loam soil. **Soil & Tillage Research**, v. 90, 145-155, 2006.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 313-319, 1995.

SANTOS F, A. G. dos; LANÇAS, K. P. Influência da interação velocidade de deslocamento e teor de água no solo, na operação de subsolagem. **Energia na Agricultura**, v. 8, p 1-11, 1993.

SANTOS, J. C. dos. **Análise de desempenho de um escarificador**. 1994. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade estadual de Campinas, Campinas, 1994.

SAS Institute Inc. **SAS/STAT User's Guide**. Version G. 4 ed. Cary: NC; SAS Institute Inc., 1990.



SECCO, D.; REINERT, D. J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho escuro sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, v.16, p. 52-61, 1997.

SERPA, F. M.; MAGALHÃES, P. S. G. Estimativa de esforços em ferramentas estreitas para o preparo de solos. **Engenharia Agrícola**, v. 17, p. 62-73, 1997.

SILVA, J. R. et al. **Correlação entre esforços de tração e profundidade de subsolagem**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 18p, 1984. (Boletim Técnico nº 96).

SILVA, A. P. et al. Efeito da subsolagem em alguns atributos físicos do solo em pomares de laranja no município de Matão-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO E ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 8., 1990, Londrina. **Anais...** Londrina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.86, 1990. 1 CD-ROM.

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**, v. 4, p. 239-249, 2000.

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**, v. 26, p. 1-8, 2002.

SILVA, R. B. et al. O Tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 973-983, 2003.

SILVA, R. B. et al. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.165-173, 2004

SILVEIRA, J. C. M. et al. Demanda de potência em função da velocidade de deslocamento e da profundidade de semeadura no sistema Plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Anais...** Canoas: Pontifícia Universidade Católica, 2005. 1 CD-ROM.

SOEHNE, W. H. Fundamental of pressure distribution and soil compaction under tractors tires. **Agricultural Engineering**, v. 39, p. 276-281, 1958.

SOUZA, R. F. de et al. Requerimento de potência de uma semeadora - adubadora na semeadura de milho e soja em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Anais...** Canoas: Pontifícia Universidade Católica, 2005. 1 CD-ROM.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 159f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

TAYLOR, J. C.; BELTRAME, L. F. S. Por que, quando e como utilizar a subsolagem. **Lavoura Arrozeira**, v. 3, p. 34-44, 1980.

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

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. New York: John Wiley & Sons, 1948. 566p.

TESSIER, S.; LAGUE, C. Soil compaction by liquid manure tanker. **Transactions of ASAE**, v. 34, p. 402-413, 1991.

TROUSE, A. C. Soil Condition as they affect plant establishment, root development, and yield. In: BARNES, K. K. et al. **Compaction of agricultural soils**. Michigan: ASAE, 1971. cap. 6, p. 225-306.

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: A review. **Agronomy Journal**, v. 86, p. 759-766, 1994.

YAVUZCAN, H. G.; VATANDAS, M.; GÜRHAN, R. Soil strength as affected by tillage system and wheel traffic in wheat-corn rotation in central Anatólia. **Journal of Terramechanics**, v. 39, p. 23-34, 2002.

## APÊNDICES



APÊNDICE A - Área experimental do estudo 1.



1 – Caixa de cisalhamento; 2 – Cilindro de compressibilidade; 3 – Cilindro de porosidade total.

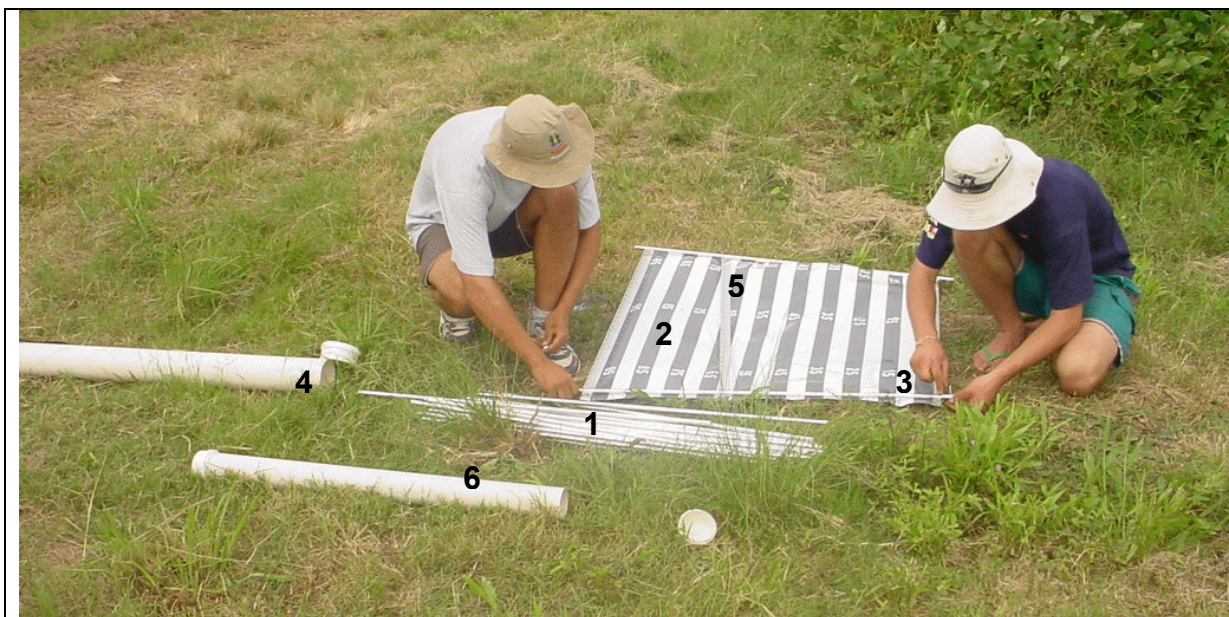
APÊNDICE B - Cilindros usados no estudo 1.



APÊNDICE C - Semeadora utilizada no estudo 1.



APÊNDICE D - Escarificador com rolo destorroador.



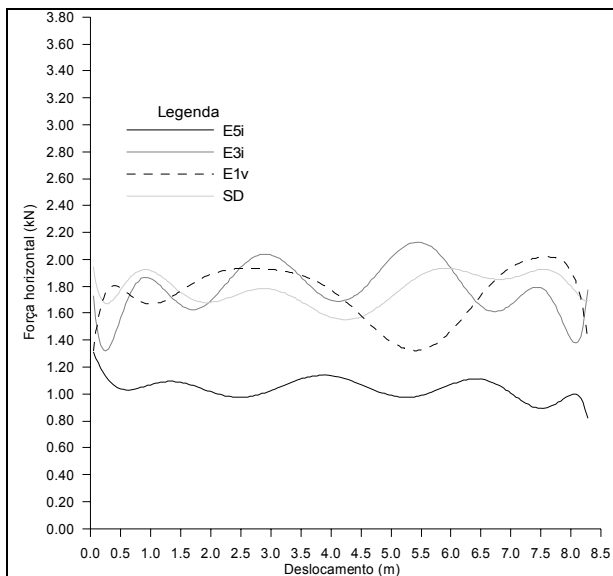
1 – Varetas de alumínio; 2 – Lona métrica; 3 – Haste fixadora da lona métrica; 4 – Tubo para guardar as varetas e a cantoneira de suporte; 5 – Cantoneira de suporte das varetas, 6 – Tubo para guardar a lona.  
 APÊNDICE E - Montagem do perfilômetro.



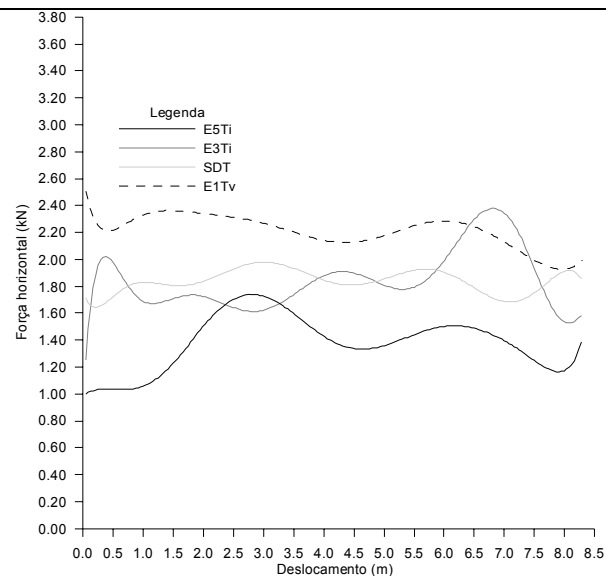
APÊNDICE F - Prensa uniaxial.



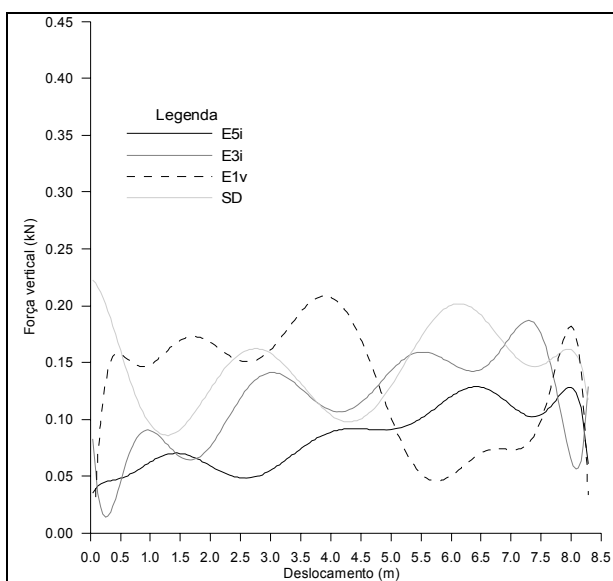
APÊNDICE G - Mesa de cisalhamento direto.



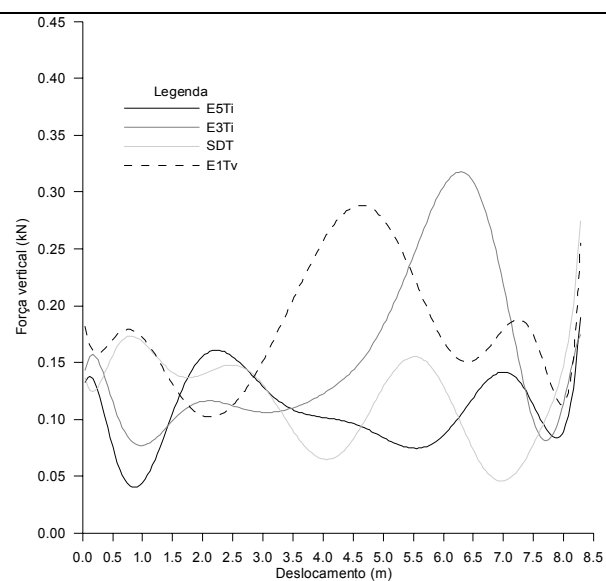
APÊNDICE H - Esforço horizontal nos tratamentos sem tráfego.



APÊNDICE I - Esforço horizontal nos tratamento com tráfego.

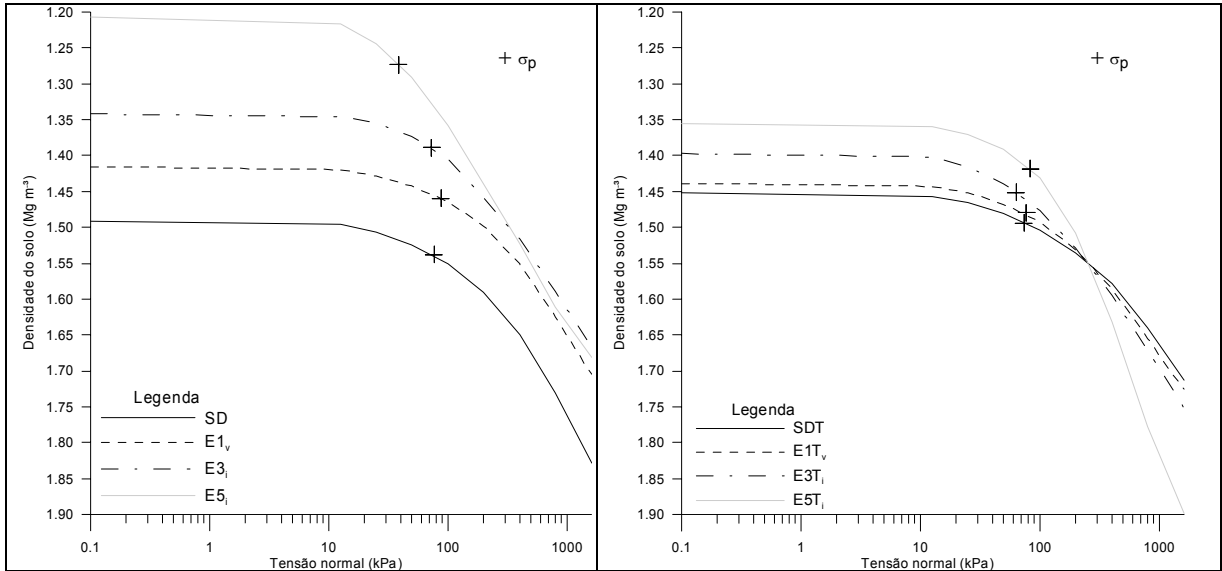


APÊNDICE J - Esforço vertical nos tratamentos sem tráfego.

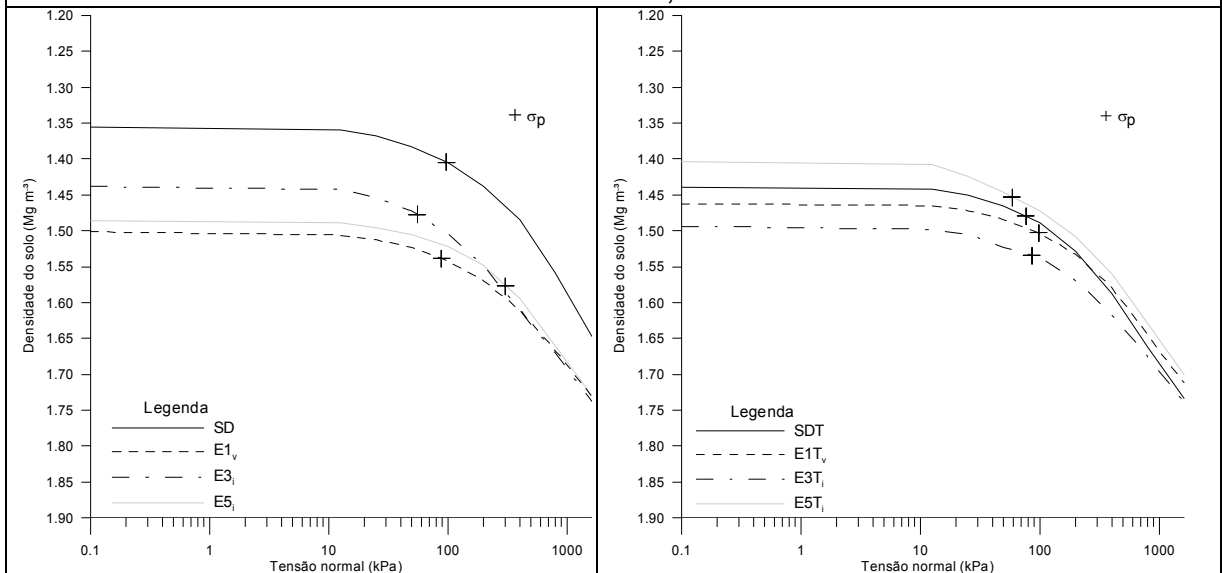


APÊNDICE K - Esforço vertical nos tratamento com tráfego.

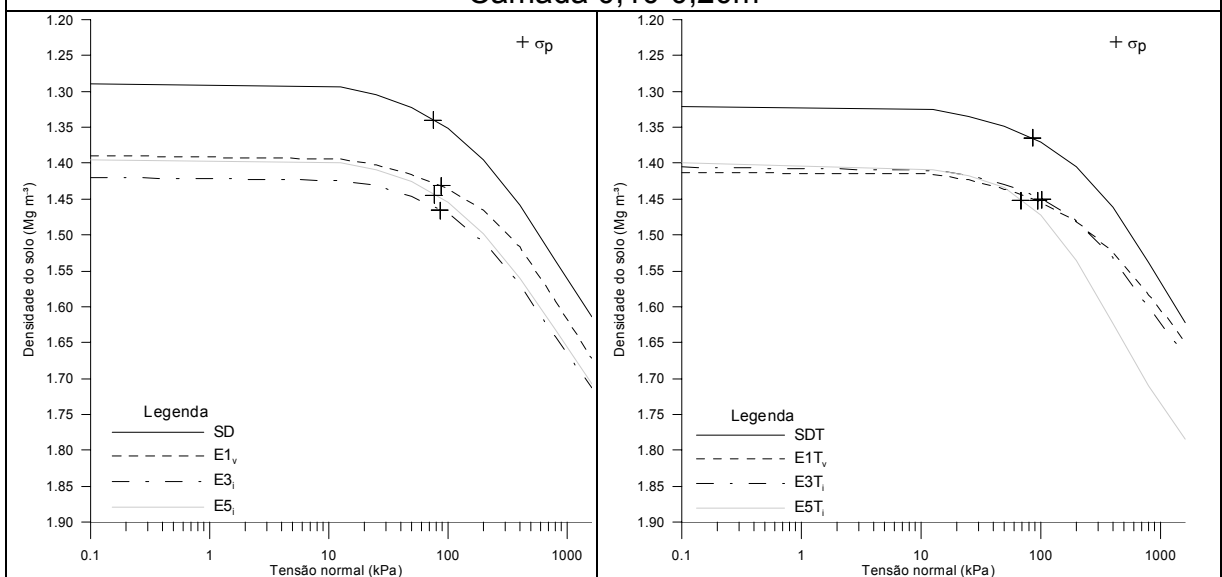




Camada 0-0,10m



Camada 0,10-0,20m



Camada 0,20-0,30m

APÊNDICE L - Curva de compressão nos tratamentos e camadas em estudo.

APÊNDICE M - Parâmetros empíricos da equação, para superfícies de solo consolidadas (firmes) e não consolidadas (soltas).

<b>Parâmetro</b>	<b>Superfície firme</b>	<b>Superfície solta</b>
S <sub>1</sub>	0,041	0,310
S <sub>2</sub>	0,000	0,00263
S <sub>3</sub>	0,613	0,239

APÊNDICE N - Ângulo de atrito interno (em °) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na colheita.

<b>Tráfego</b>	<b>Manejo*</b>			
	<b>SD</b>	<b>E1<sub>v</sub></b>	<b>E3<sub>i</sub></b>	<b>E5<sub>i</sub></b>
Sem tráfego	43,95 Aa	44,21 Aa	49,93 Aa	40,44 Aa
Com tráfego	43,55 Ab	40,23 Bb	41,04 Ba	35,20 Bc

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente a nível de 5% pelo teste de Tukey.

APÊNDICE O - Coesão do solo (em kPa) na interação manejo x tráfego, na camada 0,10-0,20m na semeadura.

<b>Tráfego</b>	<b>Manejo*</b>			
	<b>SD</b>	<b>E1<sub>v</sub></b>	<b>E3<sub>i</sub></b>	<b>E5<sub>i</sub></b>
Sem tráfego	46,32 Ab	43,08 Ab	67,00 Aa	49,33 Aab
Com tráfego	43,08 Aa	55,86 Aa	21,68 Bb	53,75 Aa

\*Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente a nível de 5% pelo teste de Tukey.